



**HAL**  
open science

## La mécanique des structures - Une monographie de la Direction des énergies

Olivier Asserin, Danièle Ayrault, Benoît Bary, Alberto Beccantini, Patrick Blaise, J.-B. Blanchard, Fabienne Bliard, Sophie Borel-Sandou, Emeric Bourasseau, Jean-Christophe Brachet, et al.

► **To cite this version:**

Olivier Asserin, Danièle Ayrault, Benoît Bary, Alberto Beccantini, Patrick Blaise, et al.. La mécanique des structures - Une monographie de la Direction des énergies. CEA Paris-Saclay. Editions du Moniteur, 2025, Les Monographies de la DES, 978-2-281-14800-8. cea-04947183

**HAL Id: cea-04947183**

**<https://cea.hal.science/cea-04947183v1>**

Submitted on 14 Feb 2025

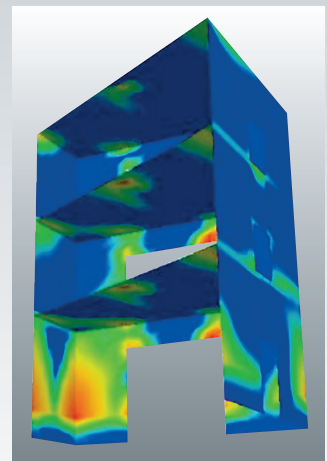
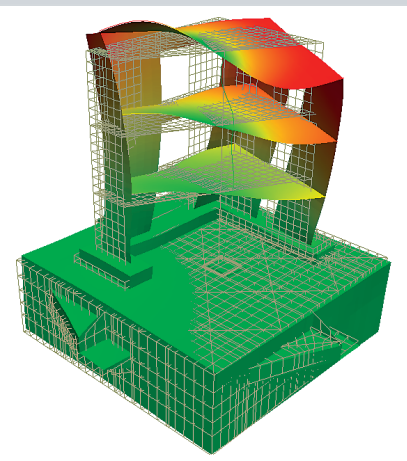
**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# CEA

Une monographie de la Direction des énergies

## La mécanique des structures



EDITIONS  
**LE MONITEUR**







---

## Monographie DES

Une monographie de la Direction des énergies,  
91191 Gif-sur-Yvette Cedex  
Tél. : 01 64 50 10 00

### Comité éditorial

Héloïse Goutte, Bernard Bonin, Patrick Blaise, Stéphane Loubière.

### Coordinateur de l'ouvrage

Ludovic Jason.

### Ont participé à la rédaction de cette monographie :

Olivier Asserin, Danièle Ayrault, Benoît Bary, Alberto Beccantini, Patrick Blaise, Jean-Baptiste Blanchard, Fabienne Bliard, Sophie Borel-Sandou, Emeric Bourasseau, Jean-Christophe Brachet, Matthieu Breuzé, Laurent Briottet, Ali Charbal, Pierre-Étienne Charbonnel, Raphaël David-Menendez, Stanislas de Lambert, Xavier Delaune, Thierry Delon, Olivier Fandeur, Vincent Faucher, Jean-Luc Fayard, Cyril Feau, Evelyne Foerster, Laurent Forest, Pascal Galon, Clément Gauchy, Fabrice Gaudier, Claire Gauthier, Lionel Gélébart, Diogo Gonçalves, Stéphane Gounand, Cédric Gourdin, Thomas Helfer, Jérémy Hure, Denis Hyvert, Clément Introini, Clémentine Jacquemoud, Olivier Jamond, Ludovic Jason, Yann Kayser, Sergey Kudriakov, Romain Lagrange, Thomas Laporte, Nicolas Lelong, Alain Le Maout, Jean-Charles Le Pallec, Bertrand Leturcq, Valérie L'Hostis, Paul Mandin, Bernard Marini, Renaud Masson, Bruno Michel, Sylvie Naury, Séverine Paillard, Domenico Panunzio, Serge Pascal, Cyril Patricot, Grégory Perez, Cécile Pétesch, Eric Philip, Philippe Piteau, Ioannis Politopoulos, Benoît Prabel, Maria-Adela Puscas, Isabelle Ramière, Gilles Rampal, Giuseppe Rastiello, Guillaume Ricciardi, Yannick Robert, Maria-Giovanna Rodio, Gilles Rodriguez, Darius Seyedi, Hélène Simon, Benoit Tanguy, Pierre Verpeaux, Ludovic Vincent.

**Directeur de la publication :** Philippe Stohr.

**Rédacteur en chef :** Stéphane Loubière.

**Maquette :** Pierre Finot.

**Correspondance :** la correspondance peut être adressée à l'Éditeur ou au Rédacteur en chef à l'adresse suivante : [stephane.loubiere@cea.fr](mailto:stephane.loubiere@cea.fr)

© CEA Paris-Saclay et Groupe Moniteur (Éditions du Moniteur), Paris, 2025.

ISBN 978-2-281-14800-8  
ISSN 1950-2672

La reproduction des informations contenues dans ce document est libre de tous droits, sous réserve de l'accord de la rédaction et de la mention d'origine.

**En couverture :** Le viaduc du Vaur (photo de Jean-Jacques Lasmolles) et expérience SMART sur la table vibrante AZALÉE de l'installation TAMARIS (voir fig. 167, p. 176).



CEA

Une monographie de la Direction des énergies

# La mécanique des structures





## Les monographies de la DES présentent les résultats récents de la recherche dans leur contexte et avec leurs enjeux



L'énergie nucléaire du futur :  
quelles recherches  
pour quels objectifs ?



Les réacteurs nucléaires  
à caloporteur gaz



Les combustibles  
nucléaires



La corrosion et l'altération  
des matériaux  
du nucléaire



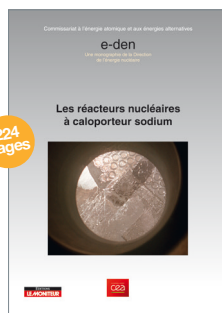
La neutronique



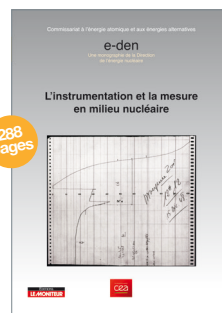
Le conditionnement  
des déchets nucléaires



Le traitement-recyclage  
du combustible nucléaire  
usé



Les réacteurs nucléaires  
à caloporteur sodium



L'instrumentation et la  
mesure en milieu nucléaire



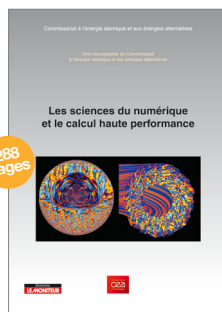
Les réacteurs nucléaires  
expérimentaux



Les matériaux du nucléaire



L'assainissement-  
démantèlement  
des installations nucléaires

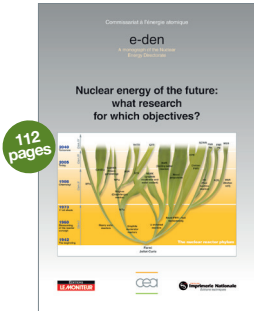


Les sciences  
du numérique et le calcul  
haute performance

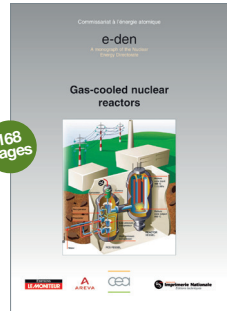




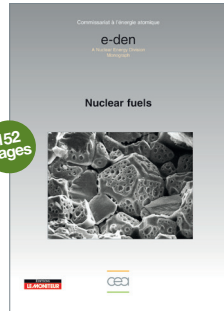
# DES monographs set out the recent findings from research, together with their context and the related challenges



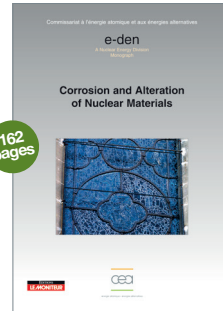
Nuclear energy of the future: what research for which objectives?



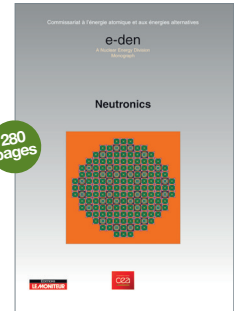
Gas-cooled nuclear reactors



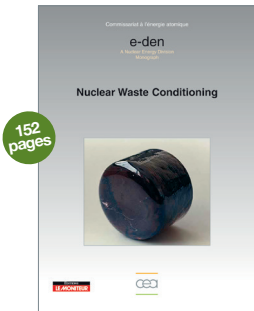
Nuclear fuels



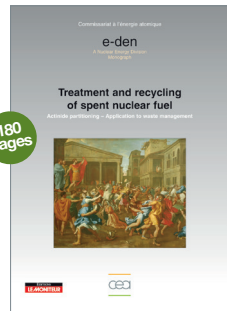
Corrosion and Alterations of Nuclear Materials



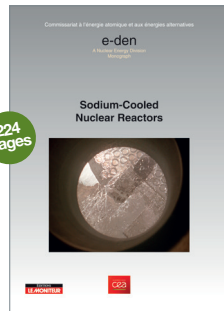
Neutronics



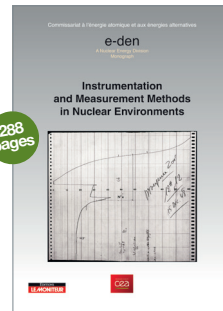
Nuclear waste conditioning



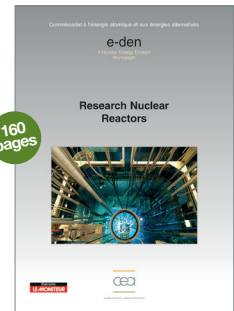
Treatment and recycling of spent nuclear fuel



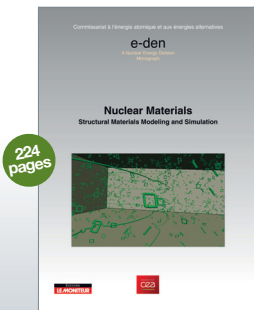
Sodium-Cooled Nuclear Reactors



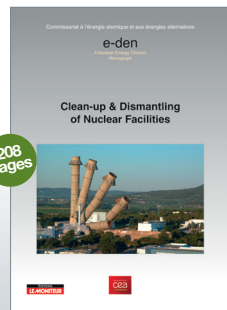
Instrumentation and Measurement Methods in Nuclear Environments



Research Nuclear Reactors



Nuclear Materials



Clean-up & Dismantling of Nuclear Facilities







# Préface

**L**a mécanique, dans son aspect le plus primaire, est très probablement la plus ancienne des sciences de la nature, non pas car la plus simple mais parce qu'elle répond à des besoins existentiels de l'être humain : se loger, s'abriter, se protéger, se déplacer... en un mot : « bâtir ». Bien que la mécanique puise ses racines dans les savoirs anciens liés notamment aux réflexions d'Archimède ou Aristote, l'histoire de la mécanique moderne débute avec les travaux de Galilée. Les trois siècles qui lui ont succédé ont été fondamentaux pour la construction de la mécanique des structures telle que nous la pratiquons aujourd'hui.

Jusqu'au  $\text{xix}^{\text{e}}$  siècle, la notion de mécanique englobait aussi bien l'étude scientifique des corps en mouvement que la théorie des machines. Les prémisses de la mécanique des structures découlèrent de la théorie des poutres, dont la paternité est attribuée à Galilée (bien que des études récentes semblent indiquer que Léonard de Vinci l'ait précédé). Il fallut attendre l'invention du calcul infinitésimal et le  $\text{xviii}^{\text{e}}$  siècle pour disposer d'un premier modèle de mécanique des structures réaliste. C'est au  $\text{xix}^{\text{e}}$  siècle que furent enfin développées les bases d'un cadre théorique permettant de formaliser de façon générale les problèmes de mécanique des structures, celui de la mécanique des milieux continus. Cette théorie a vu sa concrétisation et sa mise en œuvre pratique de manière retentissante avec les constructions d'Eiffel ou encore l'essor des grands travaux ferroviaires d'aménagement du territoire français. Le viaduc du Vaur\*, entre Tarn et Aveyron, en couverture de cette monographie en illustre le résultat. Construit entre 1895 et 1902, il est l'œuvre de l'ingénieur Paul Bodin (avec Rosario de Volontat) de la Société de construction des Batignolles. C'est Jean Compagnon qui en fut le chef de chantier après avoir été débauché de chez Eiffel dont il assura le chantier du viaduc de Garabit et de la tour Eiffel.

Au cœur de la mécanique des structures se trouve l'idée d'étudier les édifices ou les machines comme des agencements cohérents d'éléments, pouvant ainsi distinguer l'analyse de l'ensemble de celle de ses parties prises en détail.

Le tournant majeur de la deuxième moitié du  $\text{xx}^{\text{e}}$  siècle est l'avènement des ordinateurs et la modélisation numérique des structures. Cette simulation numérique en mécanique des structures est maintenant incontournable et indispensable pour accompagner les ingénieurs et les techniciens dans le dimensionnement de tout projet. À ce titre elle accompagne depuis leurs débuts les travaux de conception et de réalisation des installations nucléaires.

La mécanique des structures englobe des applications diverses, des physiques complexes et couplées. Si la mécanique des structures est une thématique scientifique transverse, les articles de cette monographie sont consacrés à son application dans le monde du nucléaire et tout particulièrement celui des réacteurs. Après une présentation des fondements de la mécanique des structures, (méthodes numériques, lois de comportement, outils expérimentaux et de simulation) cette

---

\* Classé monument historique le 28 décembre 2021.

*monographie aborde les méthodes développées spécifiquement pour étudier le comportement des structures mécaniques au sein des réacteurs nucléaires en réponse aux très nombreuses sollicitations (notamment thermiques, hydraulique, hydrique, magnétique...). Les pages suivantes se consacrent aux implications des travaux présentés sur la démarche de codification, et sa mise en œuvre dans le cadre de deux exemples de travaux de conception de projets nucléaires. La monographie présente ensuite de manière transverse un état des lieux des travaux en cours sur les méthodologies numériques et expérimentales permettant d'aller plus loin dans l'étude et l'amélioration du comportement mécanique des structures du parc nucléaire existant d'une part, de participer au développement des nouveaux réacteurs d'autre part. Enfin ce volume s'achève sur la valorisation, des compétences acquises par la DES dans le cadre des réacteurs nucléaires, dans le domaine des nouvelles technologies de l'énergie en lien avec la mise en place de stratégies de décarbonation des usages domestiques et industriels.*

*Je vous en souhaite une excellente lecture,*

*Philippe STOHR  
Directeur des Énergies*

# Introduction

## Un bref historique de la mécanique des structures

Depuis qu'il construit des ouvrages, et peut-être bien avant encore, l'Homme se pose des questions de tenue mécanique.

La question de la durabilité des structures a très certainement dû se poser tout aussi tôt. Le modèle intuitif du « tas de pierres » offre à cette question une réponse pertinente, comme le démontrent les pyramides d'Égypte ou celles des civilisations d'Amérique du Sud, qui ont traversé les siècles. Si le modèle est simple, les réalisations n'en sont pas moins grandioses. Plus loin encore dans le temps, les constructions mégalithiques du Néolithique traduisent cette volonté d'ériger des ouvrages capables de traverser les époques jusqu'à nous.

Ainsi, à l'époque des Babyloniens, le Code de Hammourabi stipulait déjà que « si un architecte a construit pour un autre une maison et n'a pas rendu solide son œuvre, si la maison construite s'est écroulée et a tué le maître de la maison, cet architecte est passible de mort » [1]. Dans ces conditions, nul doute que les architectes de Babylone réfléchissaient à la tenue mécanique de leurs ouvrages et on peut raisonnablement penser qu'ils disposaient de quelques « recettes » pour les aider à la garantir.

Ces types de construction reposent essentiellement sur deux choses : le choix d'un *matériau*, la pierre, et celui de leur agencement, la *structure*. Comme le matériau fut longtemps imposé par la ressource locale, la tenue mécanique de l'ouvrage dépendait essentiellement de sa structure. Le génie humain s'est ainsi exercé à trouver des agencements permettant d'améliorer leur tenue mécanique par un « effet de structure ». L'arc en plein cintre, fermé à son sommet par une clé de voûte, en est un exemple connu depuis la haute antiquité. Très utilisé par les Romains, il a permis à certaines de leurs réalisations de défier le temps, comme l'aqueduc du pont du Gard.

La question de la *formalisation* des problèmes de mécanique des structures a dû également se poser très tôt, mais il fallut attendre l'invention du calcul infinitésimal et le XVIII<sup>e</sup> siècle pour disposer d'un premier modèle réaliste, la poutre d'Euler-Bernoulli. Ce n'est qu'au XIX<sup>e</sup> siècle que fut enfin défini un cadre théorique permettant de formaliser de façon générale les problèmes de mécanique des structures, celui



Fig. 1. Pont du Gard, aqueduc romain du I<sup>er</sup> siècle, dont la structure est composée d'arcs en plein cintre.

de la *mécanique des milieux continus*. Depuis, ce cadre a fait l'objet d'avancées significatives. On peut notamment citer les travaux menés dans les années 1970-1980 par J. Lemaitre et J.-L. Chaboche sur la formulation des lois de comportement des matériaux dans un cadre thermodynamique [2].

Comme il est difficile de résoudre analytiquement les équations de la mécanique des milieux continus, des modèles simplifiés, reposant sur des considérations géométriques, en ont été dérivés. Cette démarche est à l'origine de la théorie des poutres et des plaques. D'autres méthodes simplifiées ont été développées, reposant sur des bilans d'efforts et de moments, comme celle des bielles et tirants pour le dimensionnement des treillis de barres. Ces méthodes simplifiées ont été utilisées à partir de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et tout au long du XX<sup>e</sup> pour le dimensionnement mécanique des structures. Elles sont encore largement employées et servent toujours de référence dans les codes et normes de conception et de construction mécanique [3]. Au cours de la 2<sup>de</sup> moitié du XX<sup>e</sup> siècle, l'avènement de l'informatique a permis de résoudre dans le cas général, mais de façon approchée, les équations de la mécanique des milieux continus à l'aide de « codes de calcul ». Pour la discrétisation des équations, préalable nécessaire à la numérisation des données, la **méthode des éléments finis** s'est rapidement imposée en mécanique des structures. Pour accompagner ces développements, une nouvelle discipline scientifique est née : l'**analyse numérique**. Initialement cantonnée à la R&D, l'utilisa-





Fig. 2. Supercalculateur Joliot-Curie (coconçu par Atos-Bull et CEA DAM Île-de-France) dédié à la recherche académique française et européenne.

tion de codes de calcul de mécanique s'est répandue dans l'ingénierie au cours des années 1980-1990 avec la démocratisation des moyens informatiques.

Les codes de calcul de structures utilisés de nos jours ont atteint une grande maturité par leur large diffusion dans de nombreux secteurs industriels et une utilisation qui s'est beaucoup démocratisée, notamment grâce à l'intégration de son enseignement dans la formation des ingénieurs. Toutefois, si le dimensionnement des structures à l'aide de codes de calcul est devenu une activité courante des bureaux d'études, c'est qu'elle relève, pour l'essentiel, du domaine de l'analyse linéaire. Dans le domaine non linéaire en revanche, l'utilisation des codes de calcul de structures relève encore d'une activité de R&D, menée souvent au cas par cas.

Les premières structures conçues l'étaient selon la méthode de l'essai et de la ruine, avec renforcement là où un point faible apparaissait. Avec la mise en évidence de grandeurs d'intérêt et la formalisation de quelques lois et critères simples sont apparus les calculs de structures. Ces calculs visent à prédire les performances de la structure sur quelques critères macroscopiques : déplacement, rupture, fréquence propre, température, etc. Ils s'appuient généralement sur des règles établies par le retour d'expérience. L'invention du calcul différentiel et de la mécanique des milieux continus a permis avec succès d'affiner les prédictions, bien que paradoxalement la matière à petite échelle ne soit pas un milieu continu homogène et nécessite par conséquent souvent le recours à l'homogénéisation.

L'analyse des réponses d'une structure à des sollicitations peut être prédictive (quelle sera la valeur d'une grandeur

pour une sollicitation donnée ?) ou interprétative (quel est le modèle qui permet de prédire le résultat obtenu ?). Ce sont les deux grandes branches de la mécanique des structures : la simulation et la modélisation. On leur associe l'observation expérimentale, à la fois pour comprendre la physique (alimentant ainsi la modélisation) et valider les résultats de simulation. On parle alors de triptyque modélisation-simulation-expérimentation, classiquement utilisé en mécanique des structures, tout comme dans la majorité des autres disciplines scientifiques

de l'ingénierie nucléaire, telles que la neutronique, la thermohydraulique ou encore la chimie.

En première approximation, on peut considérer la mécanique comme localement linéaire, avec donc existence et unicité de la réponse pour une petite perturbation. Malheureusement, les effets géométriques sont par nature non linéaires : il s'ensuit qu'une structure qui les exploite peut perdre l'unicité de son comportement, ainsi que sa stabilité. Le calcul de structure peut donc être linéaire puis non linéaire. Par ailleurs, les « structures » peuvent avoir des tailles caractéristiques très différentes, nécessitant la mise en œuvre de techniques particulières, expérimentales ou numériques, en fonction de la finesse de l'information recherchée : de la quantité d'ingénierie « homogénéisée » à l'évolution de quantités très locales (fissures par exemple). La mécanique des structures doit alors pleinement intégrer des **approches multi-échelles**. Enfin, il est rare que le comportement d'une structure puisse être décrit par les seules équations de la mécanique. Les chargements appliqués (thermomécaniques par exemple), la nature même du matériau (milieux poreux par exemple) ou les quantités d'intérêt étudiées (écoulement par exemple) nécessitent fréquemment d'introduire des couplages multi-physiques.

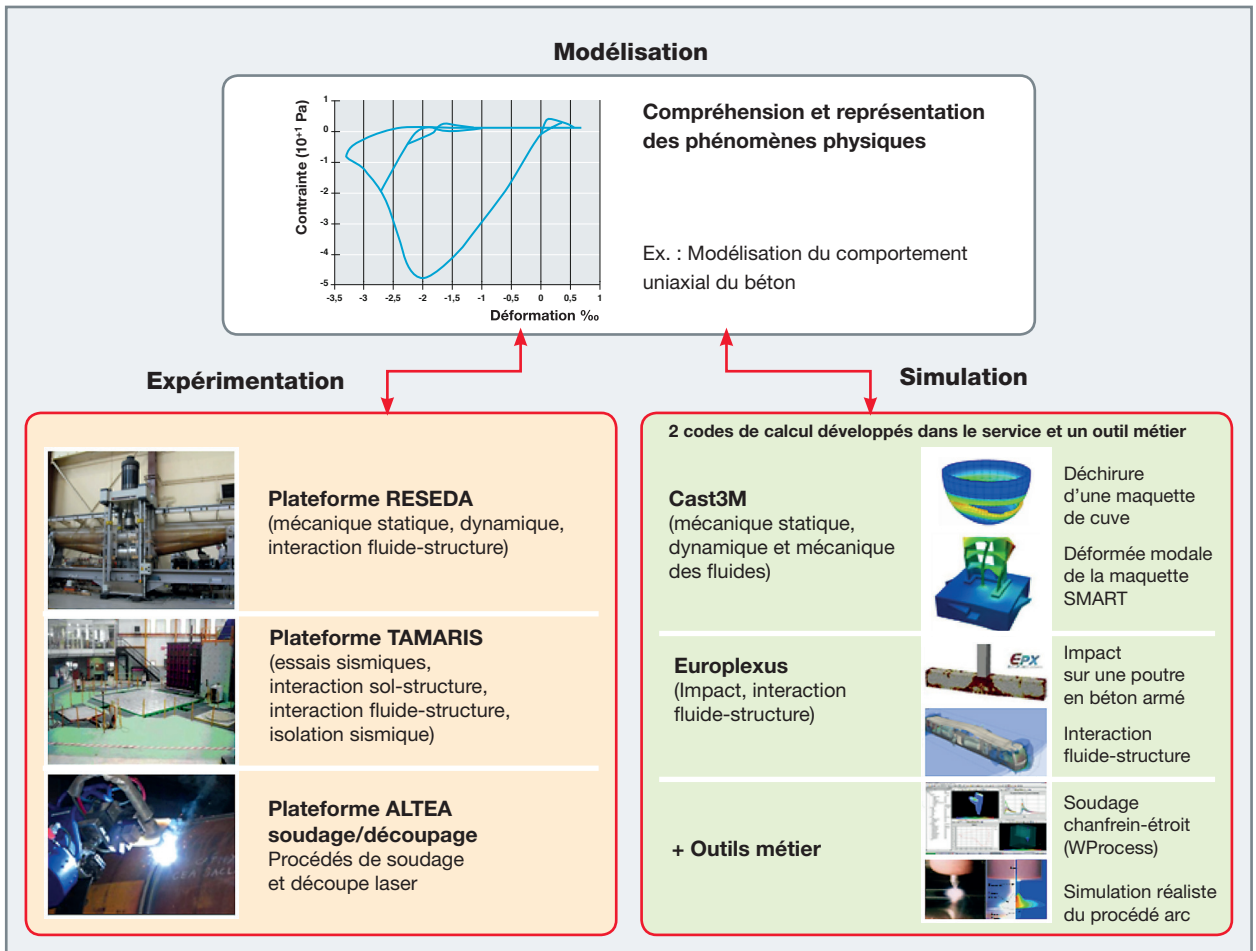


Fig. 3. Illustration du triptyque modélisation-simulation-expérimentation en mécanique à la Direction des Énergies du CEA.

## Pourquoi la mécanique des structures dans le nucléaire ?

Quand on évoque l'énergie nucléaire, certains domaines scientifiques viennent rapidement à l'esprit : physique des particules, neutronique, chimie, thermohydraulique... pourtant, la mécanique des structures a toujours joué un rôle central dans la plupart des phases qui mènent de la recherche fondamentale à la conception puis à l'exploitation sûre des réacteurs nucléaires. En témoigne la remarquable continuité dans laquelle la recherche et l'expertise en mécanique ont été menées au CEA dans des unités opérationnelles dont la création remonte à l'accélération du programme électronucléaire français à la suite du choc pétrolier de 1973-1974 : l'ancêtre de l'actuel département DM2S au CEA-Saclay est ainsi né en juillet 1975.

C'est également à cette époque qu'est né le concept de « défense en profondeur » qui vise à assurer la sûreté des installations par la multiplication des lignes de défense dès le stade de la conception. Cette doctrine repose en particulier

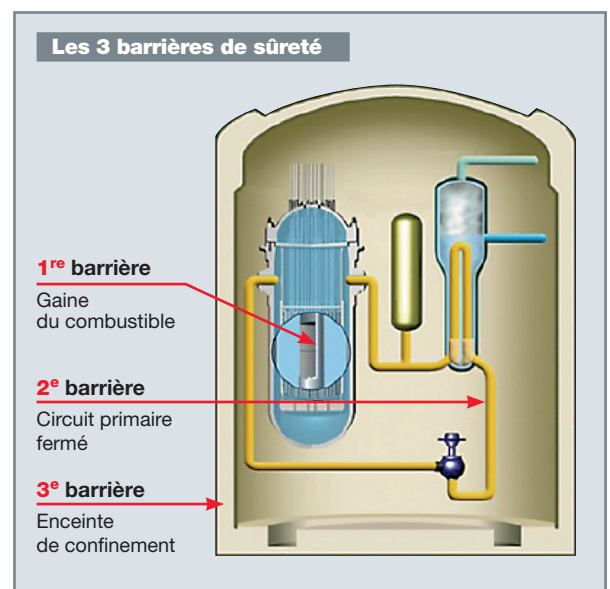


Fig. 4. Principe des trois barrières de confinement dans un réacteur nucléaire.

sur l'existence de trois barrières de confinement : la gaine (qui enveloppe le combustible), le circuit primaire (qui contient l'eau qui refroidit le cœur) et l'enceinte de confinement (qui abrite le circuit primaire). Ce sont la tenue mécanique et donc l'étanchéité de ces barrières qui permettent d'assurer le confinement des matières radioactives, pour limiter, aux niveaux les plus faibles possibles, les rejets dans l'environnement, même lors d'hypothétiques accidents graves. Ces structures interagissent avec les pastilles combustibles, l'écoulement d'eau pressurisée et l'atmosphère de l'enceinte, favorisant une approche pluridisciplinaire à l'interface avec la neutronique, la thermique, la mécanique des fluides et la chimie. Ce rôle central de la tenue mécanique des barrières de confinement est aujourd'hui encore le socle d'une très grande partie des activités en mécanique dans le nucléaire.

Le fonctionnement nominal d'une installation résulte de choix de conception qui sont souvent issus d'un équilibre entre les performances et la durée de fonctionnement, sous la contrainte forte d'exigences de sûreté très strictes. Ces exigences de sûreté imposent des règles de conception codifiées, partagées et intégrant des marges de dimensionnement importantes. Celles-ci sont regroupées dans des référentiels tels que le RCC-M (pour les REP du parc) ou le RCC-MRx (pour les nouveaux réacteurs, les réacteurs de recherche, les réacteurs de 4<sup>e</sup> génération et de fusion), documents qui reposent sur un important travail collégial permettant de passer des connaissances les plus pointues issues de la R&D à la formulation de règles utilisables par les bureaux d'études et partagées par tous les acteurs : organismes de recherche, industriels et autorités de sûreté (qui sont *in fine* souveraines dans leur analyse des dossiers présentés par les exploitants).

C'est seulement dans ce cadre de sûreté très strict que peuvent se concevoir la recherche de performances et la question de la durée de fonctionnement des installations, qui

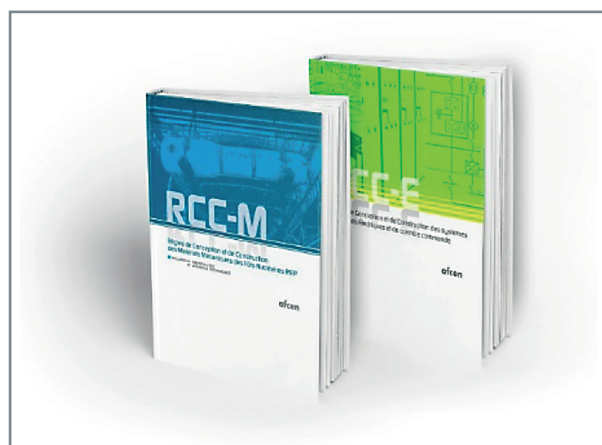


Fig. 5. Référentiel de dimensionnement RCC-M.

sont toutes deux centrales dans la viabilité économique de la filière. Ces sujets portent donc une partie importante de la R&D sur le comportement mécanique des barrières de confinement.

La tenue mécanique et l'étanchéité de la gaine du combustible (1<sup>re</sup> barrière) reposent sur des phénomènes complexes et souvent couplés, objet d'une R&D active, largement soutenue par les concepteurs et exploitants. En effet, la performance du combustible a un impact majeur sur le taux de combustion atteignable par le combustible, qui pilote la rentabilité de la production comme la quantité de déchets générés par kWh produit. Elle impacte également la manœuvrabilité du réacteur, sujet d'importance croissante dans la perspective d'un mix énergétique (électrique) incluant de plus en plus de sources d'énergies intermittentes. On retrouve dans ce domaine des phénomènes largement multi-échelle : l'évolution microstructurale et chimique de la pastille combustible en cœur, ses déformations sous irradiation et sa fragmentation sont couplées avec le comportement thermomécanique de la gaine (IPG : interaction pastille-gaine) notamment lors des rampes de puissance. Les déformations sous irradiation de la gaine peuvent également modifier la géométrie globale de l'assemblage combustible, avec un impact sur l'écoulement du fluide primaire dans le cœur, l'apparition de « lames d'eau » et d'écoulements transverses imposant en retour des chargements mécaniques sur les assemblages (ce couplage pouvant amplifier ou stabiliser la déformation au cours du cycle). Également, les vibrations des crayons soumis à l'écoulement primaire peuvent induire des phénomènes d'usure des gaines par *fretting* (usure par des mouvements cycliques de petit débattement). La compréhension fine de tous ces phénomènes à la fois couplés et multi-échelles repose sur des activités poussées de modélisation, de simulation numérique et d'expérimentation. Elle est également porteuse d'une recherche d'amélioration des performances du combustible, en fonctionnement nominal (nouvelles conceptions d'assemblages pour limiter les vibrations et les risques d'usure) ou en situation accidentelle (combustibles dits ATF, *accident tolerant fuels*, visant à accroître la robustesse du combustible lors de phases incidentelles et accidentelles, et donc la sûreté globale de l'installation).

Le comportement mécanique des structures composant la 2<sup>e</sup> barrière de confinement est également crucial pour la durée de fonctionnement et la sûreté des réacteurs du parc.

En premier lieu, la cuve des REP fait partie des composants non remplaçables, son aptitude au service conditionne donc directement celle du réacteur. Dans ce domaine, à la croisée de très forts enjeux économiques et de sûreté, la R&D est très active et en lien fort avec les partenaires industriels du CEA. La durée de vie de la cuve est avant tout liée à la fragilisation de l'acier soumis à l'irradiation provenant du cœur. La démonstration de la capacité de la cuve à assurer sa



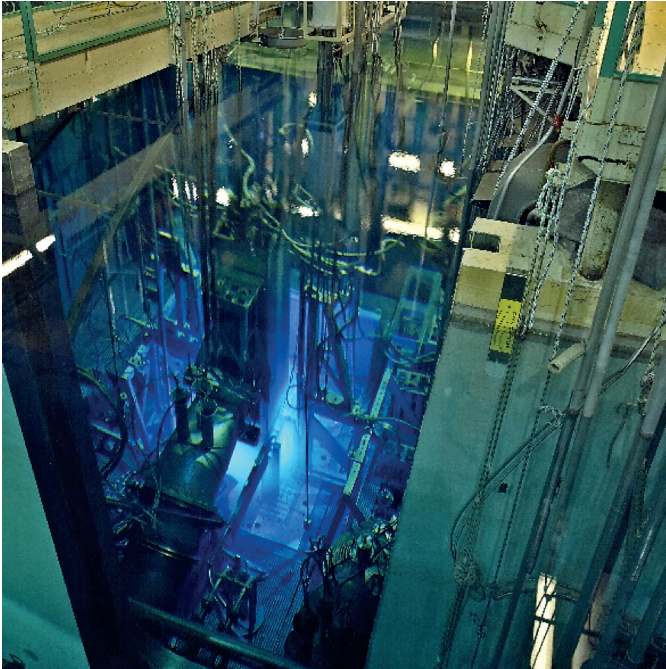


Fig. 6. Réacteur OSIRIS où étaient menées des expérimentations sur la résistance des combustibles REP à l'IPG.

fonction requiert notamment l'absence de risque de rupture brutale lors de scénarios transitoires spécifiques. Cela nécessite la connaissance de l'état courant de la cuve et de son évolution future, en particulier la taille et l'orientation des défauts sous revêtement et l'évolution des propriétés mécaniques de l'acier (liées à son état initial et à son évolution sous irradiation). Dans la période récente, l'exemple emblématique dans ce domaine est celui des travaux menés à la suite de la constatation d'anomalies de concentration en carbone dans des composants de certains REP du parc français (fonds ou couvercles). À cette occasion, en réponse à la demande de l'ASN, l'exploitant a pu démontrer que l'impact de ces anomalies sur les propriétés mécaniques des zones concernées ne remettait pas en cause la démonstration de sûreté de ces composants, ce qui a conduit l'ASN à autoriser l'exploitation des réacteurs concernés en 2017. Ce travail a profité d'un vaste continuum de connaissances allant de la métallurgie et des modes de fabrication aux différents aspects de la mécanique de la rupture (propagation de fissures dans des structures 3D, sous-chargeurs thermomécaniques complexes...). Au-delà des connaissances à l'état de l'art scientifique, le traitement d'un dossier de cette ampleur repose également sur la capacité à maîtriser le lien avec les règles de dimensionnement, les marges qu'elles intègrent, les modèles phénoménologiques sur lesquels elles reposent et les différents types d'essais réalisés en support (réglementaires, de caractérisation, essais innovants). Cet exemple illustre la nécessité du maintien sur le long terme de compétences de haut niveau scientifique sur un large périmètre d'expertise couvrant les aspects simula-

tion, modélisation et expérimentation, et donc d'une implication continue d'équipes de recherche en prise avec la réalité industrielle.

Le reste du circuit primaire est également l'objet de nombreux travaux de R&D en mécanique. La résistance des différentes branches du circuit primaire est un autre sujet crucial puisque leur rupture peut être à l'origine de l'un des accidents de référence pour les REP : l'APRP (accident de perte de réfrigérant primaire). Dans ce domaine, on peut notamment citer l'importance de la maîtrise du soudage des tuyauteries et de ses conséquences sur la tenue mécanique : défauts de soudure, impact des cycles de chargement thermique sur le matériau et la propagation de défauts, contraintes résiduelles, spécificités des liaisons bimétalliques sont autant de sujets faisant l'objet d'une R&D approfondie. Au-delà du circuit primaire, ces travaux s'appliquent à d'autres composants et circuits, comme l'illustrent les études très poussées menées sur la fatigue thermique à la suite de l'incident sur le circuit de refroidissement à l'arrêt de la centrale de Civaux en 1998.

Les tubes des générateurs de vapeur (GV) sont également des structures critiques vis-à-vis de la sûreté et du rendement d'un REP. La vapeur produite dans le GV sortant du bâtiment réacteur pour alimenter les turbines, toute rupture de tube pourrait entraîner un transfert de l'eau primaire vers l'extérieur de l'enveloppe (*by-pass* du confinement). En conséquence, l'état de ces tubes est particulièrement surveillé à chaque arrêt de tranche et, afin d'éviter tout risque de rupture, certains tubes peuvent être bouchés préventivement, ce qui entraîne une baisse de rendement. Les mécanismes de dégradation de ces tubes relèvent principalement de la corrosion sous contrainte (CSC) et des vibrations sous écoulement (pouvant entraîner usure et fissuration par fatigue). La R&D sur ces phénomènes fortement couplés (chimie-mécanique et fluide-structure respectivement) repose encore une fois sur des approches associant expérimentation, modélisation et simulation numérique. La R&D sur l'instabilité fluide-élastique en écoulement diphasique est toujours très active, notamment relancée par l'arrêt en 2013 des deux réacteurs de la centrale de SONGS (San Onofre, en Californie) en raison d'une usure massive de tubes dans des GV de remplacement seulement deux ans après leur installation. Ces enjeux importants associés à une physique complexe nécessitant une connaissance précise de l'état courant du GV en ont fait le premier composant des REP sur lequel la filière a initié le développement d'un **jumeau numérique**.

Ces quelques exemples illustrent l'importance de la mécanique dans le fonctionnement nominal d'un réacteur et la prévention d'incidents de fonctionnement, mais la démonstration de sûreté repose également sur l'analyse des conséquences d'événements très rares, afin de s'assurer qu'ils ne sont pas de nature à initier une situation accidentelle, voire un accident grave. Il s'agit donc d'inclure certains de ces



Fig. 7. Centrale nucléaire de San Onofre (Californie).

événements dans le dimensionnement et de démontrer la maîtrise des conséquences de certaines situations hors dimensionnement.

Dans ce domaine, on retrouve de nombreux sujets touchant aux agressions externes ou internes et relevant de la dynamique des structures : résistance au séisme des bâtiments et équipements, conséquences de chargements dynamiques sur ou dans une installation (chutes d'objet, crashes d'avion, explosions...).

Même dans un pays comme la France où la sismicité est faible à modérée, la tenue sismique des installations nucléaires est prise en compte dès le dimensionnement et soumise à des réévaluations périodiques intégrant le progrès des connaissances scientifiques et le retour d'expérience (REX) d'événements sismiques significatifs. Cette thématique est à la croisée de la sismologie (qui pilote l'aléa sismique et s'appuie sur la géologie au sein d'approches par nature probabilistes) et du génie parasismique qui vise à étudier la réponse des structures à des chargements sismiques pour démontrer leur capacité à y résister (en termes d'intégrité ou de fonctionnement). Ce vaste domaine repose sur un socle scientifique et méthodologique très spécifique lié à la nature aléatoire du chargement appliqué à des structures complexes. Ici aussi, un haut niveau scientifique et une grande transversalité sont nécessaires pour traduire les comportements non linéaires de ces structures sous vibrations aléatoires en règles de dimensionnement et d'analyse à destination des ingénieurs, assurant des marges de sécurité sans pour autant imposer un conservatisme excessif, source de surdimensionnement coûteux et potentiellement contre-productif. Cette complexité implique également le

recours à des outils de simulation numérique avancés et à une validation expérimentale aussi proche que possible de la réalité, ce qui se traduit par des installations expérimentales de haut niveau et de grande taille (par exemple, la plateforme TAMARIS du CEA-Saclay).

Enfin, la rareté de ces événements implique de tirer un REX aussi large que possible de chaque séisme affectant une installation nucléaire. Dans la période récente, on peut citer les centrales japonaises de Kashiwazaki-Kariwa en 2007 (dont un grand REX a été tiré lors de *benchmarks* internationaux) et de Fukushima en 2011, dont le REX s'est notamment traduit en termes réglementaires en France par l'adoption d'un nouveau niveau sismique de référence, le SND (Séisme Noyau Dur), pour des équipements devant résister à des conditions extrêmes (hors dimensionnement). En France, le séisme du Teil (11 novembre 2019), le plus fort vu par des installations nucléaires françaises depuis 1980 est également le premier à avoir été suivi sur site par une instrumentation numérique moderne, fournissant des données permettant de mener des analyses poussées et de faire progresser la connaissance en France comme à l'international.

La résistance à des chargements mécaniques brutaux fait également l'objet de nombreux travaux de R&D en support aux démonstrations de sûreté. On peut ici citer par exemple la résistance des installations aux impacts d'avions ou la chute de colis de transport de matières radioactives (l'enjeu étant de garantir l'étanchéité du colis ou l'intégrité de la structure impactée selon les cas). Si la thématique scientifique (dynamique rapide non linéaire) rejoint des sujets hors nucléaires (calcul de crash automobile ou aéronautique), la grande spécificité des objets et installations étudiés (capots amortisseurs des colis de transport, structures de génie civil du nucléaire...) nécessite une grande connaissance du matériel et de la réglementation associée. Dans de nombreux autres sujets en dynamique rapide, l'interaction fluide-structure joue un rôle fondamental, notamment pour l'étude des conséquences des ruptures de tuyauteries (conséquences mécaniques des APRP, fouettement de tuyauteries haute énergie par exemple) ou pour les accidents graves dans les différents types de réacteurs (tenue de la cuve sous des chargements thermomécaniques extrêmes, explosion vapeur, explosion hydrogène...). Dans ces domaines où le REX est fort heureusement très limité et où la réalisation d'essais à l'échelle 1 est souvent impossible, des travaux importants sont menés sur la base d'expériences plus analytiques à échelle réduite et du développement d'outils de simulation numérique dédiés (en particulier le code de calcul EUROPLEXUS).

La sûreté des installations repose également sur le génie civil, notamment l'enceinte du réacteur, 3<sup>e</sup> barrière de confinement dont l'étude est un domaine à part entière. En effet, elle doit être capable d'assurer sa fonction en toute situation



(surpression, séisme, explosion...) tout au long de la vie de l'installation, ce qui implique de maîtriser son vieillissement en fonctionnement nominal et son évolution lors des chargements exceptionnels dus aux épreuves périodiques d'étanchéité. Ces thématiques sont fortement multi-physique (thermo-chémo-hydro-mécanique) et multi-échelle vu la grande disparité de taille entre des fissures de dimensions micrométriques (pilotant le taux de fuite) et les dimensions décamétriques de l'enceinte. Là aussi, une R&D très active est à l'œuvre associant l'expérimentation et des outils de simulation mécanique couplés à des méthodes de remontée d'échelles dédiées. Comme pour le GV, l'enceinte est un des composants sur lesquels la mise au point d'un jumeau numérique a été initiée très tôt.



Fig. 8. Centrale nucléaire de Fukushima.

Comme on l'a vu au long de ce panorama, la plupart des domaines et des approches d'analyse reposent sur la simulation numérique. Celle-ci s'est incroyablement développée depuis les années 1970 et, d'outil d'appui ponctuel à l'ingénieur, elle est devenue une brique centrale des études tout en étant elle-même un sujet de R&D à part entière. Aujourd'hui, les outils de simulation sont devenus un lieu de capitalisation de la R&D (modélisation physique, méthodes numériques avancées, bases de validation expérimentale) et les besoins sont en hausse continue, avec une demande croissante de simulations 3D de plus en plus fines, couplées, sur des domaines de plus en plus étendus. Ces besoins sont également tirés par la croissance de la puissance de calcul disponible, aussi bien dans le bureau de l'ingénieur d'étude que sur les moyens de calcul centralisés, pour lesquels le prochain horizon est l'exaFlop ( $10^{18}$  opérations par seconde). Ces évolutions ne sont pas sans conséquence sur les outils de simulation historiques, dont les racines remontent à plus de 40 ans avec des architectures qui, si elles permettent encore de réaliser la plupart des simulations courantes, atteignent leurs limites et ne seront plus en capacité d'exploiter pleinement les architectures et performances des futures machines. Dans cette optique, des travaux de prototype d'une nouvelle architecture informatique et d'une programmation

modernisée ont abouti récemment au lancement d'un projet ambitieux de développement d'un nouvel outil de simulation en mécanique plus performant et modulaire, facilitant le travail de développement en environnement HPC, tout en conservant la capitalisation de décennies de R&D des outils actuels.

Cette préparation du futur va bien au-delà des seuls outils de calcul, puisque les sujets mécaniques dans leur ensemble sont présents dans de nombreux projets d'installations portant l'avenir de l'énergie nucléaire : futurs réacteurs modulaires (SMR), de génération IV (RNR-Na ou réacteurs à sels

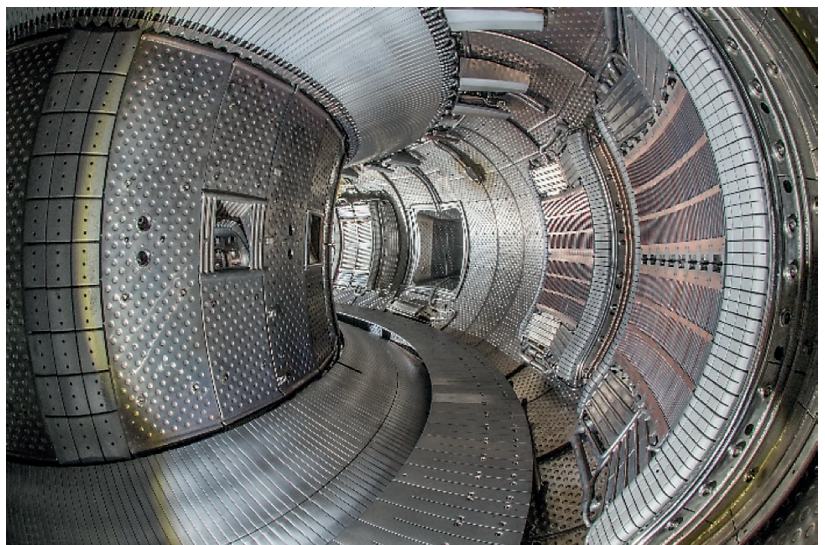


Fig. 9. ITER.

fondus, AMR), réacteurs de fusion (ITER), qui sont sources de grands challenges pour les matériaux et la mécanique. L'évolution du mix énergétique et le développement des énergies renouvelables et du stockage (indispensables pour pallier leur intermittence) sont également porteurs d'enjeux nouveaux pour la R&D en mécanique dans le domaine de l'énergie : sécurité des batteries en cas d'emballement thermique, simulation multi-physique des piles à combustible ou encore interaction fluide-structure pour l'étude des conséquences d'explosions hydrogène (sites de production, stockage, parkings, tunnels...) font déjà aujourd'hui l'objet d'une valorisation de travaux menés de longue date dans le domaine nucléaire.

Dans tous les domaines évoqués jusqu'ici, la capacité de rester à l'état de l'art dans de nombreux domaines repose aussi sur un ressourcement permanent des équipes de recherche, notamment au travers de nombreuses collaborations avec des équipes académiques, tout particulièrement via le co-encadrement de thèses, qui sont souvent le moyen privilégié de maintenir un lien fort entre la recherche académique en amont et les travaux de R&D plus appliqués, généralement portés par le CEA.

Ce survol permet d'appréhender l'étendue des applications et des sujets à fort enjeu reposant sur la mécanique. Comme déjà évoqué, la capacité à couvrir l'ensemble des sujets stratégiques par une R&D à l'état de l'art et une expertise de haut niveau en prise avec les problématiques industrielles nécessite le maintien dans la durée d'un très large éventail de compétences : aspects expérimentaux nécessitant des plateformes dédiées, modélisation multi-physique, multi-échelle et outils de simulation numérique performants adaptés à l'évolution des machines de calcul tout en s'inscrivant dans le temps long pour permettre la capitalisation des connaissances. Enfin, ce continuum « *de la recherche à l'industrie* » ne serait pas complet sans la capacité à dériver de cette connaissance pointue des méthodes simplifiées adaptées à la conception et des règles de dimensionnement aux marges maîtrisées, permettant d'assurer la réussite de futurs projets d'ingénierie. Dans ce domaine également, les nouvelles technologies numériques (méta-modélisation, méthodes d'apprentissage sur réseaux de neurones, etc.) peuvent apporter une contribution décisive : optimisation du calage des paramètres d'une loi de comportement, génération d'un modèle simplifié par apprentissage sur une base de résultats expérimentaux ou de simulations de références sont autant de pistes d'avenir.

Les chapitres qui suivent fournissent un panorama, forcément partiel, mais visant à couvrir la plupart des domaines d'intérêt et à illustrer quelques grands sujets de R&D en mécanique récemment portés par le CEA et la filière nucléaire.

## Objet de la monographie

La mécanique des structures englobe des applications diverses, des physiques complexes et couplées. Si la mécanique des structures est une thématique scientifique transverse, les articles de cette monographie sont consacrés à son application dans le monde du nucléaire et tout particulièrement celui des réacteurs. Cette monographie présente dans une première partie les fondements de la mécanique des structures, méthodes numériques, lois de comportement, outils expérimentaux et de simulation. Les deux parties suivantes abordent les méthodes développées spécifiquement pour étudier le comportement des structures mécaniques au sein des réacteurs nucléaires en réponse aux très nombreuses sollicitations (notamment thermiques, hydrauliques, hydriques, magnétiques...). La section 4 se consacre aux implications des travaux présentés sur la démarche de codification, et sa mise en œuvre dans le cadre de deux exemples de travaux de conception de projets nucléaires. La section cinq de cette monographie présente de manière transverse un état des lieux des travaux en cours sur les méthodologies numériques et expérimentales permettant d'aller plus loin dans l'étude et l'amélioration du comportement mécanique des structures du parc nucléaire existant, d'une part, et de participer au développement des nouveaux réacteurs, d'autre part.

La monographie s'achève sur la valorisation des compétences acquises par la DES dans le cadre des réacteurs nucléaires, dans le domaine des nouvelles technologies de l'énergie en lien avec la mise en place de stratégies de décarbonation des usages domestiques et industriels.

**Serge PASCAL,**

*Département de Recherche sur les Matériaux  
et la Physico-chimie pour les énergies bas carbone*

**Pierre VERPEAUX, Ludovic JASON,**

*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*

**et Thomas LAPORTE,**

*Direction des Programmes Énergies*

### ► Références

[1] HAMMOURABI, *La loi de Hammourabi*, vers 2000 avant J.-C., [https://fr.wikisource.org/wiki/Page:La\\_Loi\\_de\\_Hammourabi.djvu/68](https://fr.wikisource.org/wiki/Page:La_Loi_de_Hammourabi.djvu/68).

[2] J. LEMAITRE et J.-L. CHABOCHE, *Mécanique des matériaux solides*, Bordas, 1988.

[3] G. L. HOLLINGER and J. L. HECHMER, "Three-Dimensional Stress Criteria – A Weak Link in Vessel Design and Analysis", *ASME PVP*, vol. 109, pp. 9-14, 1986.

## La mécanique des structures – les outils de la modélisation

**C**omme évoqué dans l'introduction générale, la mécanique des structures, comme la majorité des disciplines scientifiques, repose sur l'utilisation de trois piliers principaux : la modélisation (associée à la compréhension des phénomènes physiques en jeu et à leur traduction sous forme de relations mathématiques, comme celle entre la contrainte et la déformation), la simulation (visant notamment à prédire un comportement structurel au-delà des domaines expérimentés naturellement limités) et l'expérimentation (alimentant à la fois la compréhension des phénomènes physiques et servant de validation à la simulation). Ce sont ces trois piliers, dans le cadre particulier de la mécanique des structures, qui seront présentés dans les premières pages de cette section. Le premier chapitre abordera la méthode des éléments finis qui s'est largement imposée au fil du temps pour passer d'un traitement analytique des équations de la mécanique des structures à leur traitement informatique. Le deuxième chapitre abordera les lois de comportement (modélisation), élément incontournable de tout modèle de simulation. Le troisième chapitre traitera enfin de l'expérimentation pour la compréhension des phénomènes physiques, mais également en tant qu'outil de validation de la simulation.

Le traitement des incertitudes, inhérent à la mécanique des structures, quelles que soient leurs origines (matériaux, chargement, conditions aux limites), sera discuté dans le quatrième chapitre. Le cinquième chapitre s'intéressera quant à lui au concept de jumeaux numériques, en tant que représentation fidèle d'un système complexe, permettant de l'appréhender sous ses différents aspects (conception, cycle de vie, évolutions, formation...). Il constitue un agrégateur des connaissances de modélisation, simulation et expérimentation sur un même objet.





# La méthode des éléments finis en mécanique des structures

## Introduction

L'objet de ce chapitre est de présenter les étapes de passage d'un traitement analytique des équations de la mécanique des structures à leur traitement informatique, en particulier via la méthode des éléments finis, qui s'est largement imposée au fil du temps. Nous rappelons tout d'abord les équations de la mécanique des structures et détaillons leur formulation par la méthode des éléments finis en abordant, brièvement, les problèmes posés par leur résolution. La partie suivante a pour objet de survoler le foisonnement de solutions dérivées de cette méthode pour traiter la grande variété de problèmes rencontrés en mécanique des structures, qui constituent aujourd'hui la « technologie des éléments finis ». Enfin, la dernière partie propose un état des lieux synthétique des codes de calcul de structures dans l'industrie nucléaire et au-delà. Concernant les aspects théoriques, le lecteur intéressé pourra avantageusement consulter quelques ouvrages de référence du domaine comme, entre autres, [1] [2].

## Équations de la mécanique des structures

### Forme locale de l'équation du mouvement d'un milieu matériel

L'équation qui gouverne le déplacement des points d'un milieu matériel est une application de la loi fondamentale de la dynamique où le tenseur des contraintes décrit les efforts au sein de la matière. En l'absence de couple volumique, ce qui est le cas usuel en mécanique des structures, ce tenseur est symétrique et l'équation de conservation du moment cinétique est alors naturellement vérifiée.

Dans ce cadre, le déplacement  $u$  des points d'un domaine matériel  $\Omega$  en mouvement dans un repère galiléen est régi par l'équation suivante :

$$\rho \ddot{u} = \text{div}(\sigma) + f, \tag{1}$$

avec :

- $\rho$  : la masse volumique ;
- $\ddot{u}$  : l'accélération, dérivée seconde des déplacements par rapport au temps ;
- $\sigma$  : le tenseur des contraintes ;
- $f$  : la densité volumique d'efforts.

Pour déterminer un déplacement solution de cette équation, il faut en outre préciser :

- Les conditions initiales et aux limites du problème ;
- la loi de comportement du milieu matériel, qui lie les déplacements aux contraintes, via les déformations.

### Formulation variationnelle de l'équation du mouvement

En multipliant chaque terme de l'équation (1) par un champ de déplacement virtuel  $\delta u$ , puis en les intégrant sur le domaine matériel dans sa configuration courante  $\Omega_u$ , nous obtenons la formulation variationnelle suivante :

$$\int_{\Omega_u} \delta u \cdot \rho \ddot{u} d\Omega - \int_{\Omega_u} \delta u \cdot \text{div}(\sigma) d\Omega - \int_{\Omega_u} \delta u \cdot f d\Omega = 0.$$

Cette équation est équivalente à la forme locale précédente si elle est vérifiée pour tout champ de déplacement virtuel  $\delta u$  non nul.

Après intégration par partie du terme en  $\sigma$ , on obtient :

$$\underbrace{\int_{\Omega_u} \delta u \cdot \rho \ddot{u} d\Omega}_{\delta W_\gamma} = - \underbrace{\int_{\Omega_u} \delta \varepsilon : \sigma d\Omega}_{\delta W_i} + \underbrace{\int_{\Gamma_u^u} \delta u \cdot \sigma \cdot n d\Gamma + \int_{\Gamma_u^s} \delta u \cdot T d\Gamma}_{\delta W_s} + \underbrace{\int_{\Omega_u} \delta u \cdot f d\Omega}_{\delta W_v}, \tag{2}$$

Cette expression fait apparaître des conditions aux bords  $\Gamma_u^u$  et  $\Gamma_u^s$  du domaine  $\Omega$ , où sont imposés, respectivement, des déplacements et des efforts. Sur  $\Gamma_u^s$ , le terme  $\sigma$  a été remplacé par le « vecteur contrainte »<sup>1</sup>  $T$  imposé. Enfin,  $\delta \varepsilon$  est la déformation associée au champ de déplacement virtuel  $\delta u$ .

On retrouve ainsi le bilan énergétique du principe des travaux virtuels, chacune de ces intégrales ayant le sens suivant :

- $\delta W_\gamma$  : travail des quantités d'accélération ;
- $\delta W_i$  : travail des efforts intérieurs ;
- $\delta W_s$  : travail des efforts surfaciques ;
- $\delta W_v$  : travail des efforts volumiques.

1.  $T = \sigma \cdot n$ , est une densité surfacique d'efforts. La dénomination « vecteur contrainte » est usuelle.

## Non-linéarités

Différentes non-linéarités affectent le comportement mécanique d'une structure. Cela transparaît dans l'équation bilan (2) où chaque intégrale dépend du déplacement solution *via*  $\Omega_u$ . Le problème à résoudre est fondamentalement non linéaire.

On peut distinguer quatre types de non-linéarités :

- Les non-linéarités « géométriques », dues aux contraintes qui modifient la raideur de la structure (raideur géométrique) et aux quantités mises en jeu qui dépendent du déplacement solution (inerties, orientation des surfaces pour les forces de pression...);
- les non-linéarités « matérielles » : dues à la non-linéarité de la relation contrainte-déformation ;
- les non-linéarités de « conditions aux limites » : contact, frottement ou fissuration qui, en modifiant la frontière du milieu, en modifie ses conditions aux limites ;
- les non-linéarités « externes » : dues au couplage de la mécanique à d'autres problèmes physiques, dont les solutions dépendent elles-mêmes de la mécanique.

## Méthode des éléments finis en mécanique des structures

### Introduction

Bien qu'il existe bien d'autres méthodes, la méthode des éléments finis s'est largement imposée en mécanique des structures pour discrétiser en espace et résoudre numériquement l'équation du mouvement d'un milieu matériel. L'objet de cette partie est de rappeler les fondements de cette méthode qui repose tout d'abord sur la construction d'un maillage de la structure considérée. Dans un deuxième temps, la formulation « éléments finis » des équations du mouvement et de la statique à partir de la discrétisation des champs de déplacements est présentée. Après un bref rappel sur l'intégration numérique dans les éléments finis, il est ensuite proposé une présentation synthétique de la formulation des lois de comportement des matériaux. La « recherche de l'équilibre » avec un schéma standard de résolution par minimisation du résidu est ensuite discutée, en insistant sur sa convergence en fonction de différents types de non-linéarités qui illustre quelques difficultés qui peuvent être rencontrées en calcul de structures. Cette partie s'achève sur une présentation de la méthode des multiplicateurs de Lagrange pour le traitement de conditions imposées sur les inconnues d'un système linéaire.

## Maillage

La méthode des éléments finis s'appuie sur un « maillage » du domaine matériel. Ce maillage est constitué d'éléments finis, qui forment une partition du domaine. Afin de pouvoir le paver au mieux, il existe différentes géométries d'éléments, notamment : triangle et quadrangle en deux dimensions ; tétraèdre, prisme, hexaèdre et pyramide en trois dimensions. La réalisation du maillage est une étape importante du processus de modélisation par éléments finis, souvent contraignante et parfois même limitante.

Pour « mailler » une pièce (voir fig. 10), on peut utiliser un logiciel spécialisé, généralement couplé à un logiciel de CAO<sup>2</sup>. Toutefois, la géométrie modélisée est rarement une simple discrétisation de la géométrie réelle. Il s'agit souvent

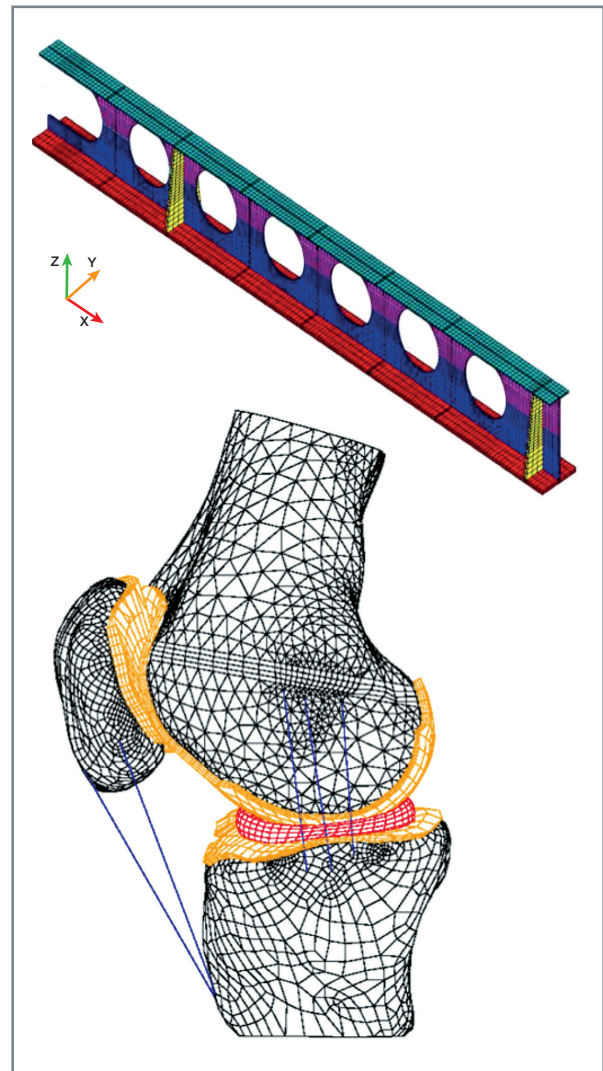


Fig. 10. Maillages d'une poutrelle (en haut) et de l'articulation d'un genou (en bas), d'après [4] et [5], respectivement.

2. CAO : conception assistée par ordinateur, logiciel de dessin-conception en 3D.

d'une géométrie simplifiée, qui néglige certains détails du dessin, quand elle ne le représente pas de façon très simplifiée (éléments poutres ou coques). Il peut également être intéressant de paramétrer la réalisation du maillage et que ces paramètres fassent partie du calcul. Pour tout cela, les logiciels de calcul de structures possèdent généralement leur propre « mailler ».

## Formulation « éléments finis » de l'équation du mouvement

### Discrétisation des déplacements

Le principe de la méthode est de discrétiser les champs de déplacement aux nœuds du maillage, puis d'injecter cette discrétisation dans l'expression de l'équation de conservation de la quantité de mouvement (2). Il est fait le choix d'exprimer les champs de déplacement  $u$  et  $\delta u$  de cette équation de la façon suivante :

$$u(x, t) = \sum_e \sum_{i=1}^{n_e} U_i(t) N_i^e(x),$$

$$\delta u(x, t) = \sum_e \sum_{i=1}^{n_e} \delta U_i(t) N_i^e(x),$$

où  $U_i$  et  $\delta U_i$  sont les valeurs des champs au nœud  $i$  du maillage à l'instant  $t$ , et où  $N_i^e(x)$  est la fonction d'interpolation de l'élément  $e$  du maillage associée au nœud  $i$ .

La solution du problème est donc recherchée dans l'espace défini par les fonctions  $N_i^e(x)$  du maillage. En mécanique des structures, il est classiquement utilisé des fonctions linéaires ou quadratiques. À noter que, si la solution réelle ne fait pas partie de l'espace de fonctions choisi, la solution numérique obtenue par cette méthode ne peut que l'approcher. L'analyse de la convergence de la solution lorsqu'on « raffine » le maillage permet d'apprécier la qualité de la discrétisation et celle de la solution.

### Conservation de la quantité de mouvement

En injectant ces expressions dans l'équation bilan (2), nous obtenons :

$$\delta U_{i.} \underbrace{\sum_e \int_{\Omega_u^e} N_i^e \cdot \rho N_j^e d\Omega}_{M_{ij}} \ddot{U}_j = - \delta U_{i.} \underbrace{\sum_e \int_{\Omega_u^e} \nabla N_i^e : \sigma d\Omega}_{B_{\sigma, \sigma}} + \delta U_{i.} \underbrace{\sum_e \int_{\Gamma_u^{e,u}} N_i^e \cdot \sigma \cdot n d\Gamma}_{F_R} + \delta U_{i.} \underbrace{\sum_e \int_{\Gamma_u^{e,\sigma}} N_i^e \cdot T d\Gamma}_{F_T} + \delta U_{i.} \underbrace{\sum_e \int_{\Omega_u^e} N_i^e \cdot f d\Omega}_{F_V}$$

Cette équation étant vraie pour tout  $\delta U_{i.}$ , l'expression se simplifie. On obtient ainsi la formulation « éléments finis » de l'équation de conservation de la quantité de mouvement, qui s'exprime comme :

$$M \cdot \ddot{U} = \underbrace{F_R + F_T + F_V}_{F_E} - B_{\sigma, \sigma}, \quad (4)$$

avec :

- $\ddot{U}$  : accélérations aux nœuds du maillage ;
- $M$  : matrice masse ;
- $F_R$  : force nodale équivalente aux efforts de réaction aux déplacements imposés ;
- $F_T$  : force nodale équivalente aux efforts surfaciques imposés ;
- $F_V$  : force nodale équivalente aux efforts volumiques imposés ;
- $F_E$  : force nodale équivalente aux efforts extérieurs appliqués au système ;
- $B_{\sigma, \sigma}$  : force nodale équivalente aux efforts intérieurs, résulte de l'intégration du champ de contrainte par l'opérateur  $B_{\sigma}$ .

Notez qu'à l'exception de  $\ddot{U}$  et de  $\sigma$ , tous les termes de cette équation résultent d'une intégration dans chaque élément du maillage *dans sa configuration déformée*. Ces termes dépendent donc tous de la solution.

### Équilibre statique

Si l'on néglige les effets dynamiques, l'équation (4) se simplifie pour donner la formulation « éléments finis » de l'équation de la statique :

$$F_E - B_{\sigma, \sigma} = 0$$

En pratique, cet équilibre n'est vérifié, au mieux, qu'à la précision numérique près. Si l'on note  $R(u)$  le résidu qui mesure le déséquilibre des efforts :

$$R(u) = F_E - B_{\sigma, \sigma},$$

la recherche de l'équilibre vise alors à minimiser ce résidu. Cette notion de déséquilibre et de résidu s'applique également à l'équation de la dynamique (4), le terme  $M \cdot \ddot{U}$  étant la force d'inertie.

## Intégration numérique

L'intégration sur l'élément fini des différents termes de l'équation du mouvement (4) est réalisée à l'aide de formules de quadrature. Ces formules garantissent que l'intégration

$$M = \sum_e \int_{\Omega_u^e} N_i^e \cdot \rho N_j^e d\Omega = \sum_e \int_{\Omega_{ref}^e} \hat{N}_i^e \cdot \rho \hat{N}_j^e det \mathbf{J} d\Omega_{ref} \approx \sum_e \sum_p w_p^e \hat{N}_i^e(x_p^e) \rho(x_p^e) \hat{N}_j^e(x_p^e) det \mathbf{J}$$

où l'on a préalablement remplacé l'intégration sur l'élément  $\Omega_u^e$  dans la configuration du champ de déplacement courant en une intégration sur l'élément de référence  $\Omega_{ref}^e$  par changement de variables. Dans cette expression, on identifie :

- $\mathbf{J}$  : matrice jacobienne de la transformation et  $det \mathbf{J}$ , son déterminant ;
- $w_p^e$  : poids d'intégration au point d'intégration  $p$  de l'élément  $e$  ;
- $\rho(x_p^e)$  : valeur de la masse volumique au point d'intégration  $p$  de l'élément  $e$ .

L'ordre d'intégration dépend de la méthode, notamment du nombre de points d'intégration et de leur position. L'ordre d'intégration des éléments finis usuellement utilisés en mécanique des structures est tel que les fonctions d'interpolation  $N^e(x)$  de l'élément sont intégrées exactement. Avec les fonctions d'interpolation, la méthode d'intégration fait partie de la définition de l'élément fini.

## Loi de comportement

### Principe

Lorsqu'un matériau solide se déforme, cette déformation peut s'accompagner de phénomènes irréversibles<sup>3</sup>. Dans le cadre d'une formulation thermodynamique, ces phénomènes sont représentés par des variables internes, dont font partie les déformations inélastiques. La loi de comportement définit l'évolution de ces variables internes, ainsi que la relation contraintes-déformations, ces dernières dérivant des déplacements. L'état d'un matériau et son comportement dépendent donc de son histoire. Par conséquent, il n'est pas possible de résoudre séparément dans le temps les équations de la mécanique des structures, car cela romprait le principe de causalité sous-jacent à cet « effet d'histoire ».

3. Du moins, du point de vue de la sollicitation qui en est à l'origine. En effet, un matériau écroui mécaniquement peut être restauré par traitement thermique. Si l'écrouissage est un phénomène irréversible du point de vue mécanique, il ne l'est pas du point de vue thermique.

d'un polynôme est exacte jusqu'à un certain ordre, ce qui définit l'ordre d'intégration. Par exemple, l'intégration de la matrice masse est ainsi remplacée par la sommation suivante :

### Formulation générale

Dans le cas général, la loi de comportement fait donc intervenir des variables internes, ainsi que d'autres variables du problème, externes, comme la température. Elle peut s'écrire sous la forme assez générale suivante :

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathcal{L}(\boldsymbol{\varepsilon}(u), \boldsymbol{\varepsilon}^{in}, V^i, T, \dots),$$

$\boldsymbol{\sigma}$  étant la contrainte,  $\boldsymbol{\varepsilon}$ , la déformation,  $\boldsymbol{\varepsilon}^{in}$ , les déformations inélastiques,  $V^i$ , les variables internes et  $T$ , la température.

### Loi de l'élasticité

En mécanique des structures, on suppose que la loi de comportement vérifie la loi de l'élasticité :

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathcal{C}(\boldsymbol{\varepsilon}(u) - \boldsymbol{\varepsilon}^{in}(\boldsymbol{\sigma}, V^i, T, \dots)),$$

$\mathcal{C}$  étant le tenseur d'élasticité.

L'expression de la déformation en fonction du déplacement permet alors de relier les contraintes aux déplacements. « L'hypothèse des petites perturbations » (HPP) offre une approximation linéaire. Celle-ci n'est toutefois pas une mesure de déformation au sens strict puisqu'elle n'est pas nulle pour un mouvement de rotation pure, sans déformation du milieu. Elle est définie par :

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{hpp} = \nabla^s u = \frac{1}{2} (\nabla u + \nabla^t u).$$

### Lois d'évolution des variables internes

Les lois d'évolution des variables internes sont généralement écrites sous forme incrémentale, car elles sont liées à des phénomènes dissipatifs. Soit  $f$  le potentiel de dissipation, on a alors, typiquement :

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{in} = \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \dot{\boldsymbol{\sigma}},$$

$$\dot{V}^i = \frac{\partial f}{\partial A^i} \dot{A}^i.$$

où  $A^i$  est la variable thermodynamique duale de  $V^i$ .

« L'intégration du comportement » consiste à résoudre ce système d'équations différentielles, qui complète la loi de l'élasticité. Bien d'autres formes sont possibles ; cet exemple n'a pas valeur de généralité. Pour une présentation générale de la formulation des lois de comportement en mécanique des matériaux solides, nous ne pouvons que recommander la référence [3] « Lemaitre et Chaboche ».

## Recherche de l'équilibre

### Étape de correction

Supposons que, pour un champ de déplacement  $u$  donné, la structure soit en déséquilibre. Nous cherchons une correction  $\delta u$  qui puisse l'équilibrer. En se plaçant dans le cadre HPP, nous pouvons estimer la contrainte associée au déplacement final  $(u + \delta u)$  par la loi de l'élasticité :

$$\begin{aligned}\sigma(u + \delta u) &\simeq C : (\varepsilon^{hvp}(u) + \varepsilon^{hvp}(\delta u) - \varepsilon^{in}(u)) \\ &= \sigma(u) + C : (\nabla^s \delta u).\end{aligned}$$

L'intégration des contraintes par l'opérateur  $B_\sigma$  donne alors :

$$\begin{aligned}\sum_e \int_{\Omega_u^e} \nabla N_i^e : \sigma(u + \delta u) d\Omega &= \sum_e \int_{\Omega_u^e} \nabla N_i^e : \sigma(u) d\Omega \\ &+ \sum_e \int_{\Omega_u^e} \nabla N_i^e : C : \nabla^s (\delta u_j N_j^e) d\Omega,\end{aligned}$$

$$B_\sigma(u) \cdot \sigma(u + \delta u) = B_\sigma(u) \cdot \sigma(u) + \underbrace{\sum_e \int_{\Omega_u^e} \nabla N_i^e : C : \nabla^s N_j^e d\Omega}_{K_{ij}^{el}(u)} \cdot \delta U_j,$$

$$B_\sigma(u) \cdot \sigma(u + \delta u) = B_\sigma(u) \cdot \sigma(u) + K^{el}(u) \cdot \delta U,$$

où l'on distingue le champ de déplacement  $\delta u$  du vecteur d'inconnues nodales  $\delta U$ . Nous précisons que les intégrales sont évaluées dans la configuration associée au champ de déplacement  $u$ .

Cette expression fait apparaître la raideur élastique de la structure  $K^{el}$ .

En injectant cette expression dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement (4) et après réarrangement des termes, nous obtenons :

$$M \cdot \delta \ddot{U} + K^{el} \cdot \delta U = F_E - B_\sigma \cdot \sigma - M \cdot \ddot{U} = R(u).$$

L'intégration temporelle de cette équation différentielle conduit à un système linéaire composé des matrices  $M$  et  $K^{el}$ , dont la résolution permet d'obtenir  $\delta U$ .

## Étape d'estimation et convergence

Étant donné le nouveau champ de déplacement  $(u + \delta u)$ , l'intégration du comportement permet de calculer les contraintes et variables internes associées. Le résidu est ensuite réévalué dans la nouvelle configuration ainsi définie.

Dans le cas d'une résolution selon un schéma implicite, ce processus de correction-estimation est itéré jusqu'à « convergence », c'est-à-dire jusqu'à ce que, par exemple, une norme du résidu soit inférieure à une précision donnée.

## Convergence

Lorsque le comportement du matériau est non linéaire, mais que sa relation contrainte-déformation est monotone croissante, comme pour la plasticité ou le fluage, ce schéma de résolution converge, bien que sa convergence puisse être lente.

Lorsque le comportement du matériau est non linéaire adoucissant (relation contrainte-déformation décroissante au-delà d'un seuil), comme pour l'endommagement, ou que les autres non-linéarités amènent le système à un seuil d'instabilité (voir fig. 11), ce schéma ne converge plus. Cela correspond à une situation où la réponse globale de la structure

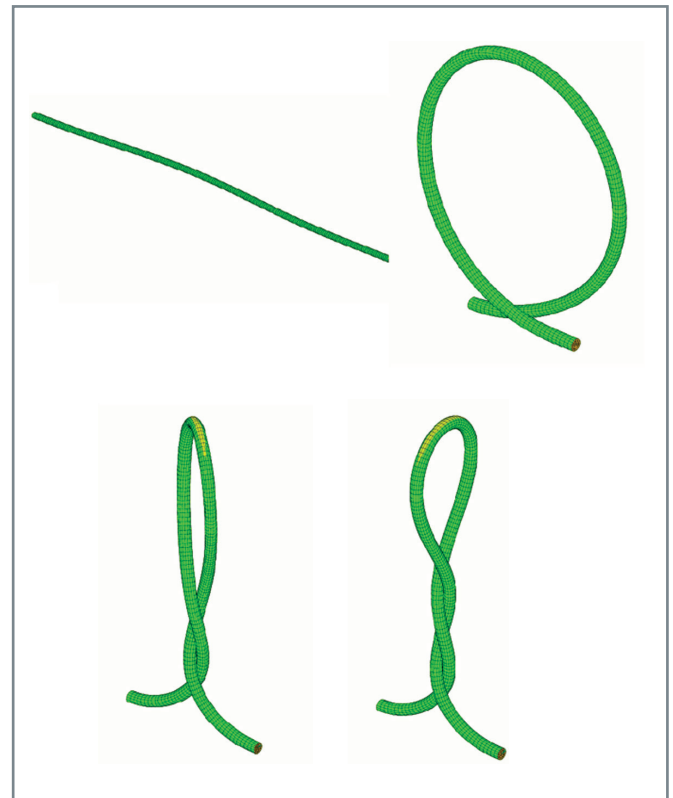


Fig. 11. Exemple d'instabilité : flambement d'une corde élastique en torsion (point limite) et stabilisation physique par auto-contact. Résolution dans Cast3M selon un schéma implicite via une méthode originale de traitement de la non-convergence [7].



atteint un point limite (charge ultime) ou un point de bifurcation entre plusieurs solutions. Il faut alors en adopter un autre. Le choix se porte alors souvent sur un **schéma explicite\***, qui évite d'avoir à vérifier strictement l'équilibre, ou sur des stratégies de pilotage ou de stabilisation numérique.

### Sur la discrétisation en temps des phénomènes

Lorsque les effets d'inertie ne sont pas négligeables, le problème est dit **dynamique** (par opposition aux problèmes dits **quasi statiques**). La résolution de l'équation discrétisée par éléments finis  $M \ddot{U} + B_{\sigma} \sigma = F_E$  qui peut s'écrire également  $M \ddot{U} + F^{int}(\sigma) = F^{ext}$  nécessite alors un traitement particulier. Une manière pragmatique de traiter ce type de problème consiste à calculer pas à pas l'évolution avec le temps des quantités d'intérêt ( $(u, \sigma)$  par exemple) à partir de conditions initiales  $(u, \sigma)|_{t=0}$ . On introduit naturellement une discrétisation temporelle du problème. Les **algorithmes d'intégration temporelle** visent ainsi à permettre le calcul des quantités d'intérêt au temps  $t_{n+1}$  à partir de l'état à un (ou plusieurs) instant(s) précédent(s).

À partir d'un développement de Taylor et négligeant les dérivées d'ordre 3, on retrouve les formules de récurrence des schémas de Newmark qui établissent des relations entre les déplacements, vitesses et accélération entre deux pas de temps :

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t \dot{u}_n + \Delta t^2 \left( \frac{1}{2} - \beta \right) \ddot{u}_n + \Delta t^2 \beta \ddot{u}_{n+1}$$

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \Delta t(1 - \gamma) \ddot{u}_n + \Delta t \gamma \ddot{u}_{n+1}$$

Ajoutées à l'équation d'équilibre, ces relations permettent de construire les algorithmes d'intégration temporelle. Les schémas implicites de l'accélération moyenne et explicite des différences centrées utilisent respectivement les paramètres  $(\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{4})$  et  $(\gamma = \frac{1}{2}, \beta = 0)$ . Il s'agit des schémas les plus courants en mécanique des structures, et leur implémentation respective en l'absence d'amortissement est rappelée ci-après.

#### Algorithme implicite de l'accélération moyenne

On cherche à annuler le résidu d'équilibre :

$$R_{n+1} = M \ddot{u}_{n+1} + F^{int}(\sigma_{n+1}) - F_{n+1}^{ext} \\ = \left[ \frac{4}{\Delta t^2} M \right] (u_{n+1} - u_n) + F^{int}(\sigma_{n+1}) - F_{n+1}^{ext} - M \left( \frac{4}{\Delta t} \dot{u}_n + \ddot{u}_n \right)$$

ce qui est un problème non linéaire implicite à résoudre puisque les forces dépendent non linéairement du déplacement. Une fois le problème convergé, il ne reste qu'à mettre à jour les quantités :

$$\ddot{u}_{n+1} = \frac{4}{\Delta t^2} (u_{n+1} - u_n) - \frac{4}{\Delta t} \dot{u}_n - \ddot{u}_n$$

$$\ddot{u}_{n+1} = \frac{2}{\Delta t} (u_{n+1} - u_n) - \dot{u}_n$$

et à passer au pas de temps suivant. Le schéma de l'accélération moyenne conduit à un problème non linéaire implicite à résoudre à chaque pas de temps. Cela est formellement identique aux problèmes quasi statiques.

#### Algorithme explicite des différences centrées

Le déplacement est explicitement connu à partir des quantités au pas précédent :

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t \dot{u}_n + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_n$$

Ainsi, l'équation d'équilibre se résume à :

$$M \ddot{u}_{n+1} = F_{n+1}^{ext} - F^{int}(\sigma_{n+1})$$

qui peut être résolue simplement sous l'hypothèse de masse diagonale.

La vitesse peut également être calculée *via* :

$$\dot{u}_{n+1} = \dot{u}_n + \frac{\Delta t}{2} (\ddot{u}_{n+1} + \ddot{u}_n)$$

Le schéma des différences centrées est un schéma **explicite**, dans le sens où le déplacement est une fonction explicite des autres quantités cinématiques à l'instant précédent. Approximant la matrice de masse par sa forme diagonale et la vitesse par sa valeur au demi-pas de temps (lorsqu'elle est nécessaire pour le calcul des efforts au second membre), il n'y a plus de système à inverser, ni de problème non linéaire à résoudre. Cela rend cette approche très attractive. Cependant, les schémas explicites sont conditionnellement stables et le pas de temps utilisé doit respecter une condition dépendant du schéma et du modèle physique discrétisé. Dans le cas des différences centrées, elle s'écrit comme :

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_h}$$

où intervient  $\omega_h$  la plus grande fréquence propre du système discrétisé, grandeur proportionnelle à la vitesse des ondes dans le matériau et inversement proportionnelle à la taille de maille.

Ces observations faites, on comprend que les schémas explicites sont adaptés aux phénomènes de courte durée (impacts, explosion...), et que les non-linéarités, même très complexes, ne posent généralement pas de problème. À l'inverse, les schémas implicites permettent de traiter toutes les durées caractéristiques de phénomène, mais chaque pas de temps calculé aura un coût bien supérieur à celui d'un schéma explicite. Ils sont donc utilisés pour des pro-



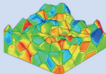
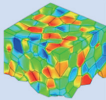
## Focus Cast3M : l'outil de simulation de référence en mécanique des structures du CEA

Le code de calcul aux éléments finis Cast3M (<http://www-cast3m.cea.fr>) matérialise le savoir-faire du Service d'Études Mécaniques et Thermiques du CEA dans le domaine du développement logiciel. Initié dans les années 1980, Cast3M se compose d'un noyau d'opérateurs fonctionnels (maillage, modèles de comportement, solveurs, post-traitement/visualisation et manipulation d'objets) écrits en langage Fortran. Cet ensemble est manipulable via un langage de commande interprété, le Gibiane, qui permet en toute souplesse, dans un esprit « boîte à outils », la construction de schémas de calcul à des fins applicatives. La figure ci-dessous synthétise les capacités de modélisation du logiciel Cast3M, où l'on voit en particulier le caractère multi-physique de l'outil. On qualifiera Cast3M de logiciel ouvert (par opposition aux logiciels de type boîte noire) dans la mesure où il permet à tout un chacun de construire ses propres solutions pour la réalisation d'un large panel d'activités : développements méthodologiques, définition d'outils métiers (spécialisation thématique, traitement d'un objet technologique spécifique sous sollicitation spécifique), actions d'expertise.

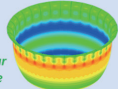
### Modélisation : grande variété de phénomènes physiques & couplage multi-physique

- Mécanique
  - Quasi-statique / dynamique
  - Contact / frottement
  - Flambage / ruine des structures
  - Rupture
  - Couplages forts natifs (thermomécanique, ...)
- Thermique
  - Stationnaire / transitoire
  - Conduction, advection, convection, rayonnement
- Diffusion multi-espèces (loi de Fick)
- Mécanique des fluides
  - Navier-Stokes
  - Darcy
- Magnéto-statique

Contraintes dans un agrégat polycristallin



Fissuration d'un godet par corrosion sous contrainte



### Applications Industrielles : expertise, Outils de Calcul Scientifiques métiers et briques logicielles

- Expertise
    - Génie Civil
    - Géo-matériaux
    - Séismes
  - Outils de Calcul Scientifiques métiers
    - Conception et démonstration de sûreté
    - Simulation multi-physique pour les réacteurs de 3<sup>ème</sup> et 4<sup>ème</sup> générations
  - brique logicielle
    - Plateforme PLEIADES (combustible nucléaire)
    - Plateforme TACTICS (supraconducteur)
- Mécanique: HARMONIE2, DOMAIEUR2, CAScad3M (déformation de structures)  
 Thermo-mécanique: ESUS, ATOL-tmg (défense)  
 IFS: BASILIQ, PANDA  
 Thermo-métallurgie: WPROCESS (soudage)  
 Thermo-hydraulique: TONUS, NAUTILUS (risque hydrogène)
- Cast3M**  
<http://www-cast3m.cea.fr/>

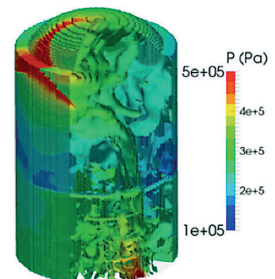
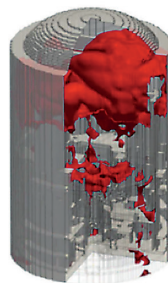
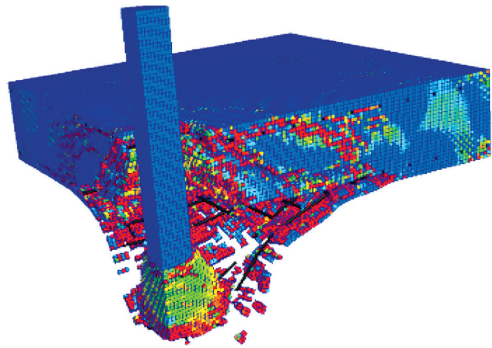


Fissuration dans une enceinte en béton armé et précontraint

Fig. 12. Cast3M. Exemples de phénomènes physiques simulés (en haut) et d'applications industrielles (en bas) [6].

## Focus EUROPLEXUS

EUROPLEXUS est un logiciel général dédié à la dynamique rapide qui permet de traiter des problèmes comprenant des structures et/ou des fluides avec prise en compte de l'éventuelle interaction fluide-structure. C'est un outil générique qui possède des modèles spécifiques permettant d'analyser des situations variées comme des chocs ou des impacts, des explosions, des propagations d'ondes et leurs conséquences sur les structures. L'algorithme d'intégration temporelle est explicite et est ainsi bien adapté aux transitoires rapides. Les algorithmes de résolution permettent de traiter des problèmes présentant des non-linéarités géométriques (grands déplacements et grandes rotations) et matérielles (plasticité, endommagement...). Enfin, le formalisme MPI (*message passing interface*, outil pour le calcul scientifique à haute performance) permet d'exécuter le programme en parallèle afin de réduire les temps de calcul. EUROPLEXUS est devenu un outil de référence pour la sûreté des installations industrielles et nucléaires. Code de calcul détenu en copropriété par le CEA (DES/ISAS/DM2S) et par la Commission européenne (*Joint Research Center*, Ispra, IPSC), ses développements sont réalisés au travers d'un consortium comprenant les deux copropriétaires du code et des partenaires majeurs (EDF, ONERA et Safran Tech). De plus en plus d'industriels s'intéressent au logiciel, parfois dans des domaines très éloignés du nucléaire. Il apporte en effet une aide précieuse pour comprendre la physique de phénomènes complexes et évaluer le comportement mécanique de structures sous chargements extrêmes.



Time: 350 ms

Fig. 13. EUROPLEXUS : exemple d'applications industrielles.

blèmes quasi statiques ou de dynamique lente (séisme par exemple). Pour répondre à ces enjeux, l'histoire a conduit le CEA à développer pour ses besoins et ceux de ses partenaires les codes de calcul Cast3M et EUROPLEXUS, respectivement implicite et explicite.

**Serge PASCAL, Stéphane GOUNAND,**

*Département de Recherche sur les Matériaux  
et la Physico-chimie pour les énergies bas carbone*

**Bertrand LETURCO, Cécile PÉTESCH,**

**Pierre VERPEAUX et Benoît PRABEL,**

*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*

## ► Références

- [1] O.C. ZIENKIEWICZ, R.T. TAYLOR and J.Z. ZHU, *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 5<sup>e</sup> édition, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [2] J.L. BATOZ et G. DHATT, *Modélisation des structures par éléments finis*, Hermès, 1990.
- [3] J. LEMAITRE et J.-L. CHABOCHE, *Mécanique des matériaux solides*, Bordas, 1988.
- [4] G. BIHINA, « Étude de poutres cellulaires mixtes à températures élevées », *Club Cast3M* 2008, GBIHINA\_Club\_CASTEM\_21\_11\_08, <http://www.cea.fr>.
- [5] M.G. ALONSO, A.A. YAWNY and G.M. BERTOLINO, "A Cast3M function to solve bone growth and remodeling problems", *Club Cast3M* 2021, [http://www-cast3m.cea.fr/html/ClubCast3m/club2021/09\\_Gaston\\_ALONSO.pdf](http://www-cast3m.cea.fr/html/ClubCast3m/club2021/09_Gaston_ALONSO.pdf).
- [6] Cast3M, <http://www-cast3mcea.fr>
- [7] P. VERPEAUX, « Calcul par éléments finis de la torsion d'une corde élastique élancée », *Club Cast3M* 2013, [http://www-cast3m.cea.fr/html/ClubCast3m/club2013/Pierre\\_VERPEAUX.pdf](http://www-cast3m.cea.fr/html/ClubCast3m/club2013/Pierre_VERPEAUX.pdf).

# Les lois de comportement

## Introduction

Comme expliqué dans le chapitre précédent la modélisation mécanique des structures nécessite des propriétés et des lois de comportement des matériaux constituant ces structures. Pour un matériau donné, nous avons vu que l'état de contrainte  $\sigma$  en un point de la structure dépend de l'état de déformation  $\varepsilon$  en ce point, mais également des déformations inélastiques  $\varepsilon^{in}$  et d'un ensemble de variables internes  $V^i$  permettant de garder en mémoire l'histoire du chargement antérieur subi par le matériau au point considéré. L'état de contrainte dépend également de la température  $T$  au point considéré.

Nous verrons dans une première section que les lois de comportement sont généralement obtenues empiriquement grâce à des expériences dédiées et normalisées. Pour les propriétés mécaniques par exemple, on a recours à des essais de traction, de fluage, de fatigue... Dans une deuxième section, nous verrons également que, progressivement et en complément de ces essais de caractérisation, la modélisation des matériaux s'invite dans l'élaboration des lois de comportement et dans la simulation du comportement des structures.

## Description et constitution des lois du point de vue des approches empiriques : essais de caractérisation

Comme il existe une grande variété de lois de comportement permettant de décrire de nombreux aspects de la réponse mécanique des matériaux à une sollicitation donnée, la première étape consiste à choisir un modèle adapté au problème à traiter. À partir du choix de la modélisation, la problématique de l'identification des paramètres se pose. Pour cela, il est nécessaire de disposer d'une base expérimentale suffisamment documentée et comportant un minimum d'essais permettant de mobiliser l'ensemble des variables du modèle utilisé lors du calcul de structure. Une certaine cohérence entre les essais de caractérisation et l'utilisation du modèle doit être respectée. Cette cohérence passe par la réali-

sation d'essais dans des conditions représentatives. Ces conditions concernent en particulier le mode de chargement (traction, torsion, triaxialité et autres combinaisons), l'histoire des chargements (ordre de succession, nombre de cycles, monotone, cyclique et autres combinaisons) et le mode de ruine (fatigue, déformation excessive, etc.).

Il n'existe pas, à l'heure actuelle de procédures normalisées largement acceptées permettant d'identifier ces paramètres, comme cela est disponible par exemple pour l'essai de traction.

Des matériaux de natures très différentes sont évoqués dans cette monographie, allant des aciers au béton en passant par les céramiques. Dans le cas de matériaux comme les aciers, des essais de traction sont nécessaires pour la caractérisation de la ductilité du matériau. L'évolution de la force appliquée à l'éprouvette en fonction de son élongation peut être divisée en deux phases comme illustré en figure 14 :

- Dans la phase stable, la section de l'échantillon diminue uniformément à mesure que la charge augmente. Dans cette phase, les systèmes de mesure conventionnels peuvent être utilisés pour la détermination de la contrainte et de la déformation ;
- dans la seconde phase, qui peut être instable selon le mode de pilotage de l'essai – également appelée « stric-

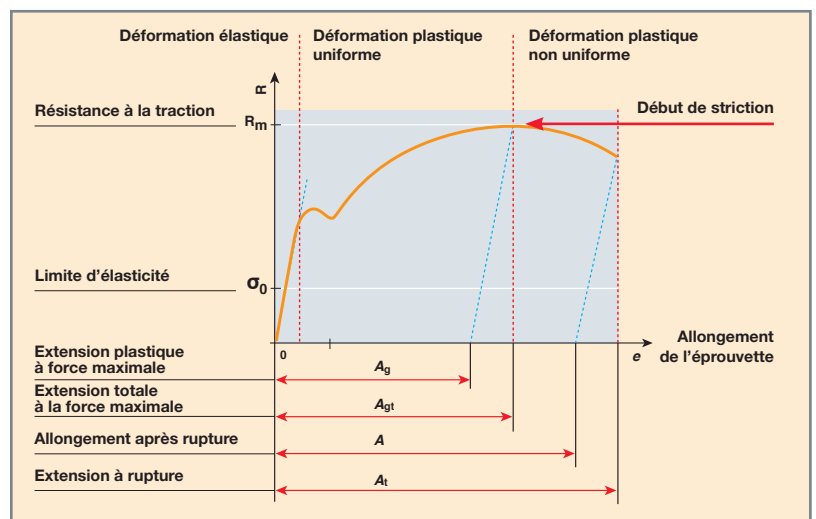


Fig. 14. Phases caractéristiques d'un essai de traction, cas des matériaux ductiles.

tion » –, la déformation n'est plus uniforme dans l'échantillon, elle se localise rapidement en combinaison avec une diminution de la charge externe et la contrainte ainsi que la déformation deviennent difficiles à déterminer avec les systèmes de mesure conventionnels.

Cependant, la seconde phase du comportement observée sur une éprouvette n'est pas le reflet du comportement d'un élément de volume « noyé » au milieu d'autres éléments qui eux se déforment moins et, de ce fait, engendrent un effet de structure. Afin de caractériser cet effet de structure dans les simulations numériques, il est nécessaire d'introduire des données matériaux dans un domaine de validité beaucoup

plus important qu'avec les moyens conventionnels. Le système nommé « IMEC » permet notamment de mesurer les courbes de traction jusqu'à des niveaux de déformation importants, comme l'illustre la figure 15. Un essai conventionnel de traction sur un acier austénitique inoxydable ne permet pas d'aller au-delà de l'apparition du phénomène de striction (autour de 10 %), alors que la mesure en ligne de ce phénomène de striction durant l'essai et sa prise en compte dans le pilotage permettent d'atteindre un domaine de validité beaucoup plus important (de l'ordre de 130 %).

Ainsi, le système IMEC, développé au Laboratoire LISN [1] et [2], permet de déterminer le comportement du matériau tout au long de l'essai de traction.

Ce système se compose de quatre parties principales :

- Un banc d'essai universel avec une traverse et une cellule de charge (cf. fig. 16) ;
- un système de mesure spécifique qui effectue des mesures de profil sur la longueur de l'échantillon pendant les essais de traction. Ce système de profilométrie se compose de deux parties (cf. fig. 17) :
  - deux micromètres optiques qui mesurent à grande vitesse et avec précision le diamètre de l'échantillon dans deux directions orthogonales,
  - une plaque de déplacement motorisée supportant les micromètres optiques et dont la position verticale est mesurée à grande vitesse et avec une grande précision ;

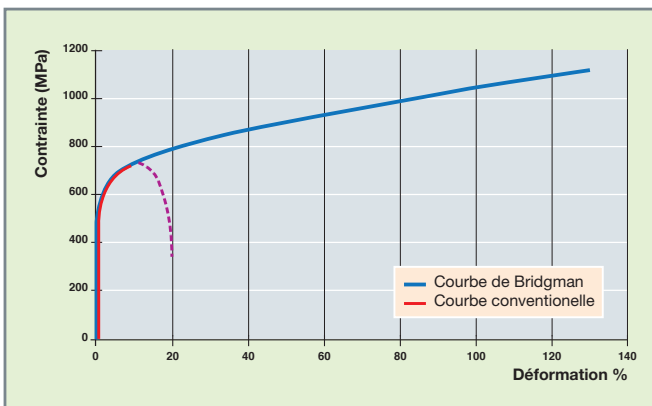


Fig. 15. Capacité d'obtention des données matériaux bien au-delà des moyens conventionnels.

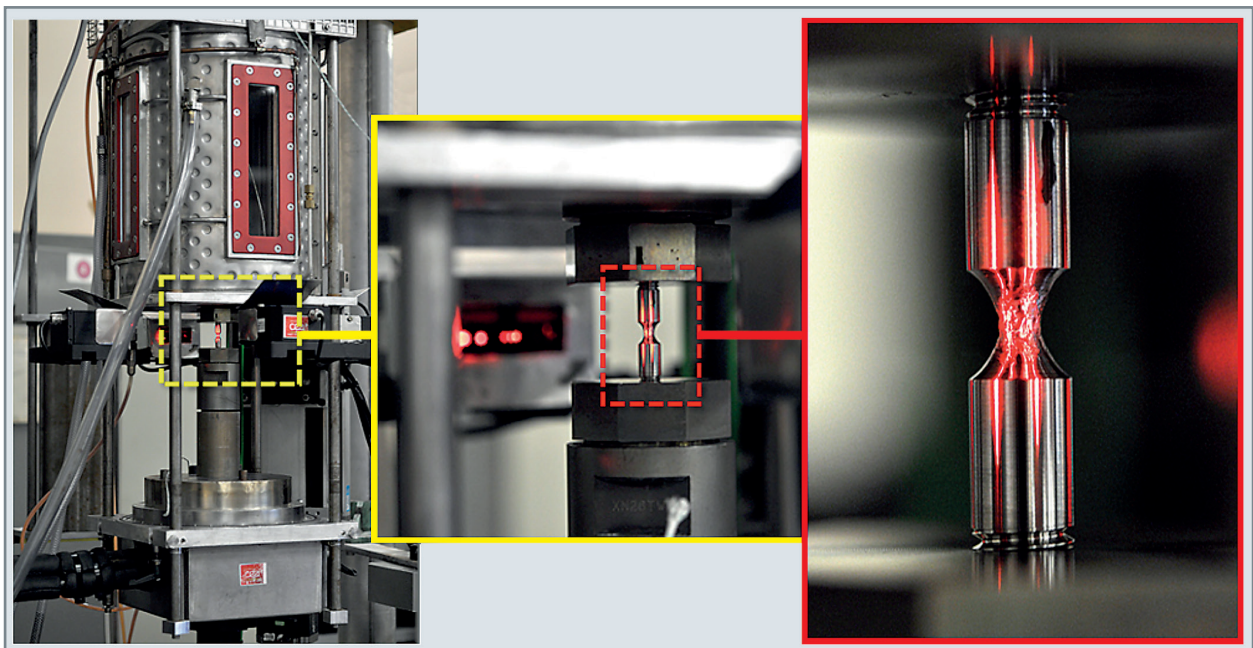


Fig. 16. Description du banc d'essai de traction IMEC, une éprouvette de traction (carré rouge), dans les amarrages (carré jaune) insérés dans le dispositif IMEC (lasers et enceinte thermique relevée).

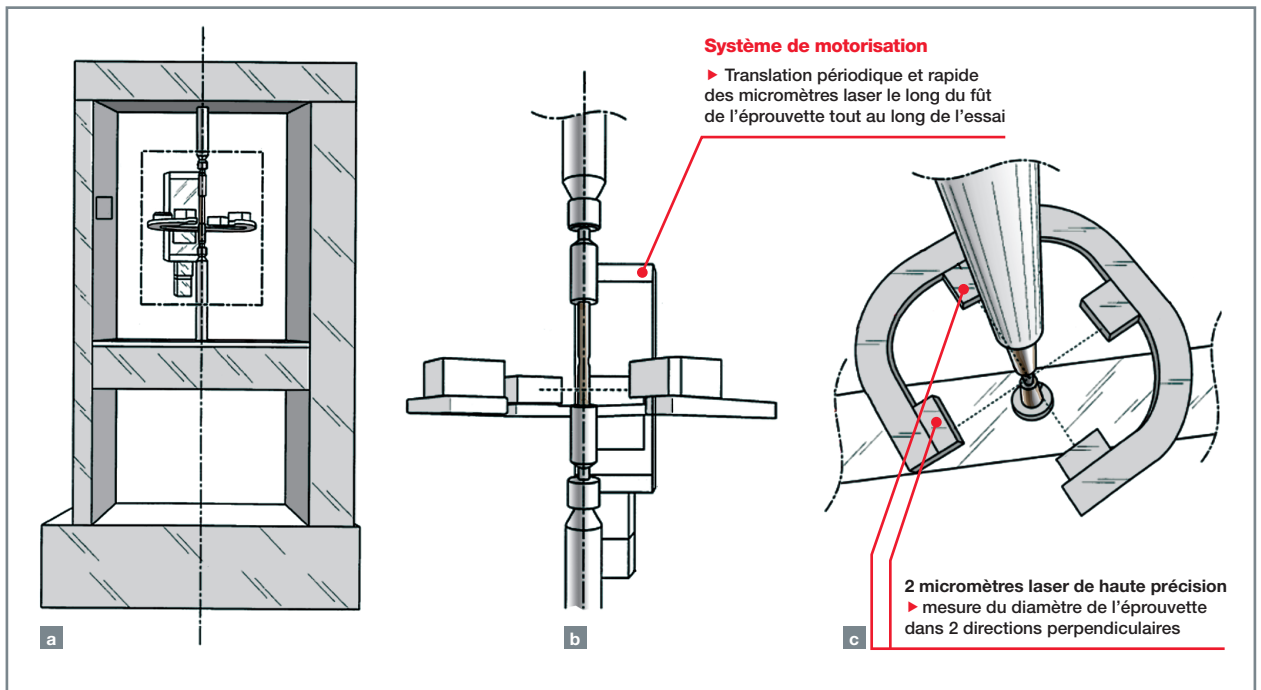


Fig. 17. Schéma de principe du système de mesure par micromètres laser.  
 a) Vue complète avec le bâti de la machine de traction.  
 b) Vue de face du système de mesure, de l'éprouvette et de la ligne d'amarrage.  
 c) Vue de dessous du système de mesure avec les deux lasers positionnés à 90°.

- des logiciels spécifiques développés au CEA/LISN afin de :
  - contrôler la traverse et déplacer périodiquement et rapidement les micromètres le long de l'axe de traction pour acquérir une profilométrie complète ou des « scans » de l'échantillon de traction ;
  - analyser les données acquises et déterminer le comportement du matériau après l'essai.

Cette méthode profilométrique permet, pour chaque balayage, de mesurer le plus petit diamètre de l'éprouvette et, lors de la phase instable, le rayon de striction (cf. fig. 18). En négligeant la déformation élastique, la déformation locale dans la zone de striction peut être calculée comme suit :

$$\epsilon = -2 \ln\left(\frac{a}{a_0}\right)$$

où  $a$  représente le rayon de l'éprouvette et  $a_0$  son rayon initial.

Lorsque la charge atteint son maximum, la phase d'instabilité commence. L'état de contrainte n'est plus uniaxial. Pour tenir compte de la multi-axialité, Bridgman [3] propose l'équation suivante pour déterminer la contrainte équivalente de von Mises au centre du collet (contrainte notée  $\sigma_{true}$  pour

« contrainte vraie » et reportée en ordonnée sur la courbe en fig. 14) :

$$\sigma_{true} = \frac{F/S}{\left(1 + \frac{2R}{a}\right) \ln\left(1 + \frac{a}{2R}\right)}$$

où  $F$  est l'effort de traction,  $R$  le rayon de courbure et  $S = \pi a^2$  la section minimale dans la zone de collet.

Le rayon de courbure  $R$  est déterminé à chaque balayage. Une fois que le rayon minimal  $a$  est détecté dans la zone de striction, une sélection de  $N$  points à proximité de ce point est effectuée. Ensuite, un ajustement polynomial  $r(z)$  est effectué pour calculer  $R$  (voir fig. 18).

Afin d'obtenir une bonne précision dans le calcul de  $R$ , différents nombres de points sélectionnés  $N$  et différents degrés d'ajustement polynomial sont utilisés.

La phase d'identification des valeurs des paramètres par l'ajustement sur les résultats d'essai mérite aussi une grande attention. L'impact de cette étape d'identification peut être très important sur le résultat obtenu par la suite dans un calcul de structure.



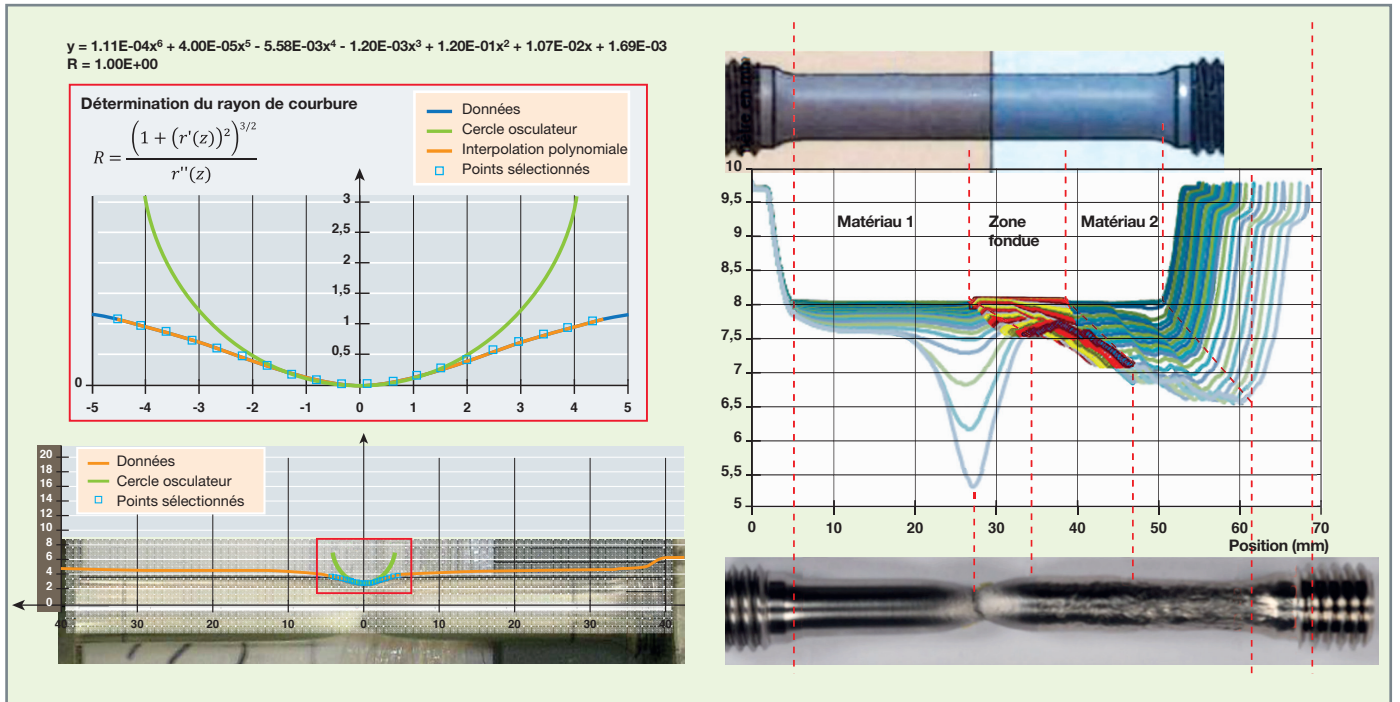


Fig. 18. Détermination du rayon de courbure  $R$  à partir de deux types d'éprouvettes.  
 À gauche : éprouvette avec un matériau homogène et le phénomène de striction.  
 À droite : éprouvette avec un multi-matériau (ici un joint soudé) où le phénomène de striction est différent dans chaque matériau.

### Détermination et constitution des lois : l'apport des approches multi-échelles

En complément des approches décrites précédemment, la modélisation – simulation multi-échelle des matériaux – est de plus en plus utilisée pour la détermination de lois matériaux. Dans le cas de l'élément combustible, certaines propriétés physiques sont ainsi déterminées à l'aide de méthodes de simulation à l'échelle atomique. Un exemple concerne la détermination de l'évolution en fonction de la température et de la composition chimique, de la capacité calorifique des combustibles oxydes mixtes uranium-plutonium (MOX). Pour la simulation de l'élément combustible, une approche couplée thermomécanique est en effet nécessaire (voir p. 111) et il y a donc nécessité de connaître la capacité calorifique du combustible (situations transitoires). Cette propriété peut être déterminée grâce à des simulations de dynamique moléculaire nécessitant des calculs haute performance. Ces données de simulation sont confrontées aux données expérimentales disponibles et permettent de conforter ou corriger les lois introduites *in fine* dans les codes de simulation des structures [4].

En parallèle, et dans un mouvement inverse (du macroscopique au microscopique) et complémentaire, la simulation des structures investit l'échelle des matériaux constitutifs à l'aide de la théorie de l'homogénéisation. Elle vise à approcher les propriétés du matériau hétérogène considéré en le traitant comme un matériau homogène équivalent (voir [5]).

Pour calculer ses propriétés, un volume élémentaire représentatif du matériau hétérogène considéré doit être défini. C'est un volume dont la taille caractéristique est nettement inférieure à celle de la structure considérée (séparation d'échelle), mais suffisamment grand devant la taille caractéristique des hétérogénéités le constituant.

Dans le cas des crayons combustibles MOX, trois échelles sont simulées simultanément : celle de l'objet technologique (le crayon combustible, 4 mètres de longueur), celle des structures élémentaires constituant ce crayon (les pastilles combustibles en interaction mécanique avec la gaine en vis-à-vis, quelques millimètres) ainsi que celle du matériau (les zones micrométriques présentant des propriétés physiques homogènes appelées phases et corrélées à la teneur en plutonium dans un MOX, quelques dizaines de microns). Ainsi, si la simulation de la pression interne dans le crayon combustible reste le paramètre clé vis-à-vis de sa stabilité en service, elle dépend étroitement du niveau de pression entourant les différentes phases constitutives du MOX dans les différents points de la centaine de pastilles constituant le crayon. Il n'existe pas pour le combustible MOX un ensemble complet et cohérent d'expériences permettant de déterminer sa loi de comportement mécanique et ses évolutions avec l'irradiation. Les données expérimentales disponibles doivent donc être complétées (intensité du fluage induit par l'irradiation, comportement viscoplastique des pastilles non irradiées...) par des données de modélisation/simulation. Ainsi, lors de l'irradiation de base en REP d'un combustible

MOX, connaissant à l'échelle de ses phases constitutives leurs évolutions physiques avec l'irradiation (se traduisant mécaniquement par un gonflement) ainsi que leur taux de fission pilotant l'intensité de l'écoulement viscoplastique, une loi micromécanique (appelée *3-phases*) est construite, permettant d'estimer la courbe contrainte-déformation macroscopique ainsi que les évolutions moyennes par phase des champs mécaniques à l'œuvre à l'échelle microscopique. Cette *loi 3-phases* présente certes un nombre de variables internes plus élevé qu'usuellement (une quarantaine de variables internes scalaires), mais leurs natures et leurs évolutions sont déterminées de façon déductive par

homogénéisation (voir [6]). Cette loi, intégrée dans MFRONT, permet de simuler le comportement sous irradiation [7], mais également en condition de stockage des combustibles MOX.

Cette démarche générale s'étend à d'autres matériaux comme :

- *Les aciers de cuve REP* (voir fig. 19). L'objectif poursuivi est de reproduire le durcissement induit par l'irradiation du matériau, responsable en grande partie de sa fragilisation. Les mécanismes d'interaction entre défauts d'irradiation et

### Focus sur MFRONT : un outil d'intégration des lois de comportement

Issue de la plateforme de simulation des éléments combustibles nucléaires PLÉIADES, le projet *open source* TFEL<sup>1,2,3</sup>, co-développé par le CEA et EDF avec le soutien de Framatome, fournit un ensemble de bibliothèques et d'outils dédiés à l'implantation et la capitalisation des connaissances matériau. La partie la plus visible du projet TFEL est le générateur de code MFRONT.

Son application principale est l'implantation de lois de comportements, notamment mécaniques. MFRONT permet également de traiter des propriétés matériaux (module d'Young, coefficients de diffusion, etc.) et des modèles physico-chimiques simples (gonflement sous irradiation, changement de phase).

L'une des particularités de MFRONT est la notion d'interface qui permet d'utiliser les connaissances matériau écrites avec MFRONT dans de nombreux solveurs différents qu'ils soient académiques (OpenGeoSys, FEniCS, MFEM, MOFEM, etc.) ou industriels (Abaqus/Standard, Abaqus/Explicit). En particulier, MFRONT dispose d'interfaces pour :

- Tous les codes de mécanique, historique ou en développement, développés à la DES (Cast3M, EUROPLEXUS, AMITEX\_FFTP, MANTA, Cathare, etc.) ;
- les codes éléments finis et applications combustibles des partenaires industriels de la DES (Code\_Aster, Cyrano, Galileo).

Bien au-delà du domaine nucléaire, une large communauté d'utilisateurs, qu'ils soient industriels ou académiques, français ou étrangers, s'est fédérée autour de MFRONT qui couvre aujourd'hui une large gamme d'applications allant de la recherche aux études critiques pour la sûreté.

### Lois de comportements mécaniques

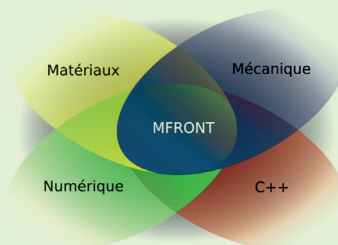
MFRONT permet de traiter toute la richesse des phénomènes mécaniques (plasticité, viscoplasticité, endommagement, etc.) et a été appliqué à de nombreux matériaux (métaux, sols, bétons, biomatériaux, composites, etc.).

L'étape d'intégration des lois de comportements mécaniques consiste, au sein de la recherche d'un équilibre mécanique, à résoudre localement, sur le pas de temps considéré, un système différentiel, généralement fortement non linéaire. Ce système permet de faire évoluer les variables internes du matériau, qui décrivent son état microstructural, et de calculer l'état de contraintes mécaniques en fin de pas. Cette étape est cruciale pour la robustesse des simulations et leurs performances numériques.

### La capitalisation des connaissances matériau au sein de la plateforme PLÉIADES et la démarche VAES

En permettant d'externaliser les connaissances matériau, MFRONT a ouvert la voie à une nouvelle manière d'envisager la capitalisation des connaissances matériau au sein de la plateforme PLÉIADES.

Il constitue également une des pierres angulaires du groupe de travail tripartite (CEA, EDF, Framatome) « validation à effets séparés » (VAES) qui vise à définir une méthodologie rigoureuse et des outils communs allant de la capitalisation des données expérimentales aux outils de calcul scientifiques. Ce groupe de travail permet de répondre à une part importante des exigences émises par l'autorité de sûreté nucléaire dans son guide 28 sur la qualification des outils de calcul scientifique (OCS) utilisés dans la démonstration de sûreté nucléaire.



1. <https://thelfer.github.io/tfel/web/index.html>.

2. Thomas HELFER, Bruno MICHEL, Jean-Michel PROIX, Maxime SALVO, Jérôme SERCOMBE and Michel CASELLA, "Introducing the open-source MFront code generator: Application to mechanical behaviours and

material knowledge management within the {PLÉIADES} fuel element modelling platform", *Computers & Mathematics with Applications*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.camwa.2015.06.027>.

3. <https://github.com/thelfer/tfel>.

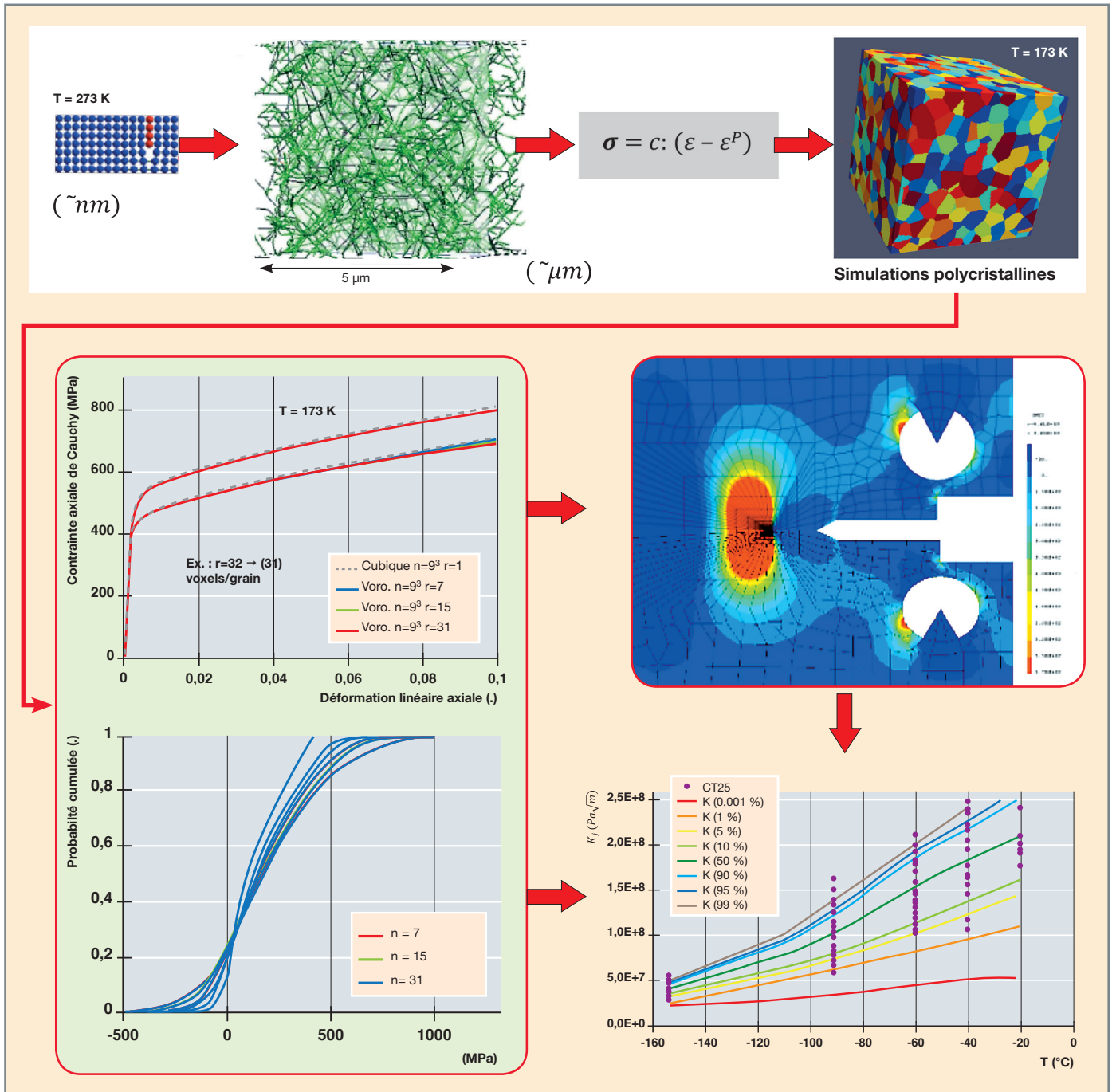


Fig. 19. Les différentes étapes de la démarche multi-échelle permettant de simuler l'évolution avec la température de la ténacité de l'acier de cuve : à l'échelle atomique, à l'échelle des dislocations, à l'échelle d'un VER représentatif de cet acier, simulation fournissant ainsi la loi de comportement locale nécessaire au calcul éléments finis de l'essai de ténacité.

dislocations sont tout d'abord modélisés à l'échelle atomique puis à celle de la dynamique des dislocations réalisant ainsi un premier changement d'échelle [8], [9]. Les lois de durcissement déduites de la simulation des interactions discrètes et des théories de la plasticité sont alors introduites dans des lois de comportement en mécanique des milieux continus dites de « plasticité cristalline » et qui permettent de modéliser le comportement à l'échelle du grain

du matériau. Les méthodes d'homogénéisation permettant la prise en compte de la microstructure cristallographique (modèles auto-cohérents, méthodes numériques s'appuyant sur les codes de calcul aux éléments finis ou de plus en plus à base de transformées de Fourier rapides) donnent alors accès au comportement à l'échelle macroscopique du matériau du composant, ainsi qu'aux distributions des champs mécaniques au sein de la microstructure

du matériau, lesquels peuvent ensuite enrichir des approches locales de la rupture [10], [11].

- **Les internes de cuve REP.** Les mécanismes de rupture observés en service au niveau de la visserie sont notamment de deux types [12]. Le premier, caractéristique des aciers inoxydables austénitiques, correspond à un mode de rupture ductile par croissance et coalescence de cavités intra-granulaires [13]. Le second est un mode de rupture fragile inter-granulaire associé au phénomène de cor-

rosion sous contraintes assistée par l'irradiation (CSC-AI ou IASCC : *irradiation-assisted stress corrosion cracking*) [14]. Dans les deux cas, l'obtention de modèles à bases physiques pour prédire de manière quantitative la fissuration à l'échelle de la structure requiert une analyse à deux échelles. La première échelle est celle d'un grain du matériau, échelle à laquelle se produisent les phénomènes physiques pertinents, où des lois de comportement de plasticité cristalline sont développées pour prendre en compte l'effet mécanique des paramètres microstructu-

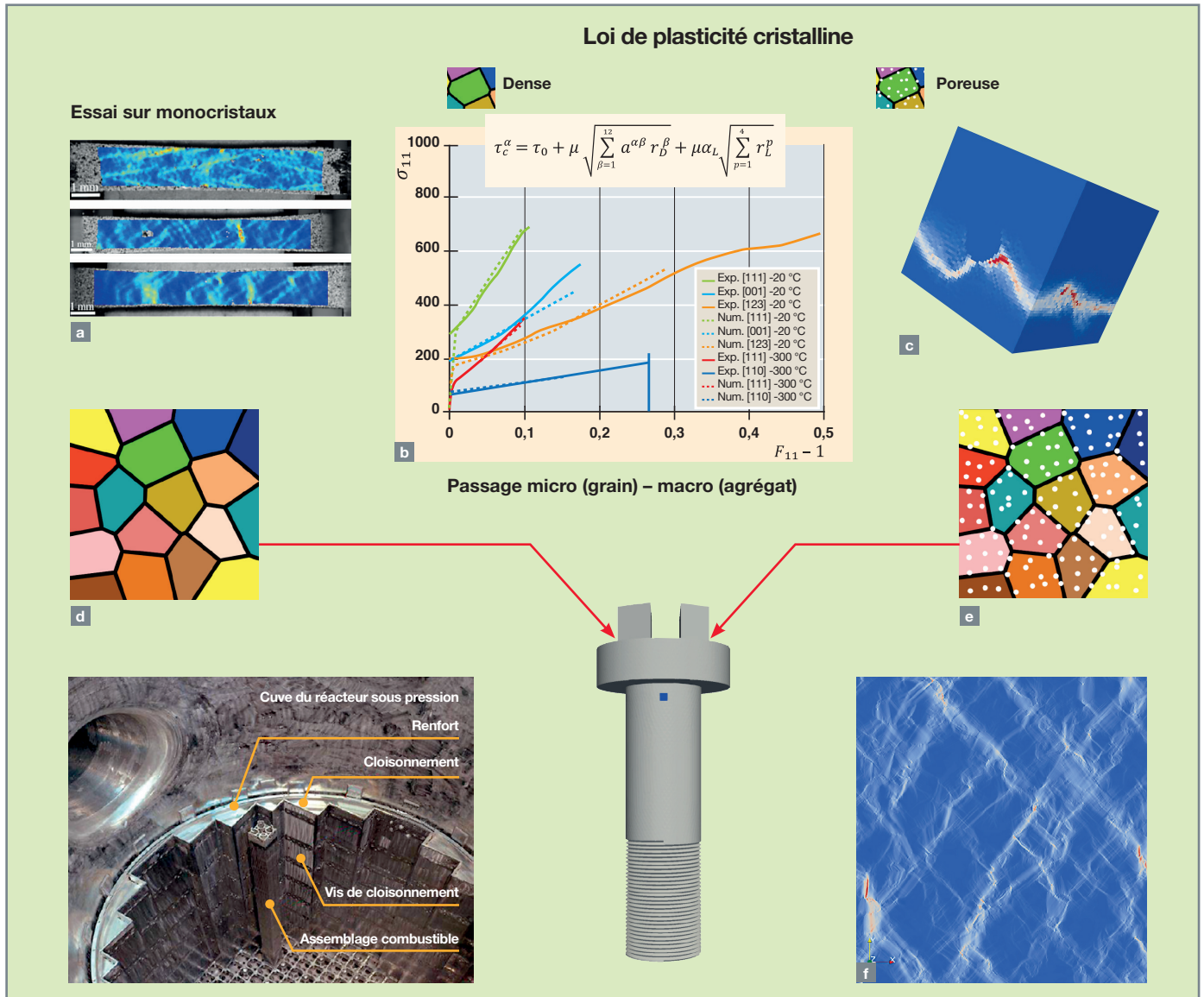


Fig. 20. De l'échelle pertinente vis-à-vis des mécanismes physiques à l'échelle d'intérêt pour les applications industrielles.

Application aux aciers inoxydables austénitiques des internes de cuve REP. Des essais mécaniques sur monocristaux d'aciers austénitiques avec suivi par corrélation d'images numérique (a) permettent d'obtenir des données quantitatives pour calibrer (b) des lois de comportement de plasticité cristalline implémentées dans le générateur de codes MFRONT. Ces lois de comportement décrivant le comportement des grains peuvent ensuite être utilisées pour réaliser des simulations numériques, par exemple avec le logiciel AMITEX\_FFTP, pour déterminer (c) le comportement de monocristaux poreux et le comportement d'agrégats polycristallins, (d) sans ou (e) en présence de porosités. Cette dernière étape, dite d'homogénéisation numérique, permet d'obtenir une loi de comportement à l'échelle de l'ingénieur qui garde la trace des phénomènes aux échelles inférieures. À titre d'exemple, il est alors possible de simuler les champs mécaniques locaux à la surface d'une vis d'internes de cuves (e) dans le cadre de l'étude de l'IASCC.



raux (défauts cristallins, cavités) [15]. La deuxième échelle est celle de l'agrégat polycristallin qui permet de relier les champs mécaniques locaux aux champs mécaniques à l'échelle de la structure. La figure 20 représente les principales étapes de cette démarche, à savoir : réalisation d'essais sur monocristaux, développement et calibration d'une loi de comportement de plasticité cristalline [16], extension de la loi pour prendre en compte l'effet des cavités par homogénéisation analytique et numérique (intégré dans le code AMITEX\_FFPT) [17], et passage à l'échelle de l'agrégat polycristallin par homogénéisation numérique [18]. L'ensemble de la démarche permet d'obtenir une loi de comportement macroscopique pour remonter, contrairement à une démarche purement phénoménologique, aux grandeurs locales pertinentes vis-à-vis des phénomènes d'intérêt.

- **Le béton de l'enceinte de confinement\* et des puits de cuve** (voir illustration fig. 21). Pour les enceintes, la problématique principale en service est liée au comportement différé du béton qui engendre une perte progressive de précontrainte. En conditions accidentelles (APRP, accident de perte du réfrigérant primaire), les élévations de température accélèrent le retrait et le fluage et génèrent des déformations thermiques différentielles entre la matrice cimentaire et les granulats susceptibles d'entraîner une microfissuration supplémentaire altérant la fonction de confinement du matériau. Les bétons de puits de cuve subissent quant à eux une irradiation neutronique provoquant à long terme une forte expansion de certains granulats. La simulation du comportement des structures en béton requiert donc le développement d'approches de modélisation multi-échelle et multi-physique. La microstructure du béton de type matrice-inclusions, hétérogène sur plusieurs échelles, est adaptée à la mise en œuvre de

méthodes d'homogénéisation analytiques afin d'estimer les propriétés thermo-hydro-mécaniques (THM) macroscopiques, y compris le fluage vieillissant [19], et de transport. Ces estimations ont permis de nourrir les lois de comportement destinées aux calculs de structure. Les approches numériques à l'échelle mésoscopique sur échantillons générés ou obtenus par tomographie sont de plus en plus utilisées pour caractériser le comportement du béton [20], notamment dans le cas où une microfissuration se développe dans la matrice cimentaire et aux interfaces matrice-granulats à la suite d'un chargement THM ou de gonflement interne, car les méthodes d'homogénéisation analytiques sont plus difficiles à appliquer et généralement moins précises dans ces situations. Ces simulations permettent également d'effectuer des « essais numériques » susceptibles de limiter le recours à de coûteuses campagnes expérimentales de caractérisation.

Pour chacun de ces exemples, des simulations de microstructure sont effectuées à l'échelle d'éléments de volume représentatifs (agrégats polycristallins pour les deux aciers considérés, dispersion de granulats dans la matrice de mortier pour les bétons). La démarche s'applique aussi à d'autres problématiques particulières :

- Le comportement sous irradiation des matériaux de gaine ;
- l'endommagement par multi-fissuration des matériaux vitrocéramiques et des matrices cimentaires pour le stockage des déchets nucléaires ;
- le comportement des particules constitutives des électrodes de batteries, pour lesquelles des travaux sont en cours avec le LITEN (voir [21]).

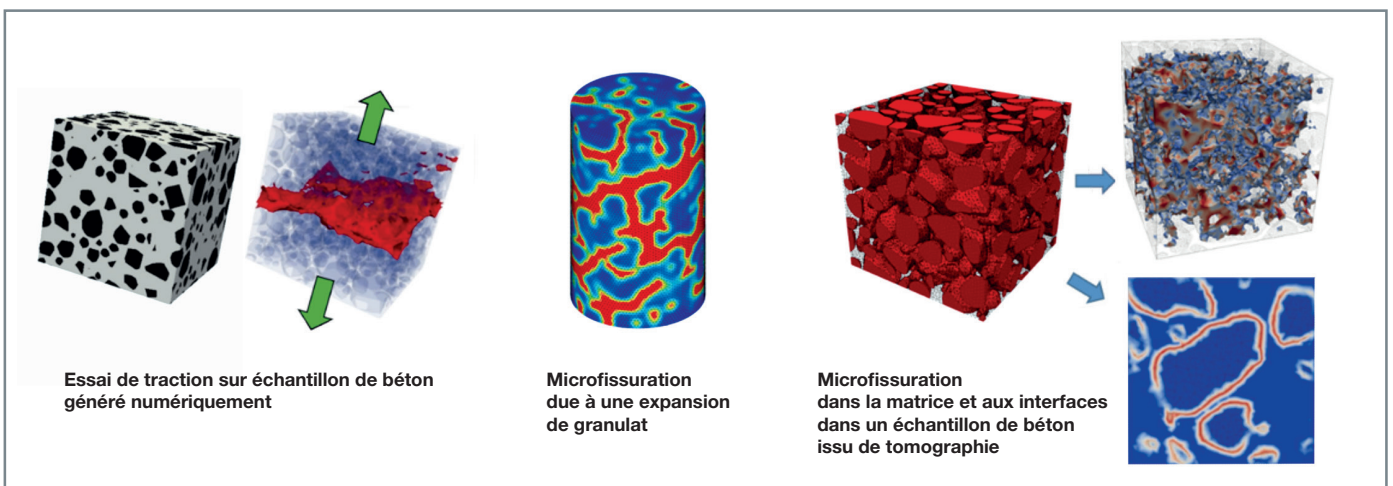


Fig. 21. Simulations mésoscopiques du comportement du béton : localisation d'une fissure dans la matrice en traction ; microfissuration due à l'expansion des granulats sous l'effet d'une irradiation neutronique ; propagation de microfissures dans la matrice et aux interfaces matrice-granulats sous chargement constant (fluage).



Toutefois, ces approches s'appuient sur une connaissance présupposée du comportement local des phases en présence. Une difficulté réside dans leur validation à l'échelle locale, étape indispensable pour accorder une confiance supplémentaire aux résultats de ces modélisations, produits à une échelle macroscopique, par rapport à une modélisation phénoménologique mise en œuvre uniquement à cette échelle. Cette question est au croisement de différents axes de recherche portant sur l'acquisition de données, la simulation/modélisation et le dialogue modèle/expérience. En effet, l'acquisition de données expérimentales à ces échelles fines (typiquement, les déformations intragranulaires au sein d'un polycristal) s'avère délicate et constitue un champ de recherche pour la mécanique expérimentale. Inversement, l'observation de ces données expérimentales locales peut imposer une révision plus ou moins profonde des modèles utilisés. À titre d'exemple, la simulation des bandes de localisation de la déformation intragranulaires, observées et caractérisées expérimentalement dans différents alliages polycristallins, et notamment dans les matériaux irradiés (alliage de Zirconium, acier 316L), demeure une question ouverte pour la modélisation. En effet, les limites des modèles de plasticité cristalline usuels à reproduire ce type de bandes au sein de simulations numériques à haute résolution ont été mises en évidence [22] et plusieurs approches alternatives ont été proposées pour repousser ces limites [23].

## Conclusions

Pour conclure, la détermination des lois de comportement nécessite des plateformes d'essais de caractérisation spécifiques. Très souvent, des techniques expérimentales innovantes doivent être développées. Dans le cas d'essais de traction sur matériaux ductiles, nous avons vu comment un moyen expérimental innovant permet d'obtenir un grand nombre de paramètres avec un minimum d'essais. D'autres dispositifs innovants sont développés au CEA pour obtenir des lois de comportement pertinentes en support aux calculs de structure.

De façon complémentaire, nous avons vu que la simulation multi-échelle joue un rôle croissant dans le développement de lois de comportement. L'ensemble de cette démarche repose sur le développement d'un socle d'outils numériques pour la mécanique des solides, commun aux différentes unités de la DES, regroupant en particulier : le générateur de code **MFRONT** (<https://thelfer.github.io/tfel/web/index.html>) pour l'intégration des lois de comportement mécanique, les outils **MEROPE** (<https://github.com/MarcJos/Merope>) et **COMBS** pour la génération de volumes élémentaires représentatifs des matériaux considérés, le code massivement parallèle **AMITEX\_FFTP** (<https://amitexfftp.github.io/AMITEX>) pour la simulation de ces volumes élémentaires représentatifs, et enfin le code aux éléments finis **Cast3M** pour les

simulations de structures. On notera que l'ensemble de ces codes est mis à disposition de l'ensemble du CEA et de la communauté scientifique.

**Cédric GOURDIN,**

*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*

**Emeric BOURASSEAU, Thomas HELFER, Renaud MASSON,**

*Département d'Études des Combustibles*

**Lionel GÉLÉBART, Jérémy HURE, Bernard MARINI,**

**Ludovic VINCENT et Benoît BARY,**

*Département de Recherche sur les Matériaux*

*et la Physico-chimie pour les énergies bas carbone*

## ► Références

- [1] O. ANCELET and P. MATHERON, "Development of a new measurement system for tensile testing", Pressure Vessels and Piping Division Conference, Bellevue, Washington, USA, 18-22 juillet 2010.
- [2] O. ANCELET and S. CHAPULIOT, "Tensile characterization of narrow gap bimetallic weld ferritic-austenitic steel with a new measurement system for tensile testing", Pressure Vessels and Piping Division Conference, Vancouver, BC, Canada, 17-21 juillet 2016.
- [3] P.W. BRIDGMAN, *Studies in Large Plastic Flow and Fracture*, MC Graw-Hill. New York, 1952.
- [4] D. BATHÉLLIER, M. LAINET, M. FREYSS, P. OLSSON and E. BOURASSEAU, "A new heat capacity law for  $UO_2$ ,  $PuO_2$  and  $(U,Pu)O_2$  derived from molecular dynamics simulations and useable in fuel performance codes", *Journal of Nuclear Materials*, 549, 152877, 2021.
- [5] *Les Matériaux du nucléaire : Modélisation et simulation des matériaux de structure*, Le Moniteur/CEA Saclay, Paris/Gif-sur-Yvette, France, 2016.
- [6] R. MASSON, M. E. B. SECK, J. FAUQUE and M. GARAJEU, "A modified secant formulation to predict the overall behavior of elasto-viscoplastic particulate composites", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 137, 103874, 2020.
- [7] A. BOULORE, C. STRUZIK, R. MASSON, P. MAILHE and R. LARGENTON, "Approach to better assess fission gas behaviors, applicable to fuels with complex microstructures", WRFPM 2017-2017 Water Reactor Fuel Performance Meeting, septembre 2017.
- [8] L. VINCENT, M. LIBERT, B. MARINI and C. REY, "Towards a modelling of RPV steel brittle fracture using crystal plasticity computations on polycrystalline aggregates", *Journal of Nuclear Materials*, 406, pp. 91-96, 2010.
- [9] G. MONNET, L. VINCENT and L. GÉLÉBART, "Multiscale modeling of crystal plasticity in Reactor Pressure Vessel steels : Prediction of irradiation hardening", *Journal of Nuclear Materials*, 514, pp. 128-138, 2019.
- [10] P. FORGET, B. MARINI and L. VINCENT, "Application of local approach to fracture of an RPV steel : effect of the crystal plasticity on the critical carbide size.", *Proc. Structural Integrity*, 2, 1660-1667, 2016.

- [11] S. REN, B. MARINI, P. JOLY and P. TODESCHINI, "Microstructure-informed modelling of the fracture toughness of alloys representing macro-segregated zones in heavy forgings", *Proc. Structural Integrity*, 28, 684-692, 2020.
- [12] J.M. SMITH, M.R. ICKES, M.A. BURKE, A.M. RUMINSKI and K.J. AMBERGE, "Hot cell testing of type 347 stainless steel baffle-to-former bolts removed from U.S. PWRs", vol. *Proceedings of the International Symposium Fontevraud IX*, 2018.
- [13] O.K. CHOPRA and A.S. RAO, "A review of irradiation effects on LWR core internal materials – Neutron embrittlement", *Journal of Nuclear Materials*, 412, 195-208, 2011.
- [14] P.L. ANDRESEN and G.S. WAS, "A historical perspective on understanding IASCC", *Journal of Nuclear Materials*, 517, 380-392, 2019.
- [15] X. HAN, *Modélisation de la fragilisation due au gonflement dans les aciers inoxydables austénitiques irradiés*, thèse CEA/École des Mines de Paris, 2012.
- [16] J.M. SCHERER, *Strain localization and ductile fracture in single crystals : application to irradiated austenitic stainless steels*, thèse CEA/École des Mines de Paris, 2020.
- [17] C. SÉNAC, J.M. SCHERER, J. HURE, T. HELFER and B. TANGUY, "Homogenized constitutive equations for porous single crystals plasticity", *European Journal of Mechanics – A/Solids*, vol. 95, 104642, 2022.
- [18] D. LIANG, J. HURE, A. COURCELLE, S. EL SHAWISH and B. TANGUY, "A micromechanical analysis of intergranular stress corrosion cracking of an irradiated stainless steel", *Acta Materialia*, 204, 116482, 2021.
- [19] T. HONORIO, B. BARY, J. SANAHUJA and F. BENBOUDJEMA, "Effective properties of n-coated composite spheres assemblage in an ageing linear viscoelastic framework", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 124, pp. 1-13, octobre 2017.
- [20] F. BERNACHY-BARBE and B. BARY, "Effect of aggregate shapes on local fields in 3D mesoscale simulations of the concrete creep behavior", *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 156, pp. 13-23, avril 2019.
- [21] G. VIANA, R. MASSON, B. MICHEL, B. MATHIEU and M. GARAJEU, « Stress level estimates in coated or uncoated silicon nanoparticles during lithiation », *European Journal of Mechanics – A/Solids*, 100, 105001 2023.
- [22] A. MARANO, L. GÉLÉBART and S. FOREST, "Intergranular localization induced by softening crystal plasticity : Analysis of slip and kink bands localization modes from high resolution FFT-simulations results", *Acta Materialia*, 175, pp. 262-275, 2019.
- [23] A. MARANO, L. GÉLÉBART and S. FOREST, "FFT-based simulations of slip and kink bands formation in 3D polycrystals : influence of strain gradient crystal plasticity", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 149, 104295, 2021.

## Des phénomènes de plus en plus complexes : un besoin de compréhension et de validation par l'expérience

### Introduction et contexte

La mécanique (des solides) expérimentale est fondée sur un ensemble de processus de test des matériaux (ou des structures) en appliquant, par exemple, une séquence temporelle de charges mécaniques par l'intermédiaire d'un ou plusieurs actionneurs. L'interprétation des observations faites lors de ces essais permet de mieux connaître la réponse mécanique de l'échantillon (ou de la structure) à la sollicitation appliquée. Dans le cadre de la mécanique des matériaux, l'objectif est d'obtenir une série de paramètres caractérisant le comportement du matériau, tels que la rigidité et la résistance. L'évolution au cours du chargement peut ensuite être formulée sous forme d'une loi de comportement.

L'expérimentation peut également étendre nos connaissances à propos des paramètres qui influencent le dimensionnement et le développement des structures. Ces connaissances supplémentaires peuvent nous aider à optimiser ensuite le temps et le coût consacrés aux essais en s'appuyant davantage sur les simulations numériques. Les systèmes complexes sont souvent non linéaires, représentent différents types de couplages, comprennent plusieurs sous-systèmes avec différentes échelles spatiales et temporelles. La compréhension fiable d'un tel système nécessite la coordination et l'intégration de l'expérimentation de la théorie et de la simulation numérique.

Dans le passé, beaucoup de scientifiques ont eu recours à l'expérimentation pour comprendre les phénomènes complexes. On peut raisonnablement penser que, dans l'avenir, la simulation numérique va prendre une place de plus en plus importante dans la résolution des problèmes dits « non complexes ». Cependant l'expérimentation mécanique restera un outil indispensable pour la résolution des problèmes complexes qu'on pourra qualifier comme « nouveaux » ou pour des situations qualifiées d'« importantes ».

Les essais visent à mesurer la charge et la déformation (ou le déplacement) dans des conditions de chargement telles que la résistance et le comportement des structures puissent être déterminés. Il convient de noter que la connaissance et la gestion des erreurs et les incertitudes liées à ces mesures sont d'une importance cruciale. Les dispositifs de mesure du déplacement ou de la charge sont sélectionnés en fonction de la plage de mesure (déplacement maximal ou charge

maximale) et de la précision de la mesure (0,001 mm ou 0,01 N). Plus l'étendue de mesure est élevée, plus la précision de mesure est faible, et plus l'étendue de mesure est faible, plus la précision de mesure est élevée.

Au-delà de la loi de comportement de(s) matériau(x) constitutif(s), la réponse d'une structure dépend également d'autres facteurs. Les essais dits « homogènes », dans lesquels les états de contraintes et de déformations sont quasi uniformes au sein de l'éprouvette, sont largement utilisés en mécanique des matériaux. Ces états permettent une détermination plus précise des grandeurs mécaniques telles que les contraintes et les déformations pendant l'essai. Néanmoins, les champs de contraintes et de déformations sont souvent hétérogènes et multi-axiaux au sein des structures. Si les essais homogènes ont beaucoup évolué ces dernières années, afin de se rapprocher de situations plus représentatives des structures, le passage aux essais réellement multi-axiaux est encore limité. Toutefois des essais triaxiaux sont aujourd'hui possibles comme en tricompression indépendante sur les échantillons de roche [1], ou la traction biaxiale d'une éprouvette cruciforme [2]. Les essais mécaniques sur les maquettes de structures se présentent actuellement comme un candidat efficace pour pallier ce manque de représentativité.

Par ailleurs, et malgré des progrès considérables réalisés dans le domaine de la simulation numérique, l'investigation expérimentale demeure toujours un maillon indispensable dans la chaîne de modélisation du comportement mécanique des structures. La multiplicité des situations de chargement à considérer, les différents effets de structures et les couplages multi-physiques (exemple : couplage thermomécanique) à prendre en compte rendent la vérification et la validation des modèles numériques indispensables, par confrontation avec des essais de structures bien maîtrisés et instrumentés. Inversement, le dimensionnement adéquat des essais de structures ainsi que leur interprétation nécessitent également le recours à la simulation numérique. Un dialogue essai-calcul est donc systématiquement nécessaire.

## Réduction d'échelle, loi de similitude et représentativité

En mécanique des matériaux le volume élémentaire représentatif (VER) est le plus petit volume sur lequel on peut effectuer une mesure qui donnera une valeur représentative de l'ensemble. Le VER peut donc être considéré comme un volume qui représente statistiquement le matériau, c'est-à-dire un volume qui comprend effectivement un échantillonnage de toutes les hétérogénéités microstructurales du matériau étudié (grains, inclusions, vides, fibres, etc.). Il doit cependant rester suffisamment petit pour être considéré comme un élément de volume de la mécanique des milieux continus. De ce fait, et de par sa définition, si la taille de l'échantillon est plus grande que celle du VER, on pourrait théoriquement s'attendre à ce que la taille de l'échantillon n'affecte pas les résultats d'un essai mécanique.

Cependant, on constate que la taille de l'objet testé peut dans une certaine mesure influencer sa réponse mécanique. À titre d'exemple, lors d'un essai de rupture sur les matériaux métalliques, la taille du défaut (la fissure) et celle de la zone plastique autour de son extrémité par rapport à la taille de la structure affectent le niveau de la sollicitation nécessaire pour sa propagation. L'importance de l'effet d'échelle sur la résistance au cisaillement des éléments en béton armé a également été montrée par plusieurs études expérimentales [3] [4]. Le comportement en cisaillement des structures en béton armé dépend de nombreuses variables, notamment le rapport d'aspect (ratio entre la hauteur et la largeur de la structure), le rapport entre les ferraillements longitudinaux et transversaux et la géométrie de la section transversale.

De plus, tester les structures, surtout dans le domaine de génie civil, conduit souvent à réduire l'échelle de la maquette par rapport à la structure réelle. Ceci est en particulier important en ce qui concerne des essais sismiques, où à cause de limitations des capacités des moyens expérimentaux (par exemple la taille et les capacités des tables vibrantes) les maquettes sont souvent à échelle réduite. Afin d'assurer la représentativité d'un essai réalisé sur une maquette à échelle réduite par rapport à la structure réelle, l'expérimentation doit être réalisée en respectant les lois de similitude. L'analyse dimensionnelle est un outil puissant pour y parvenir [5] [6] [7].

Afin d'illustrer les lois de similitude, considérons un essai réalisé sur un pont roulant sur la table Azalée de la plateforme TAMARIS (p. 163). La réponse des ponts roulants aux séismes est un élément très important dans l'évaluation de risque sismique des installations industrielles et en particulier pour les centrales nucléaires. En fait, toute défaillance d'un composant du pont roulant ou de ses supports (par exemple les poutres de roulement en acier ou en béton) doit être évitée. Outre les conséquences sur la capacité de manutention de l'installation après le séisme, un problème



Fig. 22. Maquette de pont roulant installée sur la table Azalée.

majeur peut survenir si une partie ou l'ensemble du pont roulant tombe sur des structures ou des équipements sensibles. Pour mieux comprendre la réponse des ponts roulants aux tremblements de terre, une campagne expérimentale a été menée. Il s'agissait d'une maquette simplifiée d'un pont roulant de longueur de 22,5 mètres à l'échelle 1/5 (voir fig. 22). Vu les dimensions de la table Azalée, qui est une des plus importantes en Europe, l'échelle 1/5 était la plus grande qui puisse être testée. Un point clé de cette campagne a été la définition de la similitude entre la maquette et la structure réelle afin de s'assurer de la représentativité des résultats expérimentaux.

Considérons une quantité d'intérêt, par exemple, le vecteur du déplacement relatif par rapport au déplacement de la table vibrante  $\underline{d}(\underline{x})$  en tout point de la maquette, à la coordonnée  $\underline{x}$ . En supposant un matériau homogène, isotrope, indépendant du temps, cette quantité peut s'écrire en fonction des paramètres du système [8] :

$$\underline{d} = \varphi_d(E, \nu, \underline{x}, t, \rho, \underline{g}, \underline{\Gamma}, L, \dots, \sigma_y, \dots) \quad (1),$$

où  $E$  est le module d'Young,  $\nu$  le coefficient de Poisson,  $\underline{x}$  le vecteur de position de chaque point,  $t$  le temps,  $\rho$  la masse volumique,  $\underline{\Gamma}$  le vecteur d'accélération de la table,  $\underline{g}$  l'accélération de gravité,  $\mu$  le coefficient de frottement entre les galets et les poutres de roulement et  $L$  est une longueur caractéristique. D'autres paramètres tels que le comportement non linéaire de la maquette peuvent également influencer la réponse de systèmes (par exemple la limite d'élasticité  $\sigma_y$ ). Dans le cas présent, le rang de la matrice des exposants des dimensions des variables contrôlant la réponse du système est égal à 3 (c'est-à-dire le nombre des dimensions fondamentales : masse, temps et longueur). Selon le théo-



rème Pi de Vachy-Buckingham, l'équation (1) peut être réécrite avec  $N-3$  variables adimensionnelles,  $N$  étant le nombre des variables initiales [8].

$$\frac{d}{L} = \Phi_d \left( v, \frac{\rho L \Gamma}{E}, \frac{E}{\rho L g}, t \frac{\sqrt{E/\rho}}{L}, \frac{\Gamma}{\mu g}, \frac{x}{L}, \dots, \frac{\sigma_y}{E}, \dots \right) \quad (2)$$

Une relation similaire peut être écrite si la grandeur d'intérêt est la contrainte adimensionnelle  $\sigma/E$  au lieu du déplacement. Les produits  $\Pi_1 = \rho L \Gamma / E$  et  $\Pi_2 = E / \rho L g$  peuvent être considérés comme les rapports des forces d'excitation sismique aux forces élastiques et des forces élastiques sur les forces gravitaires.  $\Pi_2$  est appelé également le nombre de Froude. Le temps adimensionnel  $\Pi_3 = t \sqrt{E/\rho} / L$  est le rapport entre le temps physique de l'essai et le temps nécessaire aux ondes sonores pour traverser la longueur  $L$ .

Une similitude complète est atteinte quand toutes les variables adimensionnelles ont les mêmes valeurs pour la maquette et la structure. La loi de similitude la plus utilisée en génie parasismique est la similitude de Froude ou similitude gravitaire. Dans ce cas, toutes les variables adimensionnelles de l'équation (2), y compris le nombre de Froude, sont les mêmes pour la maquette et pour la structure. Ceci implique les relations de similitude suivantes :

$$\frac{\rho}{\rho_0} = 1/\lambda \quad \frac{K}{K_0} = \lambda \quad \frac{f}{f_0} = 1/\sqrt{\lambda} \quad \frac{t}{t_0} = \sqrt{\lambda} \quad \frac{\Gamma}{\Gamma_0} = 1 \quad (3)$$

$$\frac{d}{d_0} = \lambda \quad \frac{v}{v_0} = 1/\sqrt{\lambda} \quad \frac{a}{a_0} = 1,$$

où l'indice 0 désigne la structure réelle et  $\lambda$  est le facteur d'échelle,  $f$  désigne la fréquence,  $v$  la vitesse et  $K$  la raideur. Cette loi de similitude respecte la similitude entre les rapports des forces de frottement et gravité par rapport aux forces d'excitation sismique. Cependant, la condition nécessaire pour respecter cette similitude est de changer la masse volumique telle que  $\frac{M}{M_0} = \lambda^2$ . Dans la pratique, ceci nous amène à ajouter des masses additionnelles sur la maquette.

Il est également à noter que le respect de cette similitude, impliquant une augmentation de la fréquence, nécessite une contraction du signal sismique appliqué. Ceci peut constituer une limite pour le facteur d'échelle applicable par les tables vibrantes.

## Quelques plateformes remarquables pour adresser les différents domaines de la mécanique des structures

### La plateforme expérimentale TAMARIS

Comme indiqué plus haut, l'apport des techniques expérimentales est très important pour mieux comprendre le comportement des structures sous sollicitations sismiques et pour valider la tenue sismique des équipements. Sur le site du CEA-Paris Saclay, au sein de la Direction des Énergies, l'ensemble des activités expérimentales pour étudier la réponse sismique des structures et des équipements est mené au sein du Laboratoire d'Études de Mécanique Sismique (EMSI) avec les moyens de la plateforme TAMARIS (voir fig. 23).

La plateforme expérimentale TAMARIS a vu le jour en 1991. Trois tables vibrantes hydrauliques permettent de réaliser des essais dynamiques avec des conditions de sollicitation

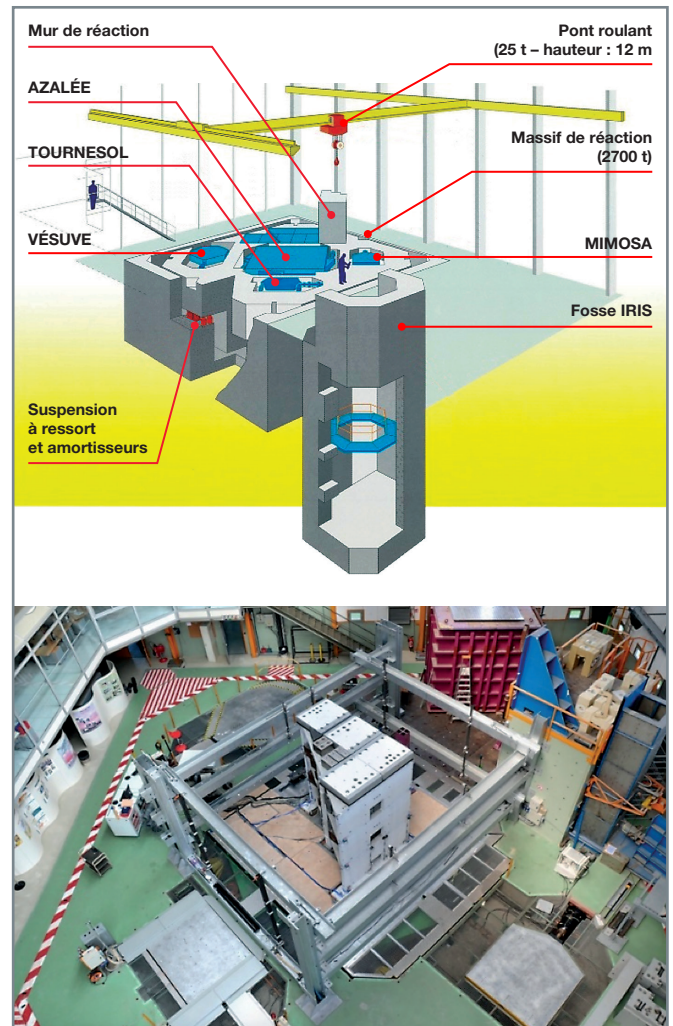


Fig. 23. Installation TAMARIS.



et des capacités de chargement différentes. Dotée d'un plateau de 6 mètres par 6 mètres, la table Azalée en est la plus importante. Elle est utilisée pour tester des spécimens de grandes dimensions et de masse importante (jusqu'à 100 tonnes). Huit vérins hydrauliques, pouvant développer chacun une force maximale dynamique de 1000 kN, permettent de réaliser des excitations tridimensionnelles, dans une plage de fréquences de 0 à 50 Hz.

Les performances dynamiques importantes de ces moyens d'essais permettent d'étudier le comportement non linéaire des maquettes sollicitées et d'évaluer, par rapport à leur niveau de dimensionnement, leur capacité de résistance. Dans certains cas, les essais peuvent être poussés jusqu'à la ruine physique du spécimen ou jusqu'à son instabilité (empilement de fûts par exemple). En plus des tables vibrantes, l'installation TAMARIS dispose d'un mur de réaction et d'une fosse d'essais de 15 mètres de profondeur, offrant ainsi la possibilité de réaliser des essais sur des structures de grande hauteur (barres de commande de réacteur par exemple).

Le laboratoire a une capacité d'acquisition de plus de 250 voies de mesure permettant, de par sa modularité et sa souplesse, de connecter et enregistrer des signaux d'origines et de natures variées (déplacement, accélération, jauges de déformation...) et d'apporter un nombre important de résultats qui pourront être confrontés aux résultats des calculs d'interprétation (voir le chapitre 3.1 pour un exemple). L'interprétation fine de ces essais nécessite une instrumentation poussée des maquettes. En plus des systèmes classiques d'acquisition de données, les techniques de corrélation d'images numériques (CIN) permettent de mesurer les champs de déplacement et d'extraire des quantités d'intérêt

comme l'endommagement. Le laboratoire met en œuvre depuis quelques années la technique de stéréovision 3D permettant d'avoir accès à des champs de déformation ou de déplacement sur la surface d'une maquette en cours d'essais (exemple de la figure 24 pour la détection de l'amorçage et du développement de fissures dans un mur en béton armé).

Les expérimentations menées sur la plateforme sont généralement réalisées dans le cadre de projets partenariaux, nationaux ou internationaux. Deux campagnes récentes sont citées dans les paragraphes suivants.

Le projet ANR SINAPS (Séisme et installation nucléaire : améliorer et pérenniser la sûreté, projet financé par l'Agence nationale de la recherche – ANR) réalisé de 2013 à 2021, a permis entre autres d'étudier expérimentalement la problématique d'entrechoquement entre les bâtiments lors des séismes (voir fig. 25).

De son côté, le projet européen SERA portait sur la réponse sismique de connecteurs entre des poutres et des poteaux dans les structures métalliques (campagne FUTURE ; voir fig. 26). Les constructions en structure métallique sont de plus en plus nombreuses dans le secteur industriel, mais elles se développent également dans les habitations. Elles présentent des avantages économiques et environnementaux, mais aussi en termes de résistance. En effet, elles acceptent de grandes déformations et limitent les risques d'effondrement en cas de tremblement de terre. Ce dernier avantage est néanmoins conditionné par la bonne conception des connecteurs entre les poutres et les poteaux. En cas de séisme, les connecteurs doivent conserver leur fonction de couplage tout en autorisant d'importantes déformations qui conduiront éventuellement à leur remplacement après séisme.

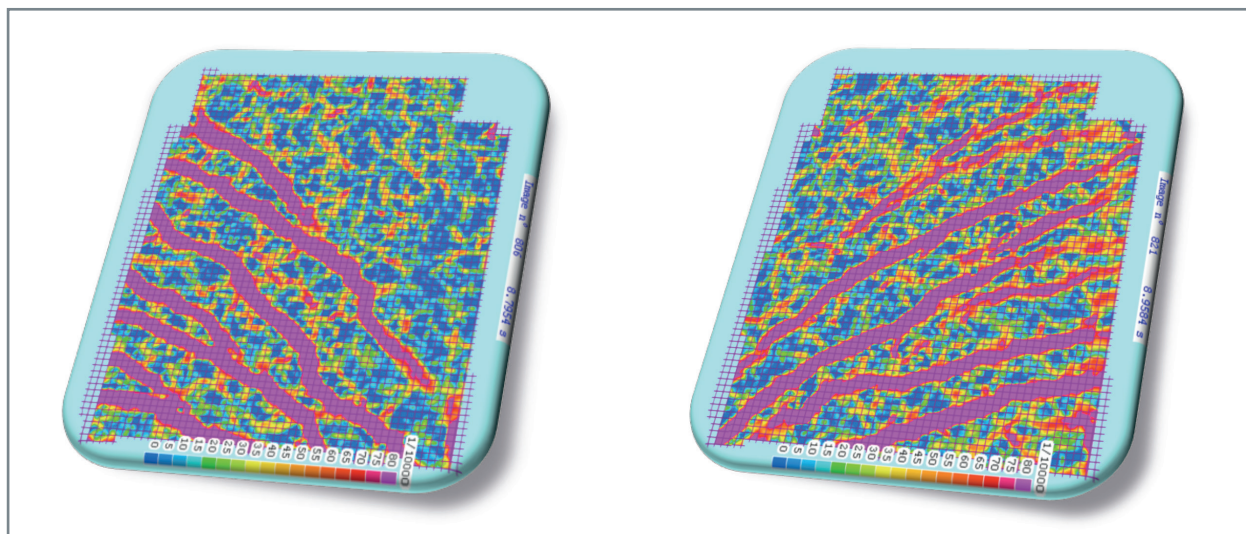


Fig. 24. Champ de déplacements et réseaux de fissure (zone en rose) détectés par la corrélation d'images numériques sur un mur en béton armé.

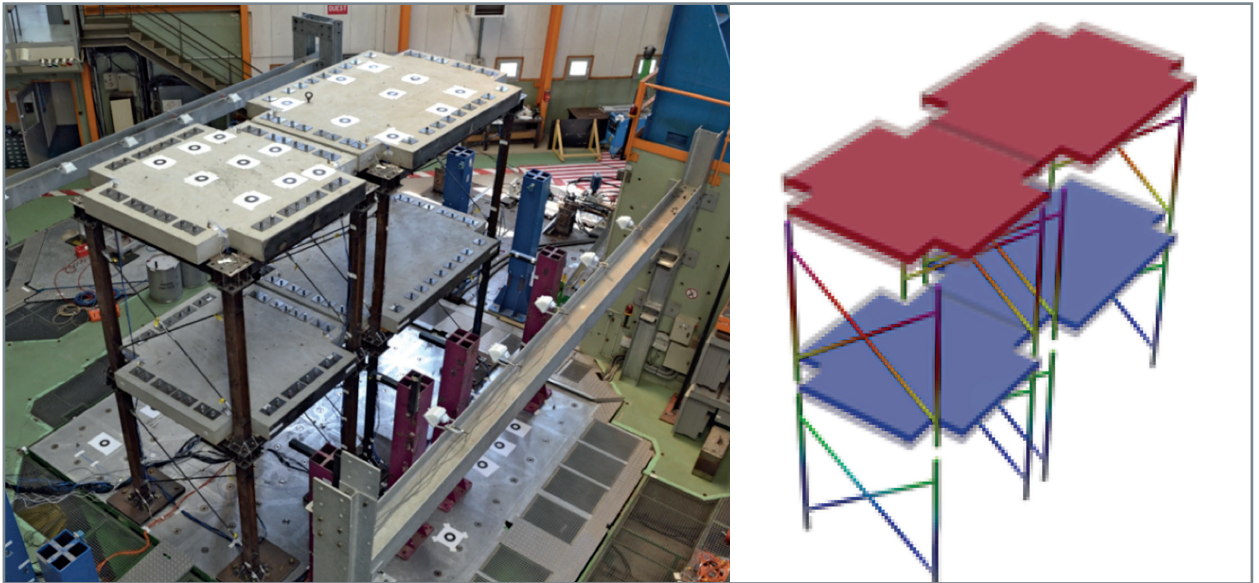


Fig. 25. Configuration de la maquette expérimentale sur la table Azalée pour étudier l'entrechoquement de bâtiments (gauche) ; modèle éléments finis de la maquette (droite).

La campagne FUTURE a été réalisée en collaboration avec l'université de Naples (Italie). Un portique double étage à l'échelle réelle ( $l \times L \times h = 4 \text{ m} \times 4,5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ), en ossature métallique et planchers béton, a été conçu et fabriqué (voir fig. 26) afin de pouvoir y fixer et remplacer trois différents types d'assemblages métalliques (voir fig. 26b). En plaçant cette imposante maquette sur la table vibrante Azalée, une centaine d'essais sismiques biaxiaux (X+Z) a pu être réalisée jusqu'à 1.1 g d'accélération maximale. Le comportement global et l'endommagement local des zones de connexion ont été suivis grâce à 120 capteurs de déplacement, d'accélération et de déformation. Les résultats obtenus ont permis de recaler un modèle numérique de connecteurs (voir fig. 26c).

Enfin, en complément de ces campagnes de grande ampleur menées sur des structures de grande taille, un effort particulier est déployé pour mettre au point des essais sismiques représentatifs sur des portions de bâtiment. Ces essais dits « hybrides » visent à reproduire les sollicitations dynamiques subies par un sous-système et appliquées par un environnement avec lequel il interagit (le reste du bâtiment, le sol, etc.). Le point central de la démarche consiste alors à découper le système de référence en une sous-structure numérique  $\Sigma_{\text{num}}$  (dont le comportement est simulé) et une sous-structure expérimentale  $\Sigma_{\text{exp}}$  qui sera testée physiquement sur table vibrante. La consigne à appliquer au système expérimental est calculée à la suite des résultats de la simulation de la sous-structure numérique, effectuée en temps réel. La réalisation d'essais « hybrides » est un défi expérimental à plus d'un titre ; une stratégie de pilotage évoluée permettant le dialogue entre  $\Sigma_{\text{exp}}$  et  $\Sigma_{\text{num}}$  est à mettre en œuvre pour le

contrôle du système expérimental et des techniques de calcul avancées doivent être élaborées pour permettre la résolution des modèles de  $\Sigma_{\text{num}}$  en temps réel.

### La plateforme expérimentale RESEDA

La plateforme expérimentale RESEDA regroupe sur 1 500 m<sup>2</sup> les moyens expérimentaux du CEA dans les domaines de la mécanique statique, dynamique (hors séisme), et de l'interaction fluide-structure. Pour assurer une exploitation la plus riche possible des essais, la plateforme RESEDA dispose de moyens d'instrumentation variés incluant des systèmes de mesure laser (profilométrie temps réel, vibrométrie, PIV – *particule image velocimetry*...), une caméra ultra-rapide, ou d'autres moyens de mesure avancés spécifiques aux besoins. RESEDA regroupe plus d'une trentaine de machines d'essais avec leurs dispositifs expérimentaux et d'acquisition associés, permettant la réalisation d'essais mécaniques, thermomécaniques, vibratoires, dynamiques (chocs) sur des éprouvettes élémentaires ou des maquettes structurales : tuyaux, appareils à pression, enceintes, assemblages combustibles, faisceaux tubulaires, absorbeurs, dispositifs en cœur, poutres, etc. Les conditions de chargement sont appliquées par des machines conventionnelles utilisant des vérins ou des pots vibrants, mais aussi par des moyens spécifiques tels qu'une tour de chute, des boucles à eau, des systèmes utilisant le chauffage par induction ou par effet Joule, des refroidissements à l'azote liquide... Les observations et les mesures portent sur le comportement mécanique (statique, dynamique, vibratoire), mais également sur l'usure, l'endommagement et la ruine. Si les structures métalliques sont le plus couramment étudiées, d'autres types de maté-

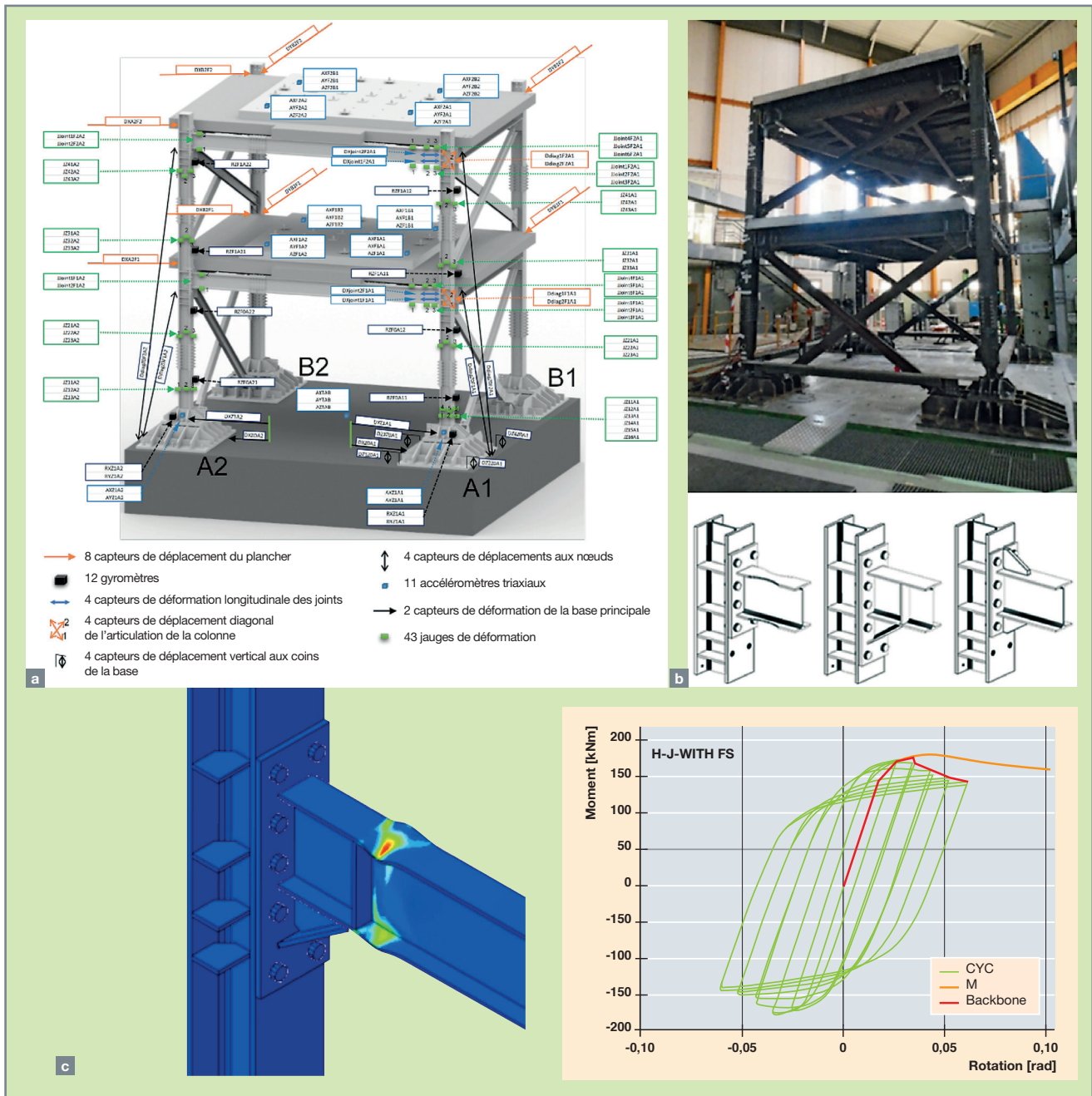


Fig. 26. La maquette FUTURE avec son instrumentation (a), différents types de connecteurs testés (b) et recalage du modèle numérique de connecteur poutre-poteau à partir des résultats expérimentaux (c).

riaux plus complexes (béton armé, graphite, bois...) ou de nouveaux concepts structurels peuvent également être testés. C'est par exemple le cas de l'étude du comportement sous choc d'amortisseurs réalisés par fabrication additive.

**La partie RESEDA statique de la plateforme** est composée de différents types de machines mécaniques/thermomécaniques et de moyens de contrôle associés, permettant de travailler dans une gamme de 0,5 à 5 000 kN de - 175 °C à + 2 000 °C. Elle compte notamment :

- Trois presses hydrauliques de forte capacité destinées à des essais sur composants (capacité de 500 kN, 2 500 kN et 5 000 kN) et quatre presses hydrauliques de 100 kN ;





- trois machines standards de fluage (four permettant des températures de  $\sim 1000/1200$  °C) ;
- trois presses électromécaniques (5 kN, 100 kN, 400 kN) pour des essais de caractérisation du comportement (dont une équipée d'un système de profilométrie temps réel) ;
- deux dispositifs de fatigue thermomécanique, dont un équipé d'un vérin électromécanique de capacité 200 kN ;
- deux dispositifs de fatigue équilibriaxiale sur semi-structures (avec et sans environnement REP).

L'un des objectifs des essais réalisés sur la plateforme RESEDA statique est de reproduire le plus fidèlement possible les configurations géométriques et les conditions de chargement telles qu'elles existent sur site et en utilisation réelle (situations qui peuvent aller jusqu'à reproduire des conditions accidentelles ; voir fig. 27). La validation et la consolidation des méthodes d'analyse d'intégrité des structures utilisées dans les référentiels de conception du nucléaire (on peut citer le RCC-MRx, RCC-M, RSE-M et autres ; voir p. 225) nécessitent en effet de pouvoir les comparer avec les données expérimentales afin de les évaluer de manière fiable et sûre.

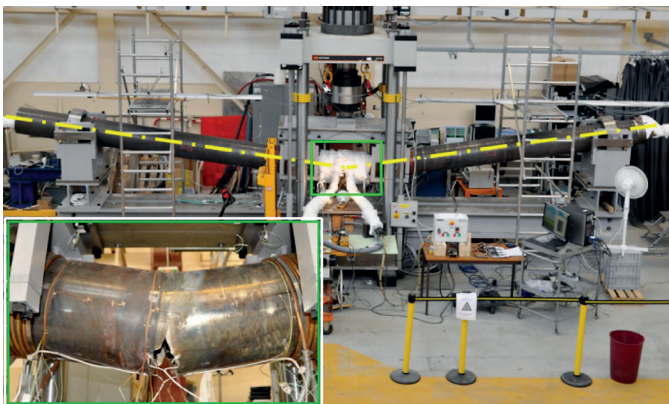


Fig. 27. Essai de flexion 4 points sur un composant du circuit secondaire à  $-70$  °C réalisé sur presse hydraulique de 250 t, étude de la transition rupture ductile/fragile.

On peut distinguer deux grandes familles de phénomènes à prendre en compte dans les analyses d'intégrité de structures. La première est liée à la configuration et à la géométrie des éprouvettes. Un comportement ou une règle de dimensionnement déterminé sur une éprouvette standard de caractérisation ne peut pas être appliqué directement à une structure. La géométrie va avoir un impact sur l'intégrité de la structure. Par exemple, le champ de contrainte n'est plus uniforme dans la zone étudiée. Cet effet peut être soit aggravant (concentration des contraintes) soit conservatif (redistri-

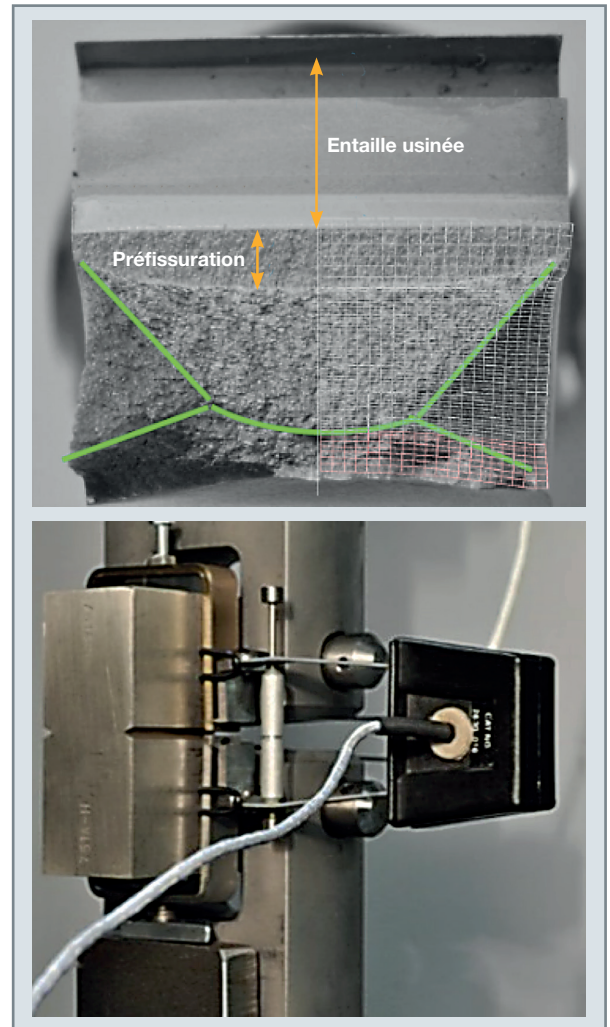


Fig. 28. Essais sur éprouvettes SNT et CT dans le cadre de l'étude de la compétition instabilité plastique/déchirure ductile.

bution des contraintes) vis-à-vis de la tenue en service des composants (voir fig. 28). C'est pourquoi le développement d'essais à des échelles réelles est nécessaire sur des moyens expérimentaux de grandes capacités. Ils doivent alors être combinés à la mise en œuvre de moyens de mesures innovants tels que la mesure de déplacement par stéréo-corrélation.

La seconde famille de phénomènes à prendre en compte est liée aux types de chargements imposés aux structures. Ceux-ci peuvent être divisés en deux catégories : des chargements de type primaire qui sont liés par exemple aux pressions internes et des chargements de type secondaire qui sont générés par les fluctuations de température, tels que des chocs froids sur une structure chaude. De la même manière que pour les aspects géométriques, il est important de réaliser des essais avec ces différents types de chargements (mécanique et thermique) sur des éprouvettes repré-

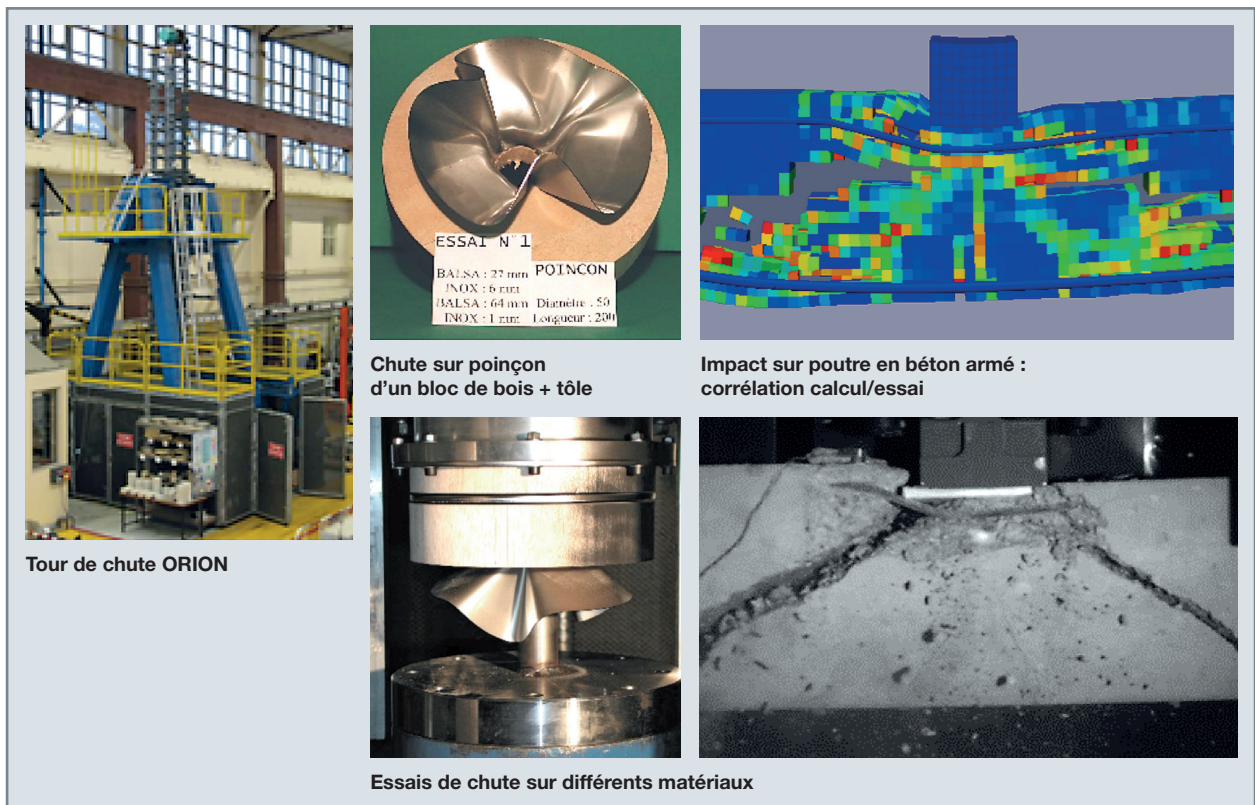


Fig. 29. Essais biaxiaux sur éprouvettes en croix dans le cadre de l'étude de la rupture fragile d'un acier de cuve en 18MnD5.

sentatives, car ils n'ont pas le même impact sur l'intégrité des structures. Par exemple, si une fissure est soumise à un chargement primaire, au fur et à mesure que celle-ci se propage, le chargement devient de plus en plus néfaste et dangereux. Le chargement secondaire va, lui, avoir un impact plus modéré sur la propagation de fissure, en revanche, il facilitera l'apparition et l'amorçage de celle-ci.

**La partie RESEDA dynamique de la plateforme** est dédiée à l'étude des chocs et impacts, des vibrations sous écoulement (en eau ou en eau/air) et de l'usure (en conditions REP). Elle compte de nombreux moyens d'essais très variés, notamment :

- La tour de chute ORION (chutes gravitaires de charges jusqu'à 500 kg et 8 mètres de hauteur). Elle est destinée à l'étude du comportement de structures soumises à des chocs à basse vitesse, à la validation expérimentale de modèles numériques développés avec le code de calcul EUROPLEXUS (bois, béton armé, coques et plaques métalliques) et à la qualification de dispositifs (amortisseurs dynamiques...) à l'aide d'une instrumentation avancée (chaîne d'acquisition rapide synchrone, caméra ultra-rapide, capteurs LASER...);
- la maquette de dépressurisation brutale MADMAX (- 70 bars en 20 ms) dédiée à l'étude de la propagation d'ondes de dépressurisation à travers des singularités de type plaques perforées ou des zones encombrées pour simuler des scénarios de type APRP. L'instrumentation associée permet le suivi de la propagation des ondes (capteurs de pression piézo-électriques et piézo-résistifs associés à une acquisition haute fréquence synchrone). Ces essais contribuent à la validation des modèles implantés dans le code de dynamique rapide EUROPLEXUS ;



Tour de chute ORION

Chute sur poinçon d'un bloc de bois + tôle

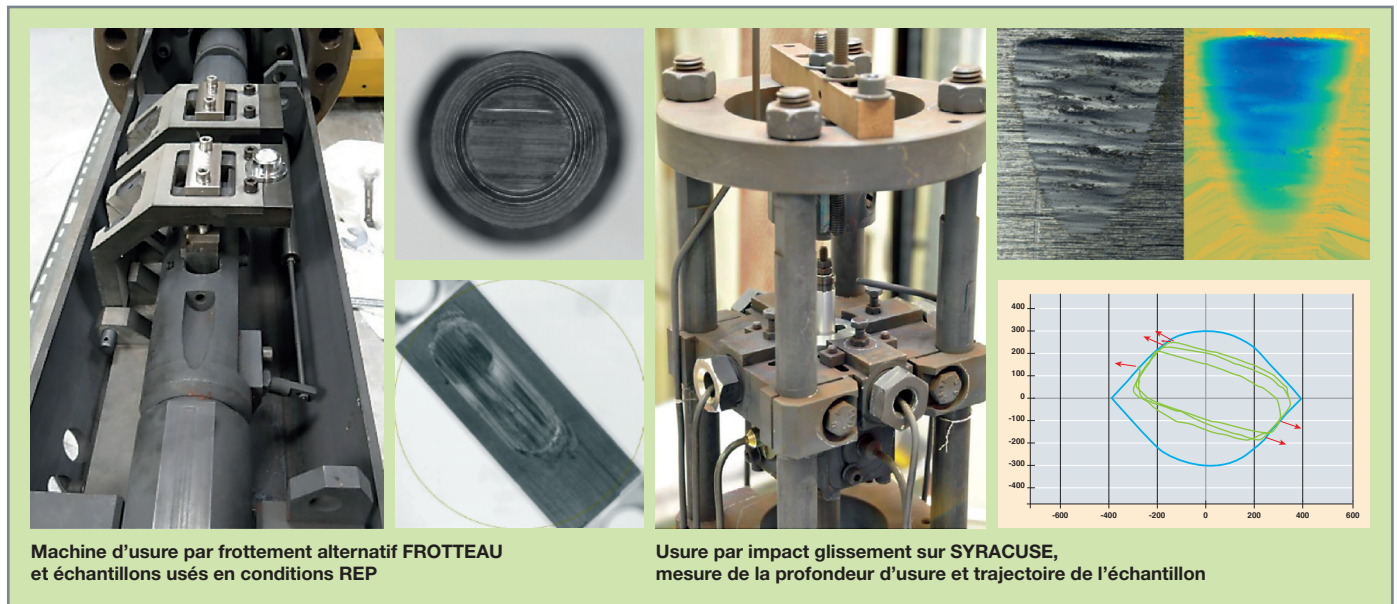
Impact sur poutre en béton armé : corrélation calcul/essai

Essais de chute sur différents matériaux

Fig. 30. Illustration de dispositifs expérimentaux de la plateforme RESEDA.







Machine d'usure par frottement alternatif FROTTEAU et échantillons usés en conditions REP

Usure par impact glissement sur SYRACUSE, mesure de la profondeur d'usure et trajectoire de l'échantillon

Fig. 31. Dispositifs expérimentaux d'usure.

- trois boucles à eau « froides » – SUPERBEV (5 400 m<sup>3</sup>/h, 10 bars) ; GASCOGNE (1 100 m<sup>3</sup>/h, 6 bars) ; TAXI (30 m<sup>3</sup>/h, 16 bars) – ainsi qu'un compresseur d'air (7 bars, 3 500 Nm<sup>3</sup>/h), dédiés à l'étude des vibrations en interaction fluide/structure sous écoulement monophasique ou diphasique eau/air sur des maquettes analytiques ou à échelle 1. Ces boucles associées aux maquettes d'essais servent de support à la R&D en interaction fluide-structure, en particulier pour la thématique des vibrations de tubes de GV ainsi qu'à la qualification de composant (tube DeltaP du RJH) ;
- deux boucles « chaudes » aux conditions du circuit primaire ou secondaire des REP (150 bars, 320 °C, chimie de l'eau) – BEARN 1 (7 m<sup>3</sup>/h) et BEARN 2 (14 m<sup>3</sup>/h) – pour des essais d'usure ;
- deux machines d'usure par impact/glissement à « chaud » – SYRACUSE 1 et SYRACUSE 2 (120 bars, 300 °C, chimie REP) et une machine d'usure par frottement alternatif FROTTEAU 2 (mouvement alternatif à 1 Hz pour une course de 5 à 50 mm), sur boucle « chaude » BEARN 1.

Dans l'idée d'aller toujours plus loin dans l'expérimentation et dans l'exploitation des résultats d'essais, les équipements ou les moyens de mesure font régulièrement l'objet d'améliorations. Ainsi, dans le cadre de l'étude des vibrations de tubes de générateur de vapeur (GV) sous écoulement monophasique ou diphasique, plusieurs moyens ont été développés et mis en œuvre : mesure PIV et post-traitement POD (*proper orthogonal decomposition*) pour visualisation de l'écoulement, système de contrôle actif pour atteindre et

dépasser le seuil d'instabilité des tubes, bi-sonde optique pour la mesure du taux de vide et du régime d'écoulement en diphasique.

On peut également citer le développement de méthodes de mesure de champs dans le cadre de la caractérisation dynamique du comportement de matériaux métalliques. À l'aide d'une caméra rapide de haute définition, il est possible d'acquérir à une cadence élevée (plusieurs milliers d'images par seconde) une cartographie de champs cinématiques hétérogènes typiques d'une sollicitation d'une structure (déplacements, déformations). L'identification des lois de comportement à partir de ces champs s'effectue alors *via* des méthodes inverses. Afin de rendre robuste cette étape, un effort doit être réalisé dans le design d'un essai de validation, notamment à cause des nombreux biais potentiels de la chaîne d'identification (exemple : qualité de la mesure de champs). Pour cela, le prototypage de la campagne d'essais d'impact pour la validation du comportement du matériau fait l'objet d'une optimisation multi-paramétrique à l'aide de la plateforme URANIE. Ces travaux sont réalisés dans le cadre d'un projet FOCUS, en collaboration avec l'ONERA et l'École Centrale de Nantes.

## Conclusions

L'expérimentation reste un pilier de la mécanique des structures, que ce soit pour la compréhension de certains phénomènes (réponse mécanique de l'échantillon ou de la structure, paramètres influençant le dimensionnement) ou la validation des simulations numériques. Ainsi, même s'il est raisonnable de penser que la simulation numérique va

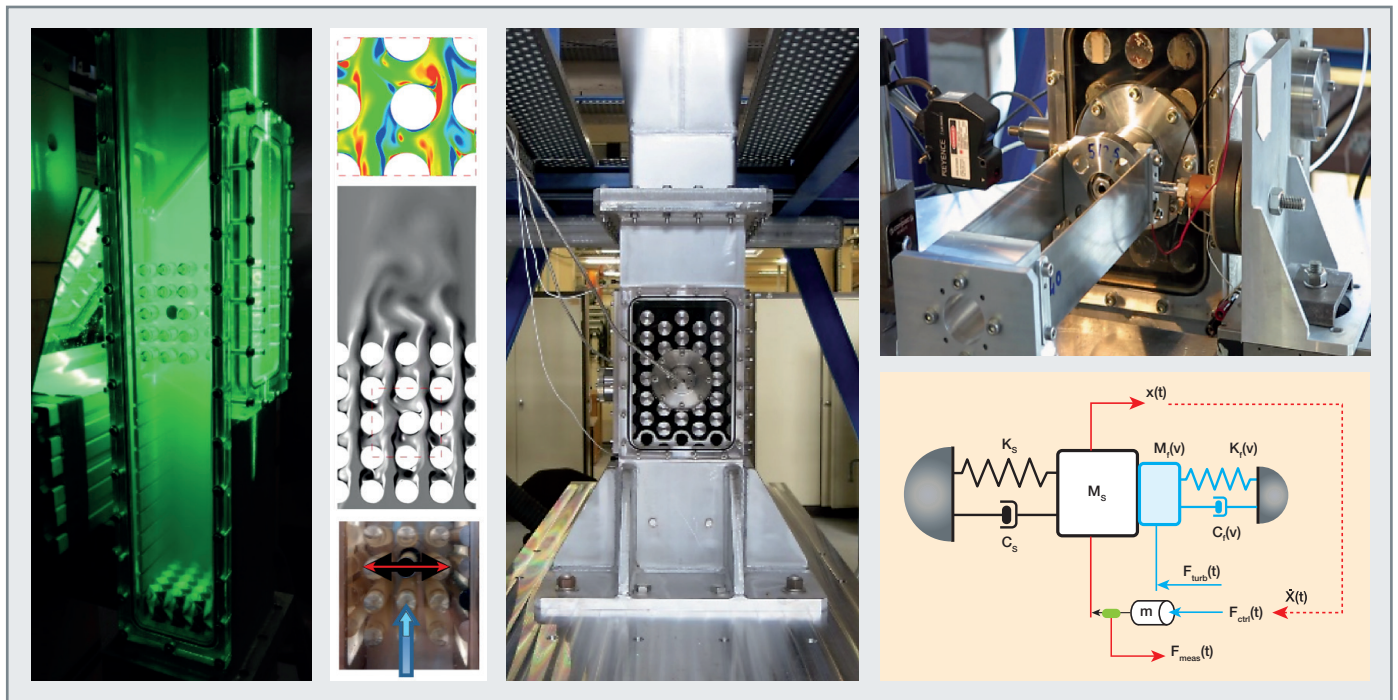


Fig. 32. Mesure PIV pour visualisation de l'écoulement dans un faisceau de tubes (à gauche), vibrations d'un faisceau de tubes sous écoulement diphasique : maquette TITAN sur boucle GASCOGNE (au milieu), système de contrôle actif pour la mesure du seuil d'instabilité en vibrations sous écoulement (à droite).

prendre une place de plus en plus importante (compte tenu du coût des dispositifs expérimentaux et de l'augmentation significative des possibilités offertes par l'outil numérique), le recours à l'expérimentation restera indispensable dans certaines situations (effets d'échelle, qualification du comportement des composants à une échelle représentative, « nouveaux » problèmes complexes). En ce sens, le CEA dispose de plateformes expérimentales remarquables (plateforme TAMARIS pour le comportement sismique et RESEDA pour les comportements dynamiques et statiques) pour répondre à ces enjeux.

**Darius SEYEDI, Cédric GOURDIN, Sophie BOREL-SANDOU,**  
*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*  
**et Claire GAUTHIER,**  
*Direction des Programmes Énergies*

#### ► Références

- [1] P. BÉSUELLE and P. LANATÀ, "A New True Triaxial Cell for Field Measurements on Rock Specimens and Its Use in the Characterization of Strain Localization on a Vosges Sandstone During a Plane Strain Compression Test", *Geotechnical Testing Journal*, vol. 39, n° 5, pp. 879-890, doi:10.1520/GTJ20150227, ISSN 0149-6115, 2016.
- [2] D. CLAIRE, F. HILD and S. ROUX, "Identification of damage fields using kinematic measurements", *Comptes rendus – Mécanique*, tome 330, n° 11, pp. 729-734, 2002.

[3] G.N.J. KANI, "How safe are our large concrete beams?", *ACI Journal Proceedings*, n° 64-12, pp. 128-141, 1967.

[4] H.P.J. TAYLOR, "Shear Strength of Large Beams", *Journal of the Structural Division*, ASCE, vol. 98, n° ST11, pp. 2473-2490, 1972.

[5] H. HARRIS and G. SABNIS, *Structural modeling and experimental techniques*, CRC Press LLC, 1999.

[6] N. MAKRI and C.J. BLACK, "Dimensional analysis of bilinear oscillators under pulse – type excitations", *Journal of Engineering Mechanics* ASCE, 130(9):1019-31, 2004.

[7] A. PALMER, *Dimensional analysis and intelligent experimentation*, World Scientific Publishing, 2008.

[8] C. FEAU, I. POLITOPOULOS, G. KAMARIS, C. MATHEY, T. CHAUDAT and G. NAHAS, "Experimental and numerical investigation of the earthquake response of crane bridges", *Engineering structures*, n° 84, pp. 89-101, 2015.



# Incertitudes, approches probabilistes et sensibilité

## Introduction

Avec l'avènement de l'informatique récent, le rôle de la simulation numérique devient prédominant, car cette dernière peut profiter de l'augmentation des ressources de calcul, mais surtout de leur parallélisation. Elle est alors de plus en plus utilisée dans le processus de l'aide à la prise de décision, ce qui sous-entend qu'elle n'est plus forcément seulement descriptive, mais qu'elle se doit de devenir de plus en plus prédictive, et ce en étayant de la manière la plus fine possible la confiance que l'on peut avoir dans ses prédictions. Ce chapitre est consacré à aux notions d'incertitudes, de probabilités et de sensibilités qui se doivent aujourd'hui d'accompagner les simulations numériques.

Ce sont ces notions qui vont être décrites dans ce chapitre, en s'appuyant sur un exemple d'application dans le domaine de la mécanique des structures, objet de cette monographie.

### Vision générale de la simulation numérique

La capacité prédictive de la simulation numérique implique que soient définis plusieurs niveaux d'abstraction, non mutuellement exclusifs, dont le but est la description du réel la plus fidèle possible :

- Un modèle mathématique pour décrire parfaitement certaines variables d'intérêt du système. Ce modèle n'est pas forcément connu ou même atteignable, mais décrit la « réalité » ;
- un modèle paramétrique décrivant le mieux possible les mêmes variables d'intérêt du système. Ce dernier est normalement représentatif de la compréhension du système et nécessite deux types de paramètres :
  - les paramètres d'entrée, simulés ou mesurés, qui sont les facteurs dont le modèle paramétrique dépend pour chaque estimation,
  - les paramètres de la simulation (aussi appelés paramètres du modèle) qui sont, souvent, des paramètres constants ;
- un algorithme capable de calculer correctement le modèle paramétrique, si possible sans erreur, mais nécessitant parfois aussi des paramètres dédiés qui permettent la convergence numérique des algorithmes ;

- des mesures des variables d'intérêt du système.

De cette vision découle l'approche VVQI (ou VVUQ en anglais), pour vérification, validation et quantification des incertitudes, dans laquelle il faut définir un certain nombre de concepts [1] :

**Validation** : cette étape tente de maîtriser les incertitudes de simulation qui pourraient naître d'une trop grande simplification du phénomène. Un modèle validé n'est toutefois pas un modèle parfait, car cette validation peut être faite sur des grandeurs spécifiques et/ou dans un domaine d'utilisation bien défini (souvent restreint, mais suffisant). Elle est souvent résumée comme « résoudre l'équation correcte ».

**Vérification** : cette étape tente de maîtriser les incertitudes d'implémentation du modèle numérique qui pourraient naître d'un problème de convergence de maillage, d'un problème d'arrondi dans l'arithmétique flottante, de bugs... Elle est souvent résumée comme « résoudre correctement l'équation ».

**Calibration** : cette étape, nécessaire une fois que la validation et la vérification sont faites, tente de définir la valeur optimale des paramètres du modèle et de maîtriser les incertitudes associées.

**Propagation d'incertitude** : cette étape vise à estimer l'impact des incertitudes des paramètres d'entrée sur les variables d'intérêt et plus généralement sur les grandeurs d'intérêts. Une grandeur d'intérêt est une donnée numérique, généralement statistique, représentative de la distribution de la variable d'intérêt : la moyenne, l'écart type, un quantile.

Les comparaisons des différents niveaux d'abstraction, telles que présentées ci-dessus, ne sont généralement pas possibles avec la « réalité », ce qui fait que ces étapes sont faites en utilisant des résultats expérimentaux, venant inévitablement avec leurs propres incertitudes. L'étape tentant de maîtriser au mieux ces dernières est la **métrologie** pour ce qui relève des mesures pures (tolérances des matériaux par exemple) et de l'analyse statistique (pour les corrélations possibles entre les différents phénomènes mesurés).

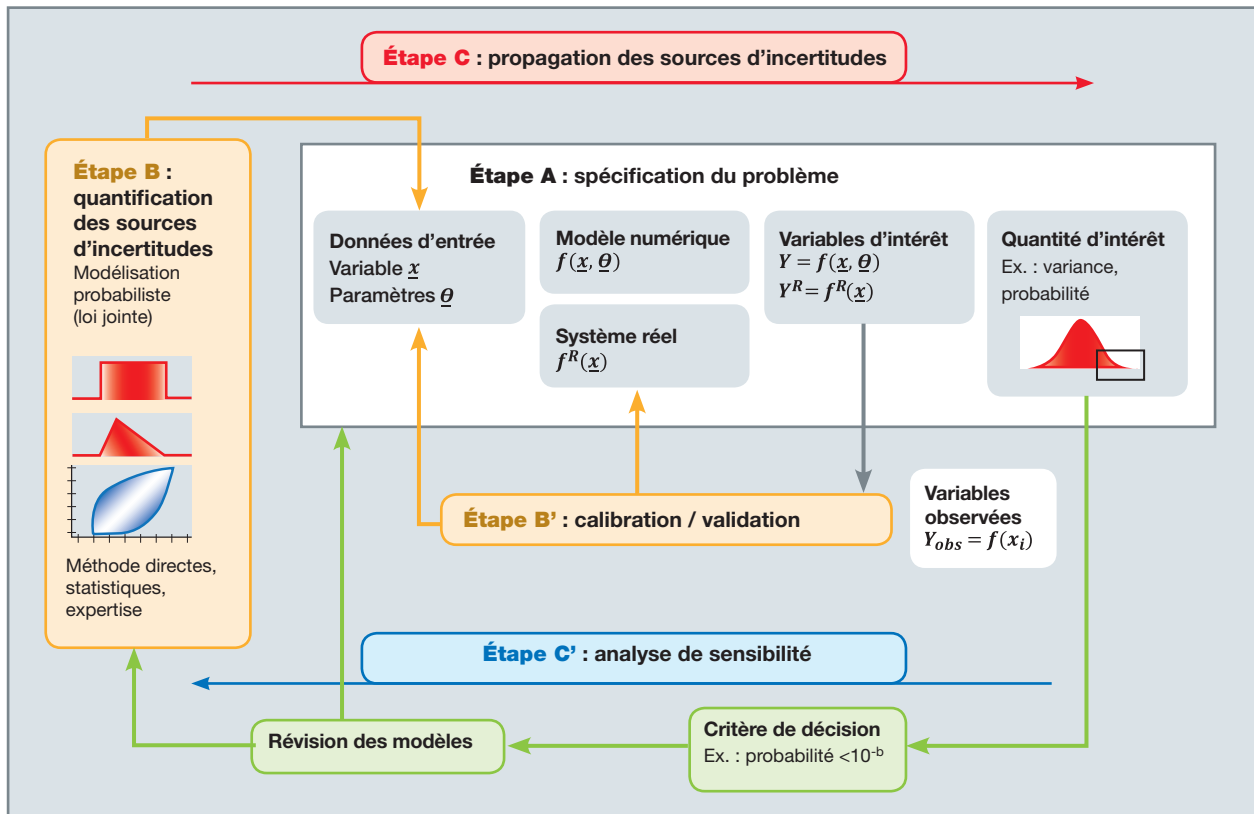


Fig. 33. Représentation schématique de plusieurs étapes de l'approche WVQI [2].

Les principales étapes discutées ci-dessus et dans le reste de ce chapitre sont regroupées dans la figure 33 qui montre la définition du problème, la quantification des sources d'incertitudes, la propagation des incertitudes et l'analyse de sensibilité.

## Cas d'application

Pour illustrer la démarche présentée dans la partie précédente, nous allons considérer un exemple issu du génie parasismique et décrit en détail dans [3]. Il va ainsi s'agir de déterminer l'impact de paramètres mécaniques incertains sur la réponse sismique non linéaire d'un tronçon de ligne de tuyauterie d'un réacteur à eau pressurisée (REP). L'information recherchée ne sera pas la réponse de la tuyauterie elle-même, mais sa probabilité de défaillance sous séisme, exprimée en fonction d'une mesure de l'intensité sismique à laquelle elle est soumise, à savoir, sa courbe de fragilité sismique. En pratique, entreprendre une telle démarche se révèle extrêmement coûteux numériquement. Cela requiert de nombreux appels à des codes de calculs dont les coûts – les temps de calculs – augmentent avec le niveau de fidélité. Pour contourner cette difficulté, un modèle de substitution sera utilisé qui sera établi à partir d'un nombre limité

d'appels à ces codes. Ainsi, en simulant le modèle de substitution, il sera possible d'estimer, à moindre coût cette fois-ci, la courbe de fragilité issue de la propagation des incertitudes. Il sera également possible de mener une analyse de sensibilité globale pour identifier les paramètres incertains les plus influents sur cette même courbe.

## Éléments de contexte

Dans les années 1980, un cadre probabiliste a été élaboré aux États-Unis pour évaluer la probabilité moyenne annuelle d'apparition de dommages graves sur les structures nucléaires causés par des événements sismiques, appelé évaluation probabiliste des risques sismiques (*Seismic Probabilistic Risk Assessment* ; voir [23], [4] et [5]). L'un des éléments clés de cette approche est la courbe de fragilité. Une telle courbe exprime la probabilité de défaillance – ou de dépassement d'un seuil critique – d'un ouvrage, conditionnée à une mesure d'intensité sismique. Sa détermination nécessite de prendre en compte les différentes sources d'incertitudes qui interviennent inévitablement dans ce type d'étude et qui sont classées en deux catégories, les incertitudes épistémiques et les incertitudes aléatoires. Selon [6], distinguer ces deux types d'incertitudes est une manière pragmatique de distinguer les incertitudes que les ingénieurs



sont à même de pouvoir réduire, de celles qui ne peuvent l'être, permettant des choix de conception basés sur l'information. Pour cette raison, dans la pratique, il est souvent considéré que les incertitudes épistémiques sont des sources d'incertitudes qui peuvent être réduites à court terme avec un budget raisonnable, tandis que les incertitudes aléatoires, dévolues aux aléas naturels, sont considérées comme irréductibles. Une courbe de fragilité sismique n'est donc pas, à proprement parler, une courbe unique – c'est-à-dire une courbe moyenne –, mais une famille de courbes qui reflète l'incertitude sur la courbe moyenne due à une certaine méconnaissance de la structure d'intérêt et de son environnement. Par souci de simplification, dans la suite, le vocable « courbe de fragilité » sera souvent utilisé, mais il faudra avoir à l'esprit qu'il s'agit d'une « famille de courbes de fragilité ».

Depuis les années 1980, de nombreuses techniques ont été développées pour estimer de telles courbes, le plus souvent au sens de courbes de fragilité moyennes, c'est-à-dire en ne faisant pas de distinction entre les deux types d'incertitudes (voir par exemple les références [7] à [10]). Par ailleurs, différentes sources de données peuvent être exploitées pour leurs estimations, allant du retour d'expérience post-séismes, aux essais sur tables vibrantes en passant par les calculs numériques menés avec des modèles de niveaux de fidélité variés. Le point commun à toutes ces sources de données est qu'elles sont de tailles relativement limitées par rapport aux quantités que l'on cherche à estimer. Il s'agit donc là de la principale contrainte de ce type d'étude.

Dans ce paragraphe, c'est une méthodologie fondée sur les simulations numériques qui sera principalement abordée, en considérant les codes de calculs comme des « boîtes noires » auxquelles on ne peut faire appel qu'un nombre limité de fois afin de réduire les temps d'estimation. L'approche proposée repose sur l'usage de modèles de substitution de ces codes, également appelés métamodèles. Dans le cas présent, la technique de régression par processus gaussien est retenue. Cette approche est plébiscitée ici en raison de ses capacités prédictives et de sa capacité à quantifier l'incertitude du modèle de substitution [11]. Les processus gaussiens ont, par exemple, déjà été utilisés pour des applications en thermohydraulique pour les études de sécurité des centrales nucléaires [12] ou en hydrogéologie pour le transport de radionucléides dans les eaux souterraines [13].

### Définition du problème

Les incertitudes aléatoires sont, ici, supposées uniquement liées aux mouvements stochastiques du sol. Pour en rendre compte, un générateur synthétique de mouvements du sol est utilisé qui permet d'enrichir un ensemble de signaux sismiques réels sélectionnés dans une base de données, pour un scénario sismique donné, défini par un couple magnitude

(M)/distance source-site (R). Ce processus est rendu nécessaire, car les bases de données de signaux réels ne sont en général pas assez riches pour estimer les quantités statistiques d'intérêt avec « précision ». Le générateur choisi dans ce travail est fondé sur un bruit blanc gaussien – processus purement aléatoire – modulé, filtré et calibré à partir de signaux réels (voir [14] et [10]). La méthodologie proposée est toutefois indépendante du générateur retenu. Sous réserve de satisfaire certaines hypothèses rappelées dans [15], il est courant, dans les études, de résumer l'aléa sismique à une mesure d'intensité (*intensity measure*), qui est la variable en fonction de laquelle les courbes de fragilité sont exprimées. La mesure d'intensité la plus communément considérée est alors une valeur scalaire obtenue à partir de signaux sismiques comme l'accélération maximale du sol (*peak ground acceleration*). Dans la suite, on notera  $a$  cette valeur scalaire.

Les incertitudes épistémiques sont, ici, relatives aux propriétés mécaniques du modèle de la structure. Elles sont désignées par le vecteur  $\mathbf{x} \in \mathcal{X} \subset \mathbb{R}^d$ ,  $d$  étant le nombre de paramètres incertains du problème.

On appelle  $z(a, \mathbf{x})$  la réponse de la structure (qui s'exprime sous la forme d'un déplacement, d'une contrainte, etc.) sur laquelle porte le critère de défaillance  $C$  que l'on considère ici comme déterministe. Cette réponse dépend de l'amplitude de l'excitation et des propriétés mécaniques incertaines de la structure. La courbe de fragilité, notée  $\Psi(a, \mathbf{x})$ , est alors définie par :

$$\Psi(a, \mathbf{x}) = \mathbb{P}(z(a, \mathbf{x}) > C | A = a, \mathbf{X} = \mathbf{x}) \quad (1),$$

où  $A$  est la variable aléatoire à valeur réelle de la mesure de l'intensité sismique et  $\mathbf{X}$  le vecteur aléatoire des paramètres mécaniques de la structure. On voit apparaître avec cette définition la notion de famille de courbes de fragilité dans la mesure où cette équation stipule qu'à chaque tirage des variables aléatoires  $\mathbf{x}$  est associée une courbe de fragilité.

Un modèle statistique fréquemment utilisé pour représenter  $z(a, \mathbf{x})$  est le modèle log-normal suivant [16] :

$$\log(z(a, \mathbf{x})) = g(a, \mathbf{x}) + \varepsilon(a, \mathbf{x}) \quad (2),$$

où  $g(a, \mathbf{x})$  est une fonction de régression et  $\varepsilon(a, \mathbf{x}) \sim \mathcal{N}(0, \sigma_\varepsilon^2(a, \mathbf{x}))$  est un bruit blanc gaussien de moyenne nulle et de variance  $\sigma_\varepsilon^2(a, \mathbf{x})$ . Ainsi, en introduisant l'équation du modèle (2) dans l'équation (1), l'expression de la courbe de fragilité est obtenue :

$$\Psi(a, \mathbf{x}) = \Phi\left(\frac{g(a, \mathbf{x}) - \log(C)}{\sigma_\varepsilon(a, \mathbf{x})}\right),$$

où  $\Phi$  est la fonction de répartition de la distribution gaussienne standard.



## Estimation des courbes de fragilité sismique à l'aide d'un processus gaussien

### Principe

Le principe de la démarche proposée ici consiste à supposer que la fonction de régression  $g(a, \mathbf{x})$  est une réalisation d'un processus gaussien, noté  $G(a, \mathbf{x})$ . Ce faisant, la réponse de la structure  $y(a, \mathbf{x}) = \log(z(a, \mathbf{x}))$  devient elle-même un processus gaussien que l'on note  $Y(a, \mathbf{x})$ , soit :

$$Y(a, \mathbf{x}) = G(a, \mathbf{x}) + \varepsilon(a, \mathbf{x}) \quad (3)$$

Pour définir complètement le problème, il « suffit » alors de spécifier la fonction de corrélation de  $G$  – dont il existe plusieurs modèles dans la littérature – ainsi que la nature du bruit  $\varepsilon$ .

L'égalité (3) stipule qu'à une réalisation du processus  $G$  correspond une infinité de réalisations du processus  $Y$ , du fait du bruit aléatoire  $\varepsilon$ . Ce bruit est irréductible en pratique, car il reflète le fait qu'il existe une infinité de réponses possibles de la structure pour une valeur d'intensité sismique  $a$ . Autrement dit, l'excitation sismique ayant été réduite à un unique scalaire  $a$ , il existe une infinité de réalisations de l'excitation qui possède la même intensité  $a$ . Cette irréductibilité du bruit a pour conséquence l'obtention d'une probabilité de défaillance pour chaque valeur de  $a$ , ce qui constitue la courbe de fragilité. Par ailleurs,  $G$  étant un processus aléatoire, celui-ci possède également sa variabilité propre. Cette variabilité a cependant vocation à diminuer avec la taille de la base d'apprentissage, c'est-à-dire avec le nombre de calculs mécaniques qu'il est possible de mettre en œuvre dans un temps donné.

### Choix du modèle du bruit $\varepsilon$

Concernant la nature du bruit, on va tout d'abord supposer qu'il dépend essentiellement de l'intensité de l'excitation sismique  $a$  c'est-à-dire que  $\sigma_\varepsilon^2(a, \mathbf{x}) = \sigma_\varepsilon^2(a)$ . Cette hypothèse trouve sa justification dans le fait que la variance du bruit est principalement gouvernée par le niveau de non-linéarité de la structure d'intérêt, lequel dépend, en premier lieu, du niveau de l'excitation. À cela s'ajoute également le fait que le contenu fréquentiel de l'excitation évolue avec son intensité.

Ensuite, pour choisir le modèle de dépendance en  $a$ , l'application du principe de parcimonie a pour conséquence un choix de modèle peu paramétré. C'est un choix pragmatique qui est justifié dans un contexte où peu de données sont disponibles, car peu d'appels aux codes de calculs sont possibles en pratique. Le modèle le plus simple est le modèle homoscédastique, c'est-à-dire le modèle pour lequel la variance est constante et ne dépend pas de  $a$ . Parmi les modèles hétéroscédastiques, le modèle à dépendance linéaire sera celui qui requiert le nombre le plus faible de paramètres.

De manière générique, la variance du bruit sera notée sous la forme  $\sigma_\varepsilon^2(a, \mathbf{x}) = \varphi^2(a; \Theta)$ ,  $\Theta$  étant le vecteur des paramètres du modèle de bruit.

Bien évidemment, le choix du modèle de bruit aura une influence plus ou moins marquée sur les résultats des estimations selon les cas d'étude. Pour pouvoir faire un choix « éclairé », une méthodologie qui permettra d'identifier le meilleur modèle parmi ceux « raisonnablement » retenus sera mise en place. Il s'agit là de la principale difficulté de ce type d'approche, qui fait partie des sujets de recherche très actifs à l'heure où ces lignes sont écrites. Nous n'évoquons pas ici les tests statistiques qui permettront d'objectiver le choix du modèle (voir [20] pour de plus amples détails à ce sujet).

### Choix de la fonction de corrélation

Dans ce travail, nous avons fait l'hypothèse que le processus  $G$  est un processus gaussien à moyenne nulle avec une fonction de covariance Matérn stationnaire anisotrope tensorisée 5/2, paramétrée par une intensité  $\sigma$  et  $d + 1$  longueurs de corrélation. L'usage de cette fonction de covariance est motivé par le fait qu'elle couvre un grand nombre d'applications. Avec une telle fonction de covariance, le processus gaussien est différentiable deux fois au sens du carré moyen, ce qui est un bon compromis entre la régularité de la fonction de régression et la rareté potentielle des données. Différentes fonctions de covariance peuvent en fait être testées afin de sélectionner la meilleure par rapport à des métriques de validation. Dans la référence [3], un *benchmark* est proposé à ce sujet.

### Identification des paramètres

En pratique, c'est à partir d'un échantillon  $\mathcal{D}_n = ((a_i, \mathbf{x}_i), y(a_i, \mathbf{x}_i))$ ,  $1 \leq i \leq n$  de la réponse de la structure que sont identifiés les paramètres sous-jacents – aussi appelés hyper-paramètres – à la fonction de corrélation du processus  $G$  et du modèle de bruit. Ce faisant, et c'est la force de la méthode, il est possible de définir explicitement les distributions des processus  $Y$  et  $G$  conditionnellement aux données observées  $\mathcal{D}_n$  – aussi appelées distributions a posteriori de  $Y$  et  $G$  – soit :

$$Y_n(a, \mathbf{x}) = (Y(a, \mathbf{x}) | \mathcal{D}_n) \sim \mathcal{N}(m_n(a, \mathbf{x}), \sigma_n^2(a, \mathbf{x}))$$

$$G_n(a, \mathbf{x}) = (G(a, \mathbf{x}) | \mathcal{D}_n) \sim \mathcal{N}(m_n(a, \mathbf{x}), s_n^2(a, \mathbf{x}))$$

où  $m_n(a, \mathbf{x})$  et  $\sigma_n^2(a, \mathbf{x})$  sont données par ce que l'on appelle les équations de Krigeage [11], avec  $\sigma_n^2(a, \mathbf{x}) = s_n^2(a, \mathbf{x}) + \sigma_\varepsilon^2(a, \mathbf{x}) = s_n^2(a, \mathbf{x}) + \varphi^2(a; \Theta_n)$ .

### Définitions des courbes de fragilité

À partir des deux processus précédents, il est possible de définir deux familles de courbes de fragilité. Ces deux familles visent à rendre compte (i) des incertitudes épisté-

miques, d'une part, et (ii) des incertitudes épistémiques et de l'incertitude du processus gaussien, d'autre part. Cela permettra de faire clairement la part des choses entre l'effet des incertitudes épistémiques et l'effet de l'incertitude de modèle – qui a vocation à diminuer à mesure que  $n$  augmente – sur l'estimation de la courbe de fragilité.

Ainsi, on définit tout d'abord la famille de courbes de fragilité  $\Psi^{(1)}(a, \mathbf{x})$  qui ne dépend que des variables épistémiques  $\mathbf{X}$ . Il s'agit de la famille de courbes relative au processus  $Y_n$  lui-même, à savoir :

$$\begin{aligned}\Psi^{(1)}(a, \mathbf{x}) &= \mathbb{P}(Y_n(A, \mathbf{X}) > \log(C) | A = a, \mathbf{X} = \mathbf{x}) \\ &= \Phi\left(\frac{m_n(a, \mathbf{x}) - \log(C)}{\sigma_n(a, \mathbf{x})}\right)\end{aligned}$$

Ensuite, on définit la famille de courbes de fragilité  $\Psi^{(2)}(a, \mathbf{x})$  qui dépend à la fois des variables épistémiques  $\mathbf{X}$  et de l'incertitude du processus  $G_n$  au travers de ses réalisations, soit :

$$\begin{aligned}\Psi^{(2)}(a, \mathbf{x}) &= \mathbb{P}(Y_n(A, \mathbf{X}) > \log(C) | A = a, \mathbf{X} = \mathbf{x}, G_n) \\ &= \Phi\left(\frac{G_n(a, \mathbf{x}) - \log(C)}{\varphi(a; \Theta_n)}\right)\end{aligned}$$

En pratique, en effet, on simule  $P$  réalisations de  $G_n$ ,  $G_{n,p}(a, \mathbf{x})$ ,  $1 \leq p \leq P$  qui, à leur tour, permettent de générer  $P$  réalisations,  $\Psi^{(2)}(a, \mathbf{x})$ ,  $1 \leq p \leq P$ , de  $\Psi^{(2)}(a, \mathbf{x})$  :

$$\Psi_p^{(2)}(a, \mathbf{x}) = \Phi\left(\frac{G_{n,p}(a, \mathbf{x}) - \log(C)}{\varphi(a; \Theta_n)}\right)$$

On peut alors vérifier que  $\Psi^{(1)}(a, \mathbf{x})$  est la moyenne de  $\Psi^{(2)}(a, \mathbf{x})$  réalisée sur la distribution de  $G_n$ , c'est-à-dire la moyenne réalisée sur l'ensemble des réalisations de  $G_n$ , soit :

$$\Psi^{(1)}(a, \mathbf{x}) = \mathbb{E}_G(\Psi^{(2)}(a, \mathbf{x}))$$

### Propagation des incertitudes

Pour traduire l'effet des incertitudes sur l'estimation de la courbe de fragilité, nous allons utiliser la notion de quantile étendue aux courbes de fragilités.

Pour la famille de courbes  $\Psi^{(1)}(a, \mathbf{x})$ , le quantile  $q_\gamma(a)$  de niveau  $\gamma \in (0,1)$  est défini par :

$$q_\gamma^{(1)}(a) = \inf_{q \in \mathbb{R}} \left[ \mathbb{P}(\Psi^{(1)}(a, \mathbf{X}) \leq q) \geq \gamma \right]$$

En pratique, l'estimation de cette quantité se fait par une méthode de Monte-Carlo à partir d'un échantillon  $\mathbf{X}_j$ ,  $1 \leq j \leq m$  des variables aléatoires du problème. Ainsi, parmi la famille des  $m$  courbes de fragilité qui sont engendrées par

les  $m$  tirages des variables aléatoires épistémiques, le quantile  $q_\gamma^{(1)}(a)$  est une courbe de fragilité iso-probable, c'est-à-dire de même probabilité de dépassement égale à  $\gamma$  pour toutes les valeurs de  $a$ . Cette courbe quantile traduit donc l'incertitude sur la courbe de fragilité moyenne induite par les variables incertaines du problème mécanique.

De la même façon, à partir des  $P$  réalisations  $\Psi_p^{(2)}(a, \mathbf{x})$  de la courbe  $\Psi^{(2)}(a, \mathbf{x})$  – obtenues à partir de  $P$  réalisations du processus  $G$  – on va définir le quantile  $q_{\gamma_G}^{(2)}(a, \mathbf{X})$ , de niveau  $\gamma_G \in (0,1)$  comme suit :

$$q_{\gamma_G}^{(2)}(a, \mathbf{X}) = \inf_{q \in \mathbb{R}} \left[ \mathbb{P}(\Psi^{(2)}(a, \mathbf{X}) \leq q) \geq \gamma_G \right]$$

Comme ce quantile est paramétré par  $\mathbf{X}$ ,  $q_{\gamma_G}^{(2)}(a, \mathbf{X})$  est en fait une famille de courbes quantiles qui traduit, pour un tirage des variables  $\mathbf{X}$  donné, l'incertitude induite par la variabilité intrinsèque du processus  $G$ . Du fait de sa dépendance aux incertitudes épistémiques  $\mathbf{X}$ , on peut introduire le quantile de niveau  $\gamma_X \in (0,1)$  du quantile  $q_{\gamma_G}^{(2)}(a, \mathbf{X})$ , lui-même obtenu à partir d'un échantillon des variables  $\mathbf{X}$ , à savoir :

$$q_{\gamma_G, \gamma_X}^{(2)}(a) = \inf_{q \in \mathbb{R}} \left[ \mathbb{P}(q_{\gamma_G}^{(2)}(a, \mathbf{X}) \leq q) \geq \gamma_X \right]$$

Ce quantile est donc également une courbe de fragilité iso-probable qui rend compte de toutes les incertitudes du modèle (équation (3)) à savoir, les incertitudes épistémiques et les incertitudes intrinsèques au processus gaussien qui a été utilisé pour la régression.

### Analyse de sensibilité globale

L'analyse de sensibilité globale peut se décliner aux courbes de fragilité. Pour cela, on définit les quantités suivantes :

- La moyenne d'une famille de courbes de fragilité  $\Psi(a, \mathbf{x})$  réalisée sur toutes les variables épistémiques :

$$\bar{\Psi}(a) = \mathbb{E}_X(\Psi(a, \mathbf{X}))$$

- la famille des courbes de fragilité relative à la  $i$ -ième variable aléatoire :

$$\Psi_{X^{(i)}}(a) = \mathbb{P}(Y(A, \mathbf{X}) > \log(C) | A = a, \mathbf{X}^{(i)})$$

- la famille des courbes de fragilité relative à toutes les variables aléatoires à l'exception de la  $i$ -ième, c'est-à-dire obtenu avec  $\mathbf{X}^{(-i)} = (X^{(j)})_{j \neq i}$  qui est un vecteur contenant toutes les variables à l'exception de la  $i$ -ième :

$$\Psi_{X^{(-i)}}(a) = \mathbb{P}(Y(A, \mathbf{X}) > \log(C) | A = a, \mathbf{X}^{(-i)})$$

- la variance intégrée sur un intervalle  $[a_0, a_1]$  de la mesure de l'intensité sismique  $a$  :

$$D = \mathbb{E}_X \left[ \|\Psi(a) - \Psi(a, X)\|_{L^2}^2 \right] = \mathbb{E}_X \left[ \int_{a_0}^{a_1} (\Psi(a) - \Psi(a, X))^2 da \right]$$

Pour chaque variable  $i$ , cela permet de former les indices de sensibilité du premier ordre  $S_i^{FC}$  et les indices de sensibilité totaux  $S_T^{FC}$ , définis par :

$$S_i^{FC} = \frac{1}{D} \int_{a_0}^{a_1} \text{Var}[\mathbb{E}(\Psi_{X^{(i)}}(a) | X^{(i)})] da$$

$$S_T^{FC} = 1 - \frac{1}{D} \int_{a_0}^{a_1} \text{Var}[\mathbb{E}(\Psi_{X^{(-i)}}(a) | X^{(-i)})] da$$

### Résultats d'application

L'exemple d'application considéré dans cette partie est un tronçon de tuyauterie d'un REP dont le modèle numérique a été validé par le biais d'une campagne expérimentale menée sur la table vibrante Azalée du Laboratoire EMSI du CEA Saclay. Les principaux résultats de ce programme expérimental, appelé programme ASG, sont détaillés dans la référence [20]. La figure 34 présente une vue de la maquette montée sur la table vibrante et le modèle éléments finis basé sur une modélisation globale de type poutre réalisé avec le code CEA Cast3M.

Pour cette tuyauterie, la variable d'intérêt est le maximum, en valeur absolue, de la rotation hors plan du coude situé près de l'encastrement (premier coude à gauche de la photo) [21]. Les sources d'incertitudes épistémiques sont les paramètres mécaniques du modèle numérique ainsi que les conditions aux limites. Les propriétés mécaniques ne varient pas le long de la ligne, le module d'Young est, par exemple,

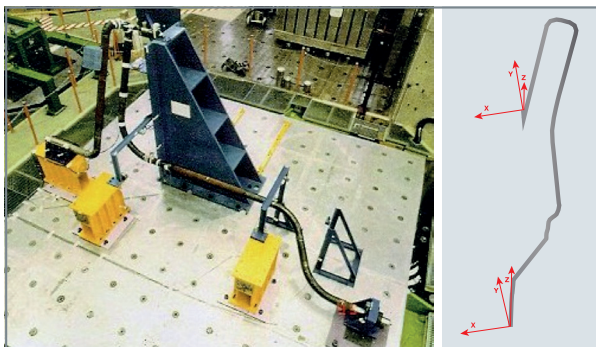


Fig. 34. Tronçon de la ligne de tuyauterie ASG fixé sur la table vibrante Azalée du Laboratoire EMSI (à gauche) et modèle éléments finis du tronçon réalisé avec le code CEA Cast3M (à droite). Une masse additionnelle, représentative d'une vanne, de 120 kg a été installée sur la tuyauterie. Cette masse représente 30 % de la masse totale du tronçon. L'une des extrémités de la ligne est encastree tandis que l'autre est montée dans un tube guide laissant libre le mouvement suivant l'axe

### Focus : Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité consiste à quantifier l'influence des variables d'entrée sur une grandeur de sortie d'un outil de calcul scientifique. Cette information est généralement utilisée pour construire ou orienter des programmes de recherche afin de réduire les incertitudes sur les variables d'entrée les plus influentes avec comme objectif final la réduction des incertitudes sur la grandeur d'intérêt. Les méthodes d'analyse de sensibilité doivent faire appel à l'outil de calcul scientifique plusieurs fois en modifiant les valeurs des variables d'entrée. L'objectif est alors d'utiliser la méthode la plus adaptée pour un « budget » de calculs fixé.

#### Méthodes de criblage

Il existe des méthodes qui permettent de trouver les variables d'entrée qui n'ont pas ou très peu d'influence sur la grandeur d'intérêt pour un nombre faible d'évaluations de l'outil de calcul scientifique. Un des intérêts de ces méthodes est de pouvoir sortir ces variables d'entrée non influentes de l'analyse, et ainsi réduire la dimension du problème, en fixant les valeurs de ces paramètres aux valeurs nominales. De plus, ces méthodes permettent de classer les autres variables, celles qui sont censées avoir une influence sur la sortie, en deux familles suivant le comportement : linéaire ou non linéaire avec ou sans existence d'interactions. On citera les méthodes dites OAT (*one-at-time*) et plus particulièrement la méthode de Morris [17] ou son amélioration proposée par Compolongo [18].

#### Approche quantitative

La décomposition **HDMR** (*high dimensional model representation*) permet de modéliser la contribution d'une variable d'entrée sur la variable de sortie, et ceci indépendamment des autres variables. Sous certaines conditions, on peut alors définir de manière unique des quantités qui mesurent l'influence des variables d'entrée sur la variable de sortie. Cette décomposition permet de proposer des valeurs d'indices, appelés indices de Sobol, pour chacune des variables d'entrée. Cette méthode nécessite de générer des plans d'expérience numériques spécifiques et d'effectuer les post-traitements associés une fois tous les points du plan d'expérience effectués. Il faut donc être en mesure de réaliser tous ces calculs du plan d'expérience de manière automatique [19].

considéré comme aléatoire et constant sur toute la ligne. La masse de la maquette est, quant à elle, considérée comme parfaitement connue. Les incertitudes sur les conditions aux limites traduisent le fait que ce tronçon fait, en réalité, partie d'un système de tuyauterie beaucoup plus vaste. Les dix paramètres incertains retenus sont détaillés dans le tableau 1. Toutes les variables aléatoires associées suivent des distributions de probabilité uniformes. Leurs valeurs moyennes sont prescrites dans le tableau 1 et leurs coefficients de variation – rapports entre l'écart type et la moyenne de chaque variable – sont égaux à 15 %. Toutes les variables sont considérées comme indépendantes les unes des autres. Comme la maquette fait partie d'un système de

Tableau 1.

Variabes aléatoires	Noms	Valeurs moyennes
Module d'Young	E	1,9236 10 <sup>11</sup> Pa
Limite d'élasticité	Sy	300 MPa
Module d'érouissage	H	4,27 10 <sup>8</sup> Pa
Taux d'amortissement	b	1 %
Raideur en rotation Y du guide – Point 151	RYP151	1,1 10 <sup>5</sup> Nm/rad
Raideur en rotation X – Point 29	RXP29	1,0 10 <sup>5</sup> Nm/rad
Raideur en rotation Y – Point 29	RYP29	3,3 10 <sup>5</sup> Nm/rad
Raideur en translation X – Point 29	TXP29	1,0 10 <sup>6</sup> N/m
Raideur en translation Y – Point 29	TYP29	2,0 10 <sup>5</sup> N/m
Raideur en translation Z – Point 29	TZP29	1,0 10 <sup>6</sup> N/m

Liste des variables épistémiques et leurs valeurs moyennes.  
Toutes les variables ont des distributions uniformes avec un coefficient de variation de 15 %. Le point 29 correspond à l'extrémité encastrée du tronçon. Le point 151 correspond à l'extrémité du tronçon qui est située au niveau du guide horizontal.

**Focus : Choix des lois de probabilités**

Il existe un très grand nombre de lois statistiques prédéfinies pour décrire un paramètre incertain, qui peuvent être appelées lois marginales. Ces lois sont généralement caractérisées par deux fonctions intrinsèquement connectées : la « fonction de densité de probabilité » (couramment appelée PDF pour *probability density function*) et la fonction de répartition (couramment appelée CDF pour *cumulative distribution function*). Ces distributions sont définies *via* des paramètres permettant d'obtenir une forme analytique, la PDF étant utilisée préférentiellement par les physiciens quand la fonction de répartition est plus couramment utilisée par les statisticiens [22]. Pour une catégorie de distributions, les paramètres utilisés pour les définir ne limitent pas l'intervalle de définition de leur PDF et de leur CDF : ces distributions sont dites à support infini. Il est toutefois possible de tronquer ces dernières, restreignant alors leur intervalle de définition en imposant une borne inférieure et une borne supérieure. Ce principe est illustré par la figure 35 montrant l'estimation des deux probabilités seuils, permettant de passer d'une loi de probabilité à support infini (à gauche) à sa version tronquée (à droite).

De nombreuses références bibliographiques listent des lois de probabilité communément utilisées, en voici quelques-unes ainsi qu'une rapide description de cas d'utilisation :

- Uniforme, quand tous les événements sont équiprobables ;
- normale, fameuse courbe en cloche définie par sa moyenne ( $\mu$ ) et son écart type ( $\sigma$ ) ;
- log-normale, qui modélise une variable qui serait le produit de plusieurs variables positives et indépendantes ;
- Weibull, forme généralisée de la distribution du temps de vie de composants.

Le choix de la loi de probabilité pour chacune des variables d'entrée n'est pas forcément une fin en soi puisqu'il est possible que certaines variables soient intrinsèquement liées par des relations de différentes natures (relation linéaire ou plus complexe).

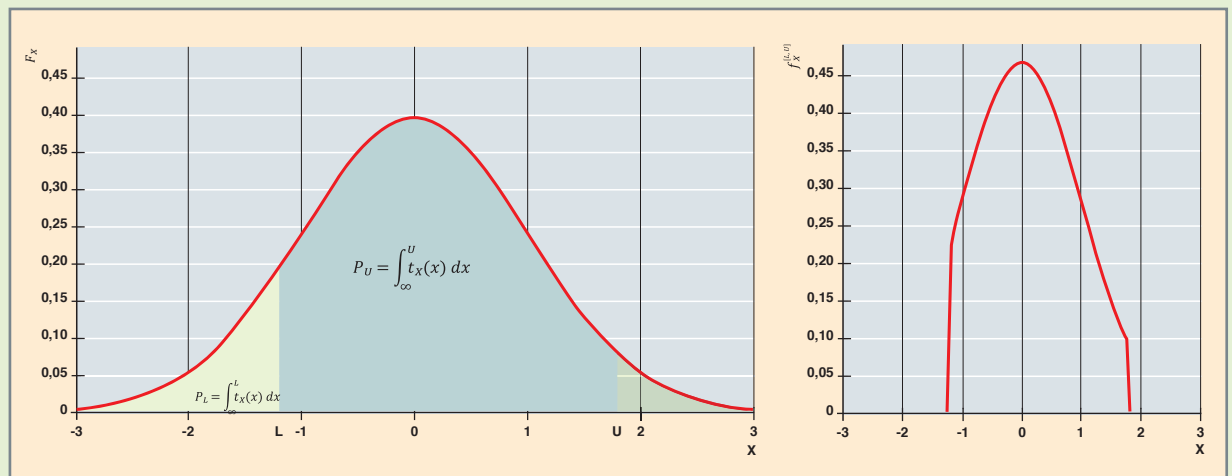


Fig. 35. Principe de la troncature d'une PDF (gaussienne, dont la loi originale est montrée à gauche). Une fois l'estimation des probabilités seuils faite, la nouvelle loi est montrée à droite.

tuyauterie plus important, les valeurs moyennes des paramètres ont été choisies de sorte que le premier mode propre de la maquette corresponde au premier mode propre du tronçon lorsqu'il est couplé à l'ensemble du système de tuyauterie. Nous supposons donc, par souci de simplicité, que la partie du système de tuyauterie à laquelle le tronçon est fixé contribue principalement par sa rigidité.

La tuyauterie est sollicitée, comme lors des essais, dans la direction  $X$  (fig. 38). Comme celle-ci est, en pratique, située dans un bâtiment, les signaux synthétiques utilisés pour les calculs ont été filtrés par un bâtiment monomodal linéaire fictif déterministe de fréquence propre égale à 5 Hz et amorti à 2 %. La mesure d'intensité sismique,  $a$ , retenue dans cette étude, est l'accélération pseudo-spectrale à 5 Hz et 1 % d'amortissement. Pour chaque signal sismique, cette valeur correspond à l'accélération lue à une fréquence de 5 Hz sur leur spectre de réponses d'oscillateurs amortis à 1 %. Par

rapport à l'accélération maximale de chaque séisme, cette mesure d'intensité sismique est, par nature, mieux corrélée avec la réponse de la structure d'intérêt, en l'occurrence ici le tronçon de la ligne de tuyauterie dont la fréquence moyenne du mode dans la direction  $X$  est égale à 5 Hz. Ce choix est censé améliorer, du fait d'une meilleure corrélation, les performances du modèle de substitution.

Deux modèles de bruit ont été retenus, à titre de comparaison, pour cet exemple d'application, un bruit homoscédastique et un bruit hétéroscédastique défini par trois paramètres, et de la forme suivante :

$$\varphi(a, \theta) = \max(\theta_0 + a\theta_1, \theta_2)$$

Deux sous-ensembles de 200 et 500 simulations du modèle mécanique de la tuyauterie ont été considérés pour calibrer le modèle de substitution. À des fins de comparaison,

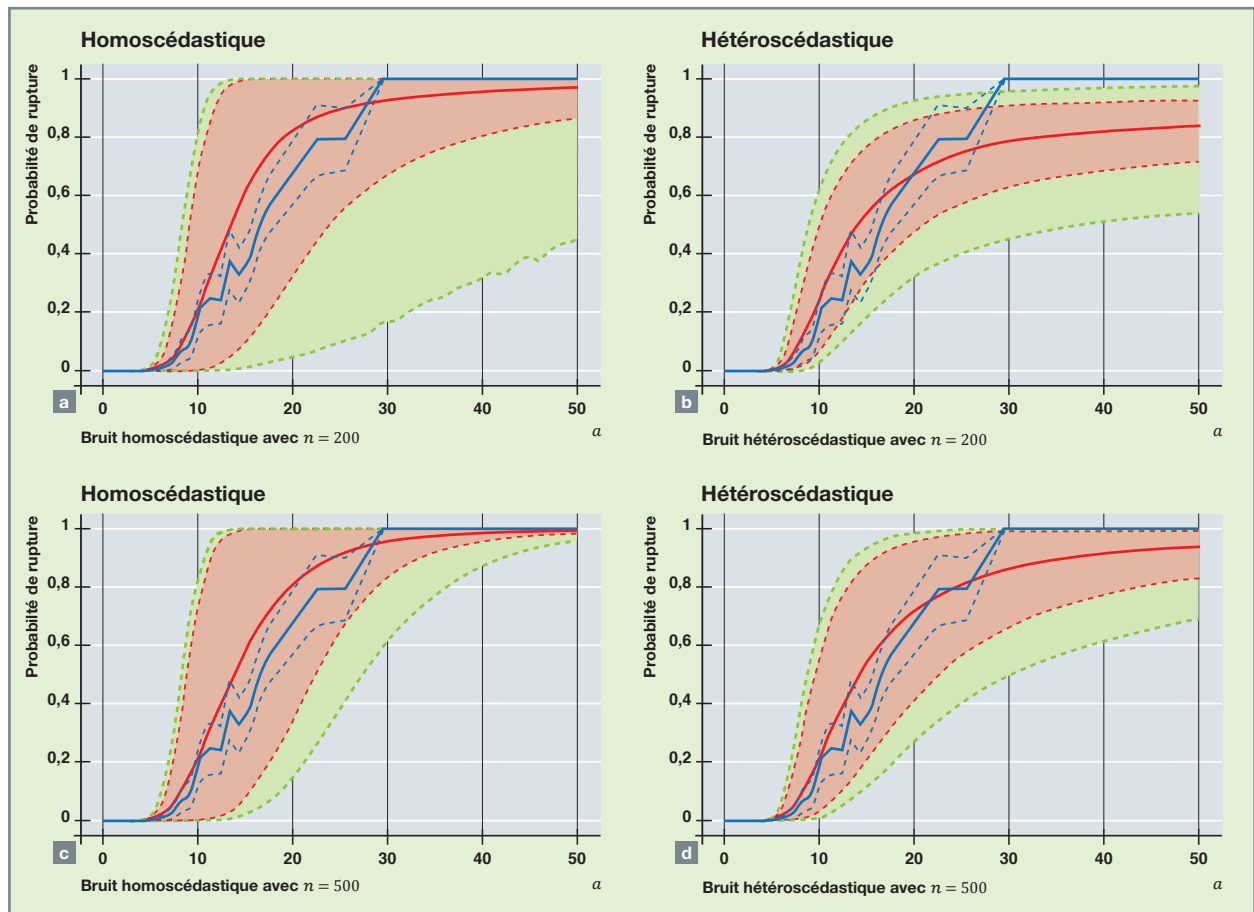


Fig. 36. Résultats des estimations des courbes de fragilité avec des modèles de bruit homoscédastique et hétéroscédastique, des tailles d'échantillons  $n$  égales à 200 et 500 et un critère de défaillance portant sur une rotation excessive du premier coude de la tuyauterie égale à 1 degré. La zone rouge est délimitée par les courbes quantiles  $q_{0,9}^{(1)}(a)$  et  $q_{0,1}^{(1)}(a)$ , tandis que la zone verte est délimitée par les courbes quantiles  $q_{0,9}^{(2)}(a)$  et  $q_{0,1}^{(2)}(a)$ . La courbe en trait continu rouge représente l'estimation de la courbe de fragilité moyenne. La courbe en trait continu bleu est la courbe de référence obtenue à partir de 2 000 calculs et qui est estimée via un partitionnement effectué par un algorithme de k-moyennes. Les traits en pointillés bleus correspondent aux intervalles de confiance estimés dans chaque classe. L'amplitude de ces intervalles est liée à la taille de l'échantillon contenu dans chaque classe.



2 000 calculs ont également été réalisés pour déterminer une courbe de fragilité moyenne de référence. Par souci de concision, nous omettons de présenter les résultats relatifs à l'étude des performances des modèles, lesquels ont mis en avant le fait que le modèle de bruit hétéroscédastique était le meilleur. Pour plus de détails, nous encourageons le lecteur à se diriger vers la référence [3]. Les résultats relatifs à l'estimation des courbes de fragilité sont présentés à la figure 36.

Il est à noter que l'obtention des résultats présentés dans la figure précédente, directement à partir de modèles mécaniques, nécessiterait des moyens de calcul très performants. C'est la raison pour laquelle, la seule comparaison que l'on puisse faire, en pratique, concerne la courbe de fragilité moyenne. De ce point de vue, on peut vérifier que les estimations semblent tout à fait pertinentes. Il faudrait cependant beaucoup plus de 2 000 calculs de référence pour pouvoir en dire plus.

Comme attendu, ces résultats montrent que le bruit de modèle diminue à mesure que la taille de l'échantillon considéré augmente, puisque la différence entre les zones rouge et verte s'amenuise avec le passage de  $n = 200$  à  $n = 500$ . Ils montrent également l'intérêt de considérer des modèles de bruit différents, mais dont les performances doivent être évaluées pour pouvoir choisir, *in fine*, le meilleur d'entre eux et les résultats des estimations associés.

Pour aller plus loin, et c'est aussi l'intérêt de cette méthodologie, la figure 37 et la figure 38 présentent les résultats de l'analyse de sensibilité menée sur un sous-ensemble de six paramètres. Ces figures offrent une comparaison entre les indices de sensibilité du premier ordre et totaux pour les deux modèles de bruit. On constate de faibles écarts entre les résultats fournis par les deux modèles de bruit, mais les hiérarchisations des paramètres sont similaires. Par ailleurs, à modèle de bruit donné, comme les indices du premier ordre et totaux sont équivalents, cela signifie qu'il y a peu d'interactions entre les variables.

Du point de vue de la physique, il est intéressant de noter que c'est la raideur de translation dans l'axe Y (TYP29) qui est la variable la plus influente alors que la tuyauterie est sollicitée dans l'axe X. Ce résultat provient du couplage induit par la géométrie de la ligne entre ces deux directions.

## Conclusion

Une méthodologie globale a été présentée qui permet de traiter d'un point de vue pratique, sur des problèmes concrets, à la fois la question de la quantification des incertitudes et la question de l'analyse de sensibilité pour des courbes de fragilité sismique. Ce genre d'outil est indispensable pour l'ingénieur pour qu'il puisse utiliser les modèles qu'il développe comme des outils d'aide à la décision dans un contexte où l'on ne peut faire abstraction des incertitudes, à commencer par les incertitudes aléatoires. Ces résultats montrent que la modélisation du bruit constitue un enjeu important, notamment dans un contexte où peu de données sont disponibles. Cela fait partie d'un domaine de recherche très actif à l'heure où ces lignes sont écrites.

**Jean-Baptiste BLANCHARD,**  
**Clément GAUCHY, Cyril FEAU,**  
*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*  
**et Fabrice GAUDIER,**  
*CEA-List*

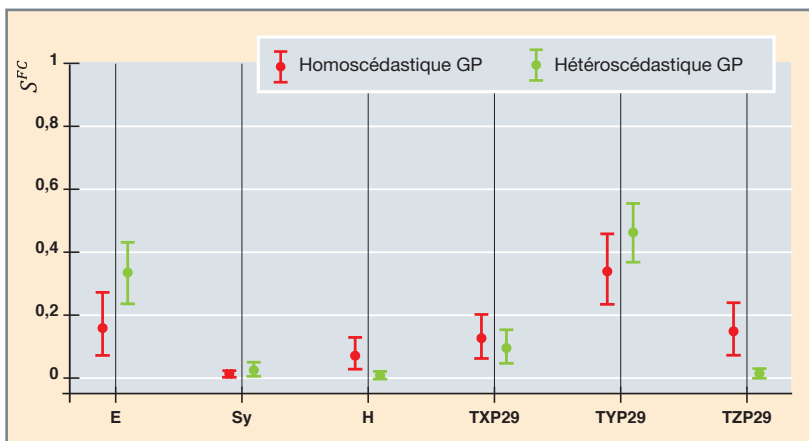


Fig. 37. Indices de sensibilité du premier ordre. Comparaison entre les résultats obtenus avec les deux modèles de bruit. À ces estimations sont associés des intervalles de confiance qui ont été obtenus par une technique de *bootstrap*.

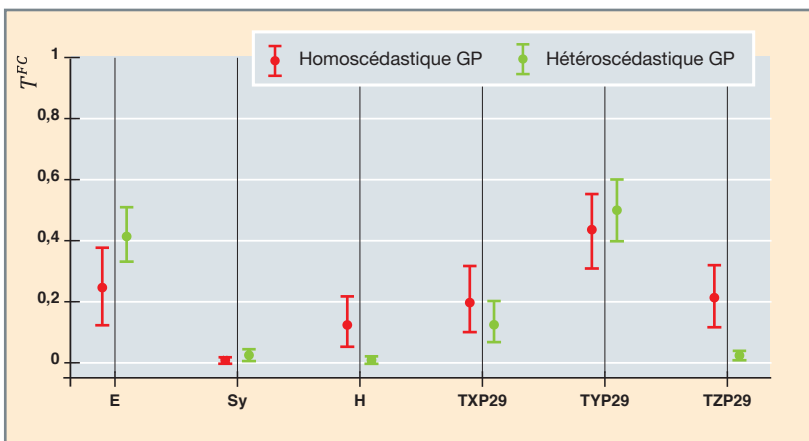


Fig. 38. Indices de sensibilité totaux. Comparaison entre les résultats obtenus avec les deux modèles de bruit. À ces estimations sont associés des intervalles de confiance qui ont été obtenus par une technique de *bootstrap*.

## ► Références

- [1] T. G. TRUCANO, L. PAINTON SWILER, T. IGUSA, W. L. OBERKAMPF and M. PILCH, "Calibration, validation, and sensitivity analysis : What's what", *Reliability Engineering & System Safety*, 91(10-11):1331-1357, 2006.
- [2] E. DE ROCQUIGNY, N. DEVICTOR and S. TARANTOLA, *Uncertainty in industrial practice : a guide to quantitative uncertainty management*, John Wiley & Sons, 2008.
- [3] C. GAUCHY, C. FEAU and J. GARNIER, "Uncertainty quantification and global sensitivity analysis of seismic fragility curves using kriging", *International Journal for Uncertainty Quantification*, 14(4):39-63, DOI : 10.1615/Int.J.UncertaintyQuantification.2023046480, 2024.
- [4] R. KENNEDY and M. RAVINDRA, "Seismic fragilities for nuclear power plant risk studies", *Nuclear Engineering and Design*, 79(1):47-68, 1984.
- [5] J. BAKER and C. CORNELL, "Uncertainty propagation in probabilistic seismic loss estimation", *Structural Safety*, 30:236-252, 2008.
- [6] A. DER KIUREGHIAN and O. DITLEVSEN, "Aleatory or epistemic ? Does it matter ?", *Structural Safety*, 31(2):105-112, March 2009.
- [7] M. SHINOZUKA, M.Q. FENG, J. LEE and T. NAGANUMA, "Statistical analysis of fragility curves", *Journal of Engineering Mechanics*, 126(12):1224-1231, 2000.
- [8] D. LALLEMANT, A. KIREMIDJIAN and H. BURTON, "Statistical procedures for developing earthquake damage fragility curves", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(9):1373-1389, 2015.
- [9] K. TREVLOPOULOS, C. FEAU and I. ZENTNER, "Parametric models averaging for optimized non-parametric fragility curve estimation based on intensity measure data clustering", *Structural Safety*, 81:101865, 2019.
- [10] R. SAINT, C. FEAU, J.-M. MARTINEZ and J. GARNIER, "Efficient methodology for seismic fragility curves estimation by active learning on Support Vector Machines", *Structural Safety*, 86:101972, September 2020.
- [11] C.K. WILLIAMS and C.E. RASMUSSEN, *Gaussian processes for machine learning*, MIT press Cambridge, MA, 2006.
- [12] A. MARREL, B. IOOSS and V. CHABRIDON, "The ICSCREAM methodology : Identification of penalizing configurations in computer experiments using screening and metamodel – applications in thermal-hydraulics", *Nuclear Science and Engineering*, 0(0):1-21, 2021.
- [13] A. MARREL, B. IOOSS, F. VAN DORPE and E. VOLKOVA, "An efficient methodology for modeling complex computer codes with gaussian processes", *Computational Statistics & Data Analysis*, 52(10):4731-4744, 2008.
- [14] S. REZAEIAN and A. DER KIUREGHIAN, "Simulation of synthetic ground motions for specified earthquake and site characteristics", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 39(10):1155-1180, 2010.
- [15] A. CORNELL, "Hazard, ground motions and probabilistic assessments for PBSD", *Proceedings of the International Workshop on Performance-Based Seismic Design – Concepts and Implementation*, pp. 39-52, University of California, Berkeley, PEER Center, 2004.
- [16] A.P. KYPRIOTI and A.A. TAFLANIDIS, "Kriging metamodeling for seismic response distribution estimation", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 50(13):3550-3576, 2021.
- [17] D. MORRIS and J. MITCHELL, "Exploratory designs for computational experiments", *Journal of Statistical Planning and Inference*, 43:381-402, 1995.
- [18] F. CAMPOLONGO and JESSICA CARIBONI, "Sensitivity analysis : how to detect important factors in large models", *Institute for the Protection and Security of the Citizen*, 31, 2007.
- [19] J-B. BLANCHARD, G. DAMBLIN, J-M. MARTINEZ, G. ARNAUD and F. GAUDIER, "The Uranie platform : an open-source software for optimisation, meta-modelling and uncertainty analysis", *EPJ Nuclear Sci. Technol.*, 5:4, 2019.
- [20] F. TOUBOUL, P. SOLLOGOUB, and N. BLAY, "Seismic behaviour of piping systems with and without defects : experimental and numerical evaluations", *Nuclear Engineering and Design*, 192(2):243-260, 1999.
- [21] F. TOUBOUL, N. BLAY, P. SOLLOGOUB and S. CHAPULIOT, "Enhanced seismic criteria for piping", *Nuclear Engineering and Design*, 236(1):1-9, 2006.
- [22] W. APPEL, *Probabilité pour les non-probabilistes*, H & K, Paris, 2013.
- [23] R. KENNEDY, C. CORNELL, R. CAMPBELL, S. KAPLAN and H. PERLA, "Probabilistic seismic safety study of an existing nuclear power plant", *Nuclear Engineering and Design*, 59(2):315-338, 1980.

# La démarche « jumeaux numériques »

## Définition et usages

Le jumeau numérique (JN) constitue une représentation numérisée « vivante », d'un objet physique à toutes les étapes de son cycle de vie. Plus qu'une simple maquette 3D généralement statique, le JN permet un couplage dynamique entre l'objet physique et sa représentation numérique, grâce à des mécanismes de synchronisation continue, *via* la collecte et l'interprétation de données/mesures en temps réel sur l'objet.

Le concept de JN est né au sein de l'industrie aérospatiale. La courte définition qu'elle en fait est la suivante : « *A Digital Twin is a virtual representation of a connected physical asset* » [1]. Une représentation en est également proposée, reproduite en figure 39.

Le JN désigne une représentation fidèle d'un système complexe, qui permet de l'appréhender sous ses différents aspects (conception, cycle de vie, évolutions, formation...). Il rassemble l'ensemble des connaissances, des données et des outils de simulations du système et de ses composants. Il s'appuie sur les outils existants, mais ne les remplace pas,

visant plutôt à les rassembler, en mettant en œuvre les échanges de données nécessaires, entre ces outils, mais également avec le système réel : l'interopérabilité, la modularité et la performance des outils sont donc des enjeux indissociables de la notion de JN.

## Objectifs et enjeux

Le JN répond à des enjeux pouvant être très nombreux et diversifiés, car ses applications dans l'industrie, la recherche et les services sont très larges. S'il est ainsi difficile d'en dresser une liste exhaustive, du fait d'une trop grande dépendance aux caractéristiques du système représenté, nous indiquons toutefois ci-après les principaux enjeux auxquels le JN doit répondre (cf. fig. 40).

Du fait de sa capacité à agréger l'ensemble des données et connaissances sur un système physique (fonctionnement et exploitation, modèles/modélisations et hypothèses, contrôles périodiques, évolutions, essais...), le JN permet de fournir une base de modèles qualifiés et validés. Il facilite en outre la collaboration entre des experts métiers et la communication

avec des exploitants ou des décideurs, grâce à ses capacités d'études de multiples scénarios. Dans le cadre d'une installation, il peut par exemple permettre de réduire les durées d'investigation ou fournir des simulations de modes dégradés de fonctionnement ou de cas impossibles à tester dans la réalité.

Outre son utilité évidente en phase de conception (par exemple conception optimisée par la simulation), le JN permet de gérer l'ensemble des opérations d'intervention sur le système réel, non seulement en les traçant et les répercutant sur l'objet virtuel, mais également en permettant de réaliser des analyses prédictives visant à anticiper et planifier les maintenances et réparations. Ainsi, il peut permettre de réduire ou optimiser les coûts d'exploitation, et aider à la décision pour les évolutions du système.

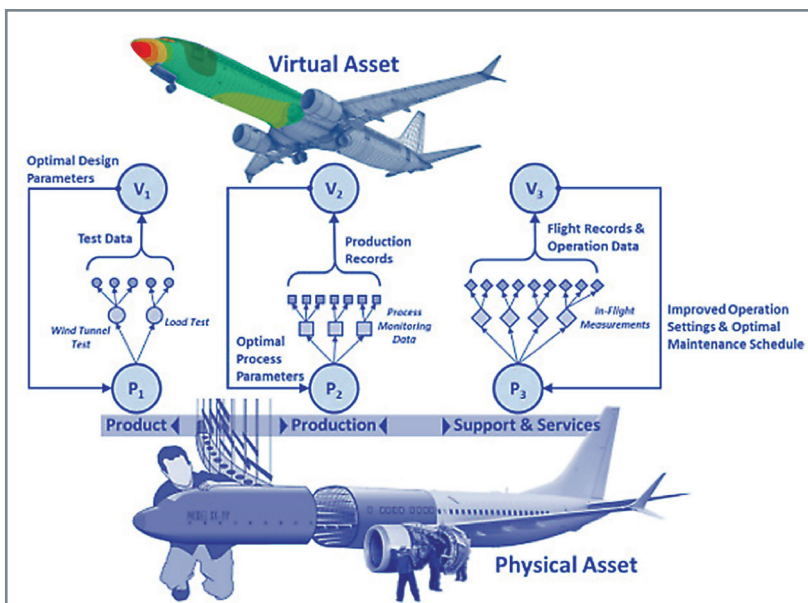


Fig. 39. Représentation du concept de jumeau numérique proposée par l'industrie aérospatiale [1].

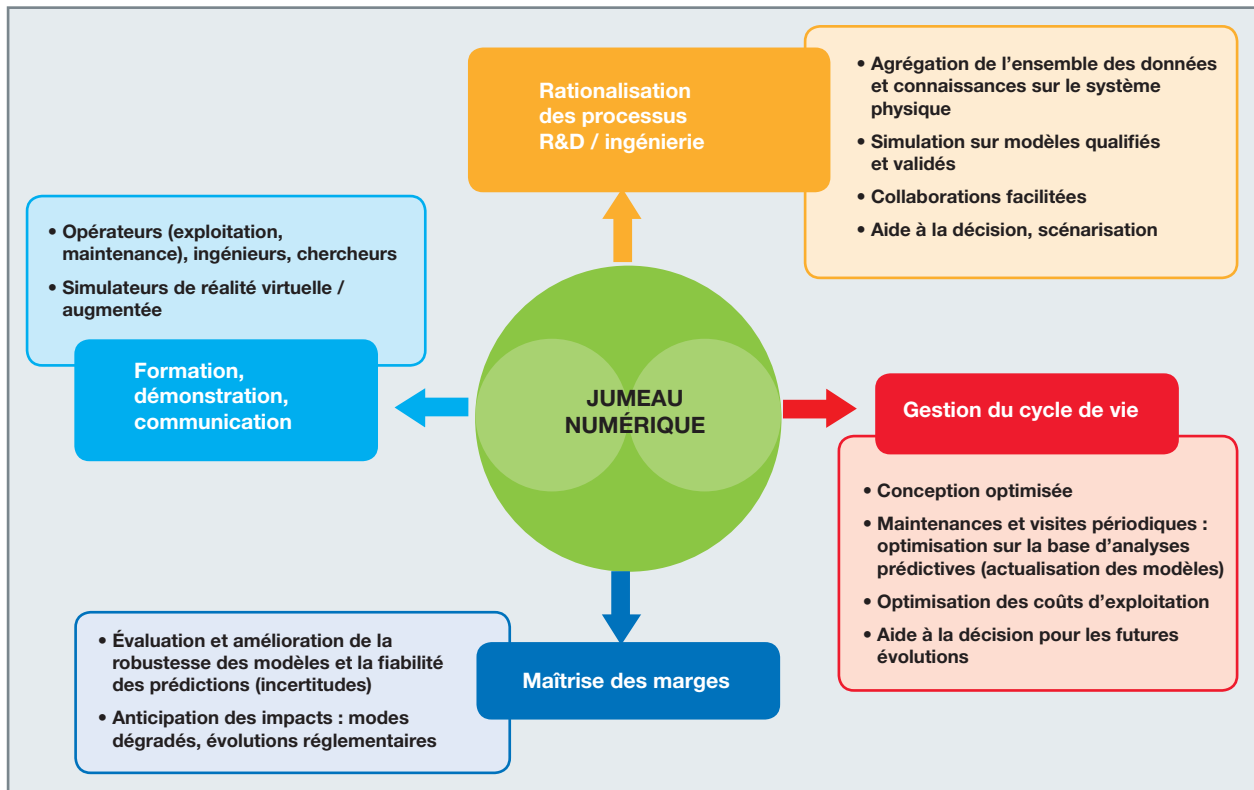


Fig. 40. Principaux enjeux associés au jumeau numérique.

Enfin, les marges d'exploitation peuvent présenter des enjeux économiques importants et les marges de sécurité/sûreté peuvent être régulièrement questionnées avec l'évolution des normes et des réglementations. Par le biais des outils mis en œuvre et appuyés par les données et connaissances en constante évolution qu'il agrège, le JN offre la possibilité de faire progresser la fidélité des modèles et simulations, de répondre à des évolutions réglementaires et de simuler des modes dégradés non accessibles *via* des objets réels. Les marges mises en place pour pallier les incertitudes et les phénomènes mal maîtrisés peuvent ainsi être réévaluées au regard des progrès accomplis sur la fiabilité des modèles du JN.

## Implications technologiques/ techniques

La réalisation d'un JN nécessite la maîtrise de nombreux domaines techniques pour répondre aux enjeux précédents :

- Collecte de grands volumes de données, ainsi que leur stockage à plus ou moins long terme, si besoin de « rejouer » à volonté les études ou simulations numériques reposant sur ces données ;

- algorithmique performante pour le traitement des gros volumes de données en continu à des fins d'identification, calibration, interprétation ;
- outils logiciels permettant de synchroniser les modèles physique et numérique en continu (par exemple pour un dialogue essais-calculs en temps réel) ;
- simulations performantes (par exemple HPC) pour vérifier, évaluer, prédire l'évolution du modèle physique pour, si besoin, procéder à des mesures correctives (par exemple réparations, etc.) ;
- approches « rapides » pour l'analyse en temps réel, la quantification des incertitudes et l'aide à la décision (méthodes de réduction de modèle).

La constitution d'un JN peut être décomposée selon trois grands ensembles : **la (ou les) plateforme(s) de calculs/simulations, les données et les outils pouvant être qualifiés de transversaux**. Cette décomposition, assez artificielle, ne reflète pas nécessairement l'architecture d'un JN, mais est un choix des auteurs pour mieux décrire son concept.



## La (ou les) plateforme(s) de calculs

Le vocable « **plateforme de calculs** » regroupe l'ensemble des outils permettant de **calculer et simuler la réponse du système sous une grande multiplicité de scénarios d'étude**. La plateforme de calculs s'appuie sur des modèles numériques pour représenter la (les) physique(s) sous-jacente(s) aux phénomènes à étudier, mais couvre également tous les outils nécessaires à une simulation numérique, de la mise en données du problème à l'analyse des résultats, en passant bien sûr par les solveurs de calcul.

La plateforme de calcul peut être unique, mais peut également agréger plusieurs plateformes distinctes si les physiques à adresser sont multiples et complexes.

Dans le cadre de la présente monographie sur la mécanique des structures, nous illustrerons ce propos, à titre d'exemple, par une vision centrée sur une **plateforme de calculs mécaniques**. Elle peut être composée de différents modules synthétisés dans le tableau 2 ci-après.

Le module « **Modélisation géométrique** » regroupe l'import ou la création des données géométriques soit sous la forme d'un modèle numérique de type CAO, soit sous la forme de nuages de points. Ce module est généralement associé à la possibilité de créer une représentation discrétisée sous forme de maillages surfaciques et volumiques utilisables ensuite par les outils de simulation (éléments finis, volumes finis, etc.).

Le module « **Matériaux constitutifs** » regroupe la gestion des propriétés des matériaux constitutifs en lien avec leurs comportements mécaniques (linéaires, viscoplastiques, en fatigue/rupture, anisotropes...). Il inclut également la mise en œuvre de lois physiques et de modèles de comportement, permettant de relier entre elles les variables associées au comportement des matériaux, dans de multiples domaines de la mécanique (fatigue, rupture, usure, gonflement, fluage, vibrations, chocs...).

Le module « **Modélisation numérique** » recouvre à la fois les outils de mise en données du problème, les modèles physiques sous-jacents, les solveurs numériques et les

outils de post-traitement. De plus, il doit pouvoir **communiquer/interagir avec d'autres outils d'analyse de la plateforme de calculs ou d'autres plateformes de calculs**. C'est typiquement le cas des **analyses multi-physiques** pour lesquelles un couplage faible ou fort de divers outils est nécessaire. C'est par exemple le cas des simulations mécaniques dont les conditions aux limites ou initiales dépendent de données elles-mêmes issues de simulations thermohydrauliques, neutroniques, etc. On peut également citer le cas des **analyses multi-échelles**. Enfin, dans une démarche de vérification et validation, ainsi que de quantification des incertitudes notamment épistémiques, il est souhaitable de pouvoir interchanger différents solveurs au sein de la plateforme. À ces trois modules de base peuvent s'agréger des modules complémentaires, en lien avec :

1. L'évaluation, l'analyse et la gestion des incertitudes (quantification, analyses de sensibilité), voire avec l'optimisation dans un objectif de réduction de ces incertitudes ;

2. des post-traitements spécifiques lorsqu'il s'agit de comparer la réponse d'une structure à des critères d'acceptabilité. C'est le cas lorsque des composants relèvent de réglementations, codifications, certifications ou normes spécifiques, ou encore à des règles d'exploitation ou de fonctionnement particulières. Un traitement particulier des résultats doit alors être réalisé. Celui-ci peut reposer sur des méthodologies complexes et éprouvées (avec des validations s'appuyant bien souvent sur des programmes expérimentaux).

Il peut également être souhaitable que les capacités de modélisation et de calculs soient utilisées dans le cadre de simulateurs, pour de la formation d'opérateurs ou l'étude de scénarios complexes, mais également en substitution d'un composant défaillant. Le **besoin de temps réel** peut ainsi constituer l'un des enjeux de performance des modèles de simulation et orienter les méthodes à mettre en œuvre au sein de la plateforme. Ce besoin ainsi que la complexité inhérente aux modèles peuvent par exemple nécessiter le recours à des **méthodes hautes performances (HPC, HPDA...)** à la fois pour la mise en données, les calculs et les post-traitements associés.

Tableau. 2.

Modules et fonctions usuelles constituant une plateforme de calculs mécaniques.

Modélisation géométrique	Matériaux constitutifs	Matériaux constitutifs
<ul style="list-style-type: none"><li>• Import/création de données géométriques (digitalisation modèles CAO)</li><li>• Création de maillages pour la simulation</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Base de données (propriétés physiques)</li><li>• Lois physiques et modèles de comportement mécaniques</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mise en données</li><li>• Calculs de la réponse des composants du JN (incluant les interactions éventuelles), sous sollicitations statiques et/ou dynamiques</li><li>• Post-traitements</li></ul>

Par ailleurs, et afin d'éviter une méprise par une vision volontairement centrée ici sur une seule physique pour l'exemple, il faut insister sur le **caractère généralement multi-physique de la plateforme de calculs**, inhérent à la notion de système complexe. Ainsi, la plateforme de calcul doit intégrer dans sa constitution le dialogue et les interactions entre les différentes physiques à traiter pour viser à la compréhension du système dans sa globalité.

---

### Les données

La structuration des données est au cœur du JN, mais il est difficile de présenter de manière exhaustive l'ensemble des acceptions que recouvre ce terme, tant les applications potentielles sont larges. On peut toutefois citer :

- L'ensemble des **référentiels et exigences réglementaires** auquel est soumis le système. Leur actualisation est soit subie (évolution d'une réglementation par exemple), soit imposée par le retour d'expérience en exploitation, mais doit constamment être prise en compte dans les évolutions du cycle de vie du système : l'adéquation de modifications du système au contexte réglementaire doit pouvoir être démontrée et l'utilisation du jumeau numérique est un moyen d'accéder à ce type de démonstration. Il en est de même pour des études visant à améliorer les démonstrations de sûreté/sécurité dans un contexte évolutif ;
- les **maquettes numériques**, qu'elles s'appuient sur des plans digitaux/digitalisés, des scans 3D d'installations industrielles, des modèles CAO... L'unification de ces données et de leur accès au sein du JN garantit la fiabilité de leur utilisation à des fins de simulations, d'exploitation ou de formation ;
- les **bases de données de connaissances techniques ou technologiques** des systèmes au sens large. Cela peut couvrir, de façon non exhaustive, les données sur les équipements et composants des systèmes, des données physiques de matériaux, des données issues d'essais (essais de caractérisation, essais ayant alimenté la validation de modèles et de méthodologies...). Ces données peuvent être alimentées par la capitalisation des données acquises lors d'études, de campagnes expérimentales, de l'exploitation, etc. ;
- les **données d'exploitation**. Afin de garantir sa fidélité au système qu'il représente, le JN doit intégrer le retour d'expérience issu de l'exploitation de son double réel. Les données issues de capteurs alimentent ainsi le JN dans le cadre du suivi en service. Elles peuvent être utilisées pour conforter la fidélité des modèles numériques simulant le comportement des systèmes cibles ou pour mieux contraindre ces modèles *via* des méthodes d'assimilation de données. Ces données sont utilisées en exploitation

afin de **planifier les maintenances**, mais des modélisations recalées sur les données d'exploitation, grâce à leurs capacités d'extrapolation, peuvent également permettre, en étant prédictives, d'**anticiper les pannes ou dysfonctionnements, ou encore d'aider à la décision pour planifier les besoins de rénovation ou de nouveaux aménagements**. On peut inclure dans ces données celles qui sont également issues de contrôles périodiques (examens non destructifs...);

- les **données d'études**. Les bases de données doivent également permettre de rassembler sous un même référentiel l'ensemble des études réalisées sur le système, aussi bien dans les phases de conception que d'exploitation.

L'ensemble de ces données est évidemment évolutif avec le cycle de vie du système. L'actualisation continue des données est ainsi partie intégrante du jumeau numérique, qui dispose de systèmes de gestion adaptés.

---

### Les outils transversaux

Il s'agit ici des outils pouvant constituer le socle d'un JN, car matérialisant les grands principes ayant régi sa construction ou représentant des « briques » de base sur lesquelles s'appuient les autres composantes et permettant l'interopérabilité. Quelques exemples entrant dans ce cadre sont présentés ci-après :

- **Les interfaces :**

Cette notion est d'acception très large. Dans le cas présent, elle peut recouvrir les **différents canaux de communications** entre les outils (outils de gestion de données <-> plateforme de calcul, données d'essais <-> plateforme de calculs, avec le système réel...).

Elle inclut également les **interfaces homme-machine**, telles les interfaces de visualisation au sens large (consultation et traitement de données, *monitoring* d'un simulateur, visualisation de mise en données d'une simulation, résultats de simulation, interface de réalité virtuelle...) ou les interfaces de saisie (mise en données d'un modèle ou d'une simulation...). Ce type d'interface peut être dotée de fonctions d'assistance ou de validation de la saisie ; on peut en effet prévoir d'y intégrer la connaissance capitalisée au sein du jumeau numérique afin de minimiser les risques d'erreurs. Par exemple, la conception d'une nouvelle ligne de tuyauterie au sein d'une installation peut bénéficier de fonctions automatisées permettant d'optimiser son tracé prenant en compte la présence d'obstacles figurant dans la maquette numérique, proposer le positionnement de supports selon l'état de l'art, des simulations permettant un retour direct, ou *via* des méthodes fondées sur l'apprentissage.

Les interfaces spécifiques au dialogue essais-calculs peuvent être au cœur du JN. En effet, ce dialogue permet d'une part la validation ou l'amélioration des modèles numériques et constitue également un moyen d'optimiser les programmes expérimentaux en s'appuyant sur les capacités numériques. Il peut couvrir le recalage de modèles, les méthodes inverses, le traitement du signal, le pilotage d'essais, l'assimilation de données, les estimations d'erreurs *a priori* et *a posteriori*...

• **Les visualisations avancées :**

L'enjeu est de pouvoir rendre la plus intelligible possible la très grande quantité de données que comporte le JN. Les visualisations avancées sont un moyen d'y parvenir. Cela peut concerner les données issues du système réel (maquettes numériques sur base de scans 3D, données des capteurs de surveillance...) ou celles issues des simulations numériques. Les possibilités d'immersion et d'interaction, telles que la réalité virtuelle, font partie des fonctions intégrées à la visualisation avancée.

• **Les méthodes de vérification et validation, avec quantification des incertitudes :**

Ces méthodes sont un recours nécessaire pour fiabiliser la représentativité du JN et pouvoir certifier les résultats issus des simulations. Ce processus peut s'appliquer à de nombreux outils qui le constituent et, le JN rassemblant l'ensemble des données disponibles, les comparaisons entre les divers résultats et données (essais, simulations, exploitation, etc.) en sont facilitées.

• **L'intelligence artificielle (IA) :**

Le recours croissant à l'IA est également une composante du JN. La flexibilité des modèles numériques pour étudier la variabilité de la réponse d'un système en fonction de ses paramètres permet d'être utilisée par des algorithmes d'apprentissage en lançant une grande quantité de simulations. En retour, la création de nouveaux modèles bénéficiant de cet apprentissage permet de disposer d'outils de diagnostic ou prédictifs performants. Ils peuvent également bénéficier à des outils d'assistance aux concepteurs ou aux opérateurs. D'une manière plus générale, la très grande quantité de données acquises ou générées au sein du JN nécessite des traitements dans lesquels l'intelligence artificielle a un rôle important à jouer.

**Quels critères pour une construction réussie ?**

Comme indiqué précédemment, un jumeau numérique agrège l'ensemble des données et des simulations relatives à un système complexe réel, en s'appuyant sur un ensemble d'outils préexistants et interopérables. Il a pour objectif de fournir une vision systémique et dynamique du système physique dans son environnement, afin de pouvoir étudier cha-

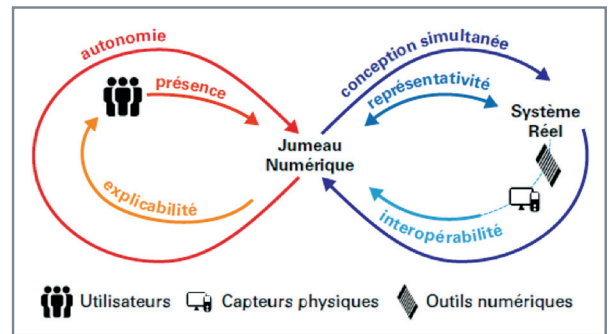


Fig. 41. Principaux critères associés au jumeau numérique.

acun des composants du système, soit indépendamment les uns des autres, soit en tenant compte des interactions et interdépendances multiples pouvant exister. Le JN permet par ailleurs d'englober non seulement les aspects techniques, mais également les aspects économiques, industriels, logistiques, humains, financiers, etc. Il constitue donc potentiellement un outil précieux pour l'aide à la décision grâce aux possibilités qu'il offre.

Il permet notamment :

1. La comparaison des conséquences de différents scénarios ou de diverses solutions de modifications ou d'exploitation du système, avec les coûts et délais de réalisation associés ;
2. l'analyse anticipée de toute modification du système, avant de décider de leur réalisation effective ; et
3. la comparaison des modèles numérique et physique pour une détection de défaillances et d'anomalies.

Dans le domaine de l'ingénierie, le JN doit donc remplir un certain nombre de critères résumés sur la fig. 41 (d'après [2]).

Le premier critère de **conception simultanée** traduit le fait que les élaborations du modèle numérique et du système physique sont des tâches fortement liées : l'optimisation du modèle réel et la calibration du modèle numérique participent à un processus itératif garantissant *in fine* la fidélité du modèle numérique et la bonne compréhension du modèle physique. De ce critère découle la **nécessité de modularité de l'architecture** du JN.

Un second critère concerne la **représentativité**. Il traduit, d'une part, la capacité du JN à décrire la complexité du système réel et, d'autre part, sa précision (écart entre les simulations et les observations/mesures). De ce critère découle la nécessité de mettre en place des stratégies d'agrégation de modèles numériques provenant de domaines différents, chaque domaine d'étude ayant généralement ses spécificités et sa propre complexité.

Un troisième critère d'**interopérabilité** permet d'interfacer le JN avec un ensemble d'applications et d'objets connectés (capteurs physiques...), voire d'autres JN.

Le critère de **présence** est utilisé pour traduire la possibilité d'immersion et d'interaction de l'utilisateur avec le JN, par exemple *via* la réalité virtuelle et grâce à l'emploi de différents moyens de contrôles (voix, manettes, capture de mouvements, etc.).

Le critère d'**explicabilité** traduit la capacité à utiliser le JN comme moyen d'inspection des divers composants du système et d'investigation pour comprendre les facteurs à l'origine de comportements donnés.

Enfin, le critère d'**autonomie** traduit la capacité du JN à reproduire au mieux l'intégralité du comportement du système physique cible, pour permettre une meilleure adaptation aux conditions rencontrées par le système physique, ou une possible anticipation de situations exceptionnelles pouvant affecter le système physique.

## Exemples d'utilisation de jumeaux numériques dans le domaine de la mécanique des structures

### L'approche JN pour le génie civil en contexte urbain

Dans une note de 2022 [3], la fédération professionnelle de l'ingénierie s'est positionnée en faveur du déploiement du JN pour les ouvrages dans le bâtiment, l'industrie et les infrastructures, comme levier de réduction de l'impact carbone de l'industrie de la construction. Cette stratégie s'ap-

puie sur les sociétés d'ingénierie qui devront spécifier, concevoir, intégrer et opérer le JN sur tout le cycle de vie d'un ouvrage. À cette fin, le concept de modèle 4D (3D + temps) à la base du JN est envisagé pour fournir la vision systémique et dynamique des ouvrages et des infrastructures dans leur écosystème. Le JN devra intégrer la maquette numérique 3D avec les multiples données géoréférencées associées (géologie, réseaux d'eau, d'électricité, etc., bâtiments, infrastructures de transport...), ainsi que les différentes évolutions temporelles, permettant ensuite d'aider à optimiser et améliorer la gestion des cycles de vie associés (voir tab. 3). Dans ce contexte, un déploiement de JN à plusieurs niveaux est proposé, qui permet de répondre à différents besoins et usages de l'ingénierie (voir tab. 4), ainsi qu'à différentes échelles de mise en œuvre (voir fig. 42).

### L'approche JN pour le générateur de vapeur

Au sein d'une centrale nucléaire de production électrique, les générateurs de vapeur (GV) sont les composants permettant de vaporiser l'eau du circuit dit « secondaire » alimentant la turbine, par le biais d'un échange thermique avec l'eau pressurisée circulant dans le réacteur (circuit « primaire »). L'interface séparant les deux circuits est constituée d'un très grand nombre de tubes en U (3 000 à 5 000) constituant un faisceau.

**La complexité technique de ce composant** de très grandes dimensions, la complexité des phénomènes physiques s'y déroulant et interagissant entre eux, ses fortes limitations en termes d'accessibilité et d'instrumentation, et les enjeux de sûreté et de performances, ont conduit à **engager une démarche de jumeau numérique** pour ce composant. **L'objectif est de coupler dans un même environnement les données d'exploitation et les données**

Tableau 3.

Ingénierie système en contexte urbain : principaux objectifs d'utilisation d'un JN selon la phase du cycle de vie d'un ouvrage ou d'une infrastructure (d'après [3]).

Phases du cycle de vie (ouvrage/infrastructure)	Objectif du JN
<b>Spécification/conception</b> (préliminaire ou détaillée)	Début du cycle de développement en objectivant les exigences attendues
<b>Prototypage</b>	Optimisation des performances <i>via</i> de la simulation prédictive à partir de modèles multi-physiques ou de comportement dédiés
<b>Chantier/industrialisation</b>	Intégration des modèles permettant d'améliorer la construction et la chaîne de fabrication
<b>Exploitation</b>	Correction et ajustements avec les comportements réels de l'ouvrage, grâce au couplage avec les données collectées dans l'environnement opérationnel
<b>Maintenance/rénovations</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prédiction et anticipation des défaillances par analyse de signaux faibles et/ou évaluation de la « RUL » (<i>remaining usage life</i>)</li> <li>• Aide à l'ajustement des tâches de maintenance/rénovations (simulations) et à l'optimisation des aspects logistiques.</li> </ul>



Tableau 4.

Ingénierie système en contexte urbain : formalisation de jumeaux numériques à différents niveaux selon les besoins et les usages cibles (d'après [3]).

Niveau	Type de Jumeau	Niveau d'intelligence, de complexité	Contenu du modèle numérique	Niveau d'échange des données	Utilisation, fonctionnalités
4	Jumeau interconnecté (réseau)	+++	Interconnection de plusieurs modèles numériques formant un ensemble fonctionnel cohérent	Échanges entre différents jumeaux. Ensemble d'infrastructures, Campus Smart City	Permet d'organiser un fonctionnement connecté et adapté pour un ensemble d'ouvrages, d'infrastructures ou d'équipement
3	Jumeau communicant	++	Modèle numérique avec intégration des données acquises en temps réel (capteurs, IoT, actionneurs...)	Échanges bidirectionnels entre jumeau numérique et jumeau réel ; Ex. : Smart Building, Usine 4.0	Permet de lier les données dynamiques ou temps réel d'un process pour le piloter, voire associer un algorithme qui réalise le pilotage du process.
2	Jumeau dynamique	+	Modèle numérique avec intégration des données acquises en temps réel (capteurs, IoT...)	Interface entre les systèmes opérants. Connection unidirectionnelle. BI GEM	Extraction des données dynamiques > constat et exploitation des données de fonctionnement, exemple : usure, maintenance prédictive...
1	Jumeau statique	0	Modèle numérique d'objets avec informations non géométriques.	Aucun échange de données – Maquette statique.	Extraction de données d'entrée statiques pour conception, calcul et simulation.

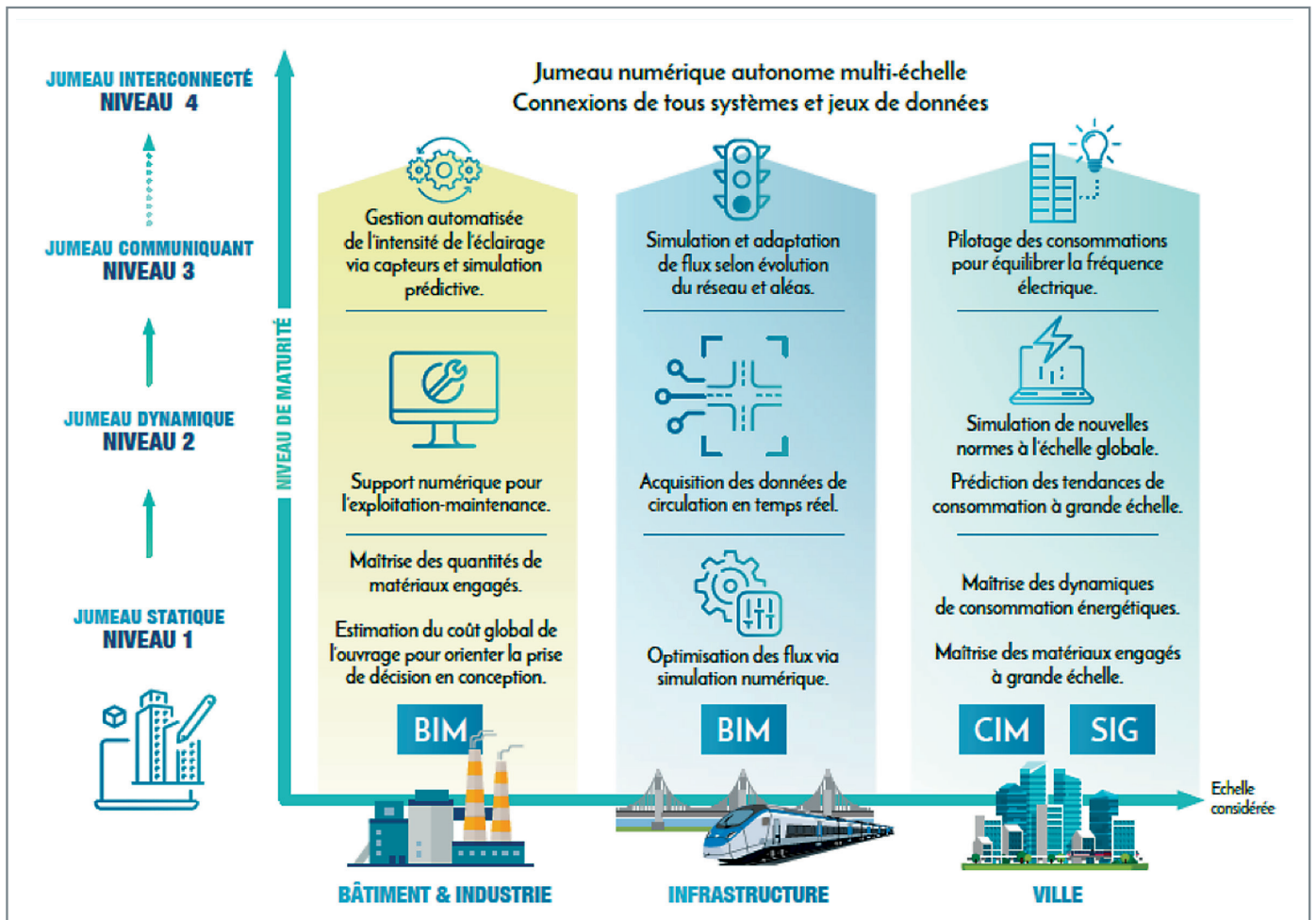


Fig. 42. Ingénierie système en contexte urbain : exemples d'utilisation des divers niveaux de jumeaux numériques, selon l'échelle ciblée (d'après [3]).

résultant des contrôles périodiques, des modèles numériques et des approches *big data* pour exploiter de manière optimale les GV du parc grâce à une vision au plus juste de leur état et de leurs perspectives d'évolutions.

Techniquement, le jumeau numérique GV s'articule autour du besoin de disposer d'un meilleur contrôle et d'une meilleure prédiction du colmatage, pour *in fine* offrir une meilleure maîtrise des risques en exploitation, mais également en phase de conception, tant sur le plan des performances et de leurs évolutions que sur le plan de la sûreté.

**Le colmatage est la conséquence de dépôts** se formant en particulier au niveau des plaques entretoises maintenant le faisceau tubulaire en U, dans les passages aménagés (passages foliés) pour laisser passer le fluide du circuit secondaire. Ces dépôts sont formés par les oxydes issus de la corrosion-érosion dans le circuit secondaire. Des dépôts se forment également sur les tubes eux-mêmes (on parle d'encrassement).

**Les conséquences de l'obstruction des passages foliés et de l'encrassement sont nombreuses**, tant sur les aspects performance que sur les aspects sûreté, du fait de l'impact sur la thermohydraulique du circuit secondaire, qui se traduit par une baisse du taux de recirculation, une baisse de la masse d'eau présente, des surtensions locales, une augmentation des pertes de charge au niveau des plaques entretoise et une diminution de l'efficacité des échanges thermiques. Les conséquences en sont, outre la baisse du débit vapeur en sortie de GV, des risques sur certaines situations de transitoires accidentels, mais également des modifications du comportement vibratoire de la partie cintrée du faisceau tubulaire, conduisant à des phénomènes d'instabilités, et de fatigue et usure prématurées des tubes.

**Sur le plan opérationnel**, le colmatage et l'encrassement sont gérés par :

- Des bouchages des tubes dégradés pour éviter les fuites du primaire vers le secondaire ;
- des nettoyages chimiques curatifs ;
- des nettoyages chimiques préventifs ;
- une optimisation du conditionnement chimique ;
- la mise en œuvre de programmes de surveillance ;
- le développement de modèles, couplés aux observations, pour la maîtrise des cinétiques d'évolution, et la maîtrise de leurs conséquences.

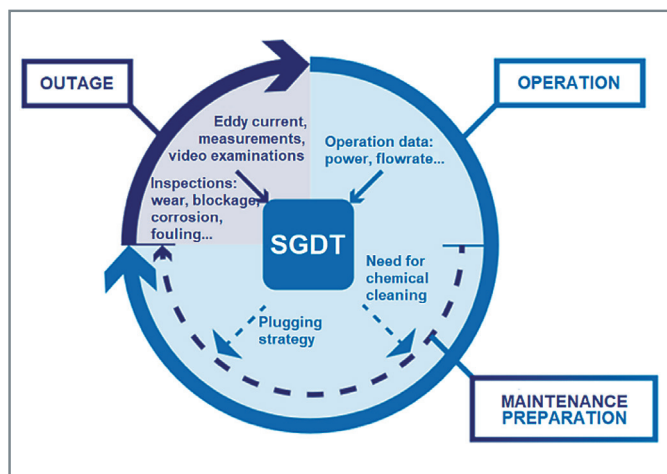


Fig. 43. Cycle de vie du GV et implication du JN GV (SGDT : *Steam Generator Digital Twin*) [4].

Le coût des opérations de maintenance (incluant les délais très longs de préparation) et des pertes d'exploitation associées est considérable, et l'optimisation des maintenances constitue l'enjeu central du jumeau numérique.

La vision du JN GV par la Direction R&D d'EDF est présentée dans la publication [4] et son intégration dans le cycle de vie schématisée par le diagramme de la figure 43.

L'approche jumeau numérique permet de regrouper les fonctionnalités suivant trois grandes finalités :

### 1. Conception :

- Conception de nouveaux GV sûrs et répondant aux exigences (performances, justifications) ;
- optimisation et nouveaux critères de dimensionnement vis-à-vis du risque vibratoire.

### 2. Exploitation :

- Support à l'exploitant (justification, aide au diagnostic, programmes de surveillance) ;
- situations hors dimensionnement vis-à-vis des vibrations, quantification des marges ;
- recherche de conditionnements chimiques alternatifs ;
- simulation (numérique et expérimentale) du colmatage ;
- maintien en conditions opérationnelles des chaînes de calcul actuelles, mais aussi préparation de développements futurs (fonctionnalités, domaine d'application) et éventuellement en les couplant pour tenir compte des aspects multiphysiques.

### 3. Recherche amont :

- Compréhension de la physique de l'IFS pour maîtriser les risques vibratoires dans les GV ;
- quantification des marges des différentes étapes de la méthodologie de prévision des risques vibratoires ;
- comportement des produits de corrosion, des impuretés, des matériaux du GV.

Les outils, en place ou en développement, portent, d'une part, sur la gestion et l'analyse de données et, d'autre part, sur des simulations numériques des diverses physiques.

Les données sont acquises par différents moyens :

- Examens télévisuels de l'état de colmatage sur GV témoin ;
- analyse des signaux de courants de Foucault, qui permet également d'estimer les épaisseurs d'encrassement des tubes ;
- suivi en tendance des niveaux liquides et de la pression en dôme ;
- caractérisation des dépôts issus des prélèvements des boues de lançage ;
- suivi de l'état de bouchage des tubes ;
- estimation des débits de fuite lors des épreuves hydrauliques ;
- programmes expérimentaux sur les diverses phénoménologies (formation et transport de produits de corrosion, chimie et couplage avec la thermohydraulique pour la cinétique de colmatage et d'encrassement, vibrations sous écoulement pour le risque vibratoire...).

Les outils, dans lesquels il faut inclure les activités de R&D, portent sur :

- Des méthodes de traitement de données, pour la visualisation (état et évolutions du taux de colmatage ou encrassement...) ou le suivi en tendance d'indicateurs de fonctionnement (pression dôme...) et de leurs éventuelles corrélations ;
- la modélisation de la chimie en solution du circuit secondaire ;
- la modélisation de la cinétique des dépôts (colmatage et encrassement), par le biais de modèles phénoménologiques et statistiques, exploitant les données issues de la caractérisation ;

- les modélisations de la thermohydraulique, utilisables pour les phases de conception comme pour les phases d'exploitation, adressant différentes échelles, en particulier l'échelle locale mono ou diphasique (CFD) pour les cinétiques locales et l'échelle « composant » (approche 3D simplifiée dite « poreuse » du faisceau tubulaire et des plaques entretoises) pour les études sur le colmatage et les données d'entrée pour le risque vibratoire ;
- des moyens de chaînage de certains outils (chaînage thermohydraulique -> chimie -> dépôts, ou chaînage thermohydraulique -> analyses vibratoires...);
- la complémentarité des approches phénoménologiques et statistiques.

**Évelyne FOERSTER et Gilles RAMPAL,**

*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*

#### ► Références

- [1] *Digital Twin : Definition & Value, An AIAA and AIA Position Paper*, December 2020.
- [2] P.-A. BEAL, C. SEPTSEULT, M. AUBRY, L. LORENZATO et P.-A. THOMAS, « Jumeau numérique et réalité virtuelle pour la modélisation de systèmes complexes », *Techniques de l'ingénieur*, 10 avril 2021, réf. : AG1566 V1.
- [3] SYNTEC-INGÉNIERIE, « Le jumeau numérique au service du changement climatique », *InfraBiM Open 2020-2021*, Lyon, janvier 2022.
- [4] E. DERI, C. VARÉ and M. WINTERGERST, "Development of Digital Twins of PWR Steam Generators: Description of Two Maintenance-Oriented Use Cases", *Proceedings of the 2021 28th International Conference on Nuclear Engineering*, volume 1 : *Operating Plant Challenges, Successes, and Lessons Learned ; Nuclear Plant Engineering ; Advanced Reactors and Fusion ; Small Modular and Micro-Reactors Technologies and Applications*, virtual, online, August 4-6, 2021, V001T01A002, ASME, <https://doi.org/10.1115/ICONE28-63246>.





## La mécanique des structures – sollicitations des composants des réacteurs

La première section a abordé les outils de la mécanique des structures autour des trois piliers principaux que sont la simulation (par le recours aux éléments finis), la modélisation (notamment par le biais des lois de comportement) et l'expérimentation. Leur application aux sollicitations des structures du nucléaire va à présent être détaillée autour de plusieurs thèmes scientifiques qui feront l'objet d'autant de chapitres de cette section :

- Le soudage avec le développement de méthodes pour la maîtrise des procédés et de leurs effets thermo-métallurgiques-mécaniques sur les matériaux et les structures ;
- les vibrations qui sont omniprésentes dans les installations industrielles où des structures sont en contact avec un fluide sous écoulement (comme le générateur de vapeur ou l'assemblage combustible) ;
- l'usure, mettant en jeu une perte de matière potentielle entre deux corps solides antagonistes et affectant particulièrement certains internes de cuve ;
- le comportement du combustible sous irradiation, en tant qu'approche multi-échelle et multi-physique ;
- la fatigue des zones de mélange dans les circuits tels que le circuit primaire où se mélangent fluides chauds et froids lors du fonctionnement du réacteur ;
- l'évaluation du risque de rupture avec l'exemple du pré-chargement à chaud (effet « WPS »), lié à la prise en compte de l'histoire du chargement sur le comportement du matériau vis-à-vis de sa résistance à la rupture brutale ;
- le vieillissement des structures en béton armé et précontraint autour de la simulation du comportement des enceintes de confinement de centrales nucléaires ;
- l'étude du gerbage dans les réacteurs de quatrième génération, introduisant le nécessaire couplage entre la neutronique et la mécanique des structures pour ce cas d'application.

Chaque thème scientifique sera l'occasion de présenter des développements récents permettant d'améliorer la connaissance de phénomènes complexes et, dans la plupart des cas, de les prédire afin de mieux en appréhender les conséquences.



# Soudage (maîtrise des procédés de soudage et leurs effets thermo-métallurgiques-mécaniques sur les matériaux et les structures) – Fabrication additive

## Introduction

Plusieurs kilomètres de soudures sont présents dans un réacteur nucléaire. Les soudures sont le plus souvent des points critiques, car elles constituent des zones potentielles de fragilité pouvant conduire à la rupture. Afin d'améliorer la qualité des soudures, le CEA développe au sein du Laboratoire des Technologies de l'Assemblage (LTA) des plateformes expérimentales et de simulation numérique pour les procédés de soudage/fabrication additive (FA) par dépôt de fil. Les matériaux d'étude sont principalement ceux rencontrés dans l'industrie nucléaire comme les aciers faiblement alliés ou inoxydables austénitiques, les alliages base nickel, d'aluminium ou de cuivre, mais aussi des matériaux plus spécifiques comme les ODS (aciers renforcés par dispersion d'oxydes nanométriques) ou les aciers martensitiques à faible activation utilisés pour le réacteur de fusion. Pour obtenir des assemblages de précisions et sans distorsions sur des matériaux nécessitant d'être protégés des actions de l'atmosphère comme le zirconium, l'uranium, le béryllium ou l'aluminium, le CEA, dès sa création, a développé ses propres procédés de soudage. C'est ainsi qu'en 1954 fut déposé le brevet Stohr sur le soudage par bombardement électronique sous vide, aujourd'hui connu comme soudage par faisceaux d'électrons. Les travaux de simulation numérique arrivent 35 ans plus tard dans les années 1990 et sont rapidement partagés avec les académiques et autres secteurs industriels comme l'automobile, le ferroviaire, l'aéronautique, le naval et l'*oil&gas* permettant des sauts technologiques avec des projets collaboratifs comme MUSICA ou ODAS [1].

Aujourd'hui encore, les principaux besoins sont la maîtrise des procédés de soudage/fabrication additive-fil et l'augmentation de leurs performances, de la durée de vie des composants et de la sûreté des réacteurs nucléaires. L'objectif général des activités concerne l'amélioration de la compréhension, la prédiction et la maîtrise des procédés de soudage et FA-fil ainsi que de leurs effets sur les matériaux. L'atteinte de ces objectifs implique des travaux de modélisation, de simulation numérique et des travaux expérimentaux *via* une approche expérimentale/numérique couplée.

La simulation numérique permet d'optimiser le design de la pièce tout en réduisant le nombre d'essais. Elle vise également à évaluer les effets autour d'un point de fonctionne-

ment et à obtenir une meilleure fiabilité *via* la maîtrise et l'anticipation des contraintes résiduelles et des distorsions. Enfin, elle assure une meilleure sûreté en apportant son soutien à l'interprétation des contrôles non destructifs *via* la prédiction des structures de grains. Elle contribue également à une meilleure anticipation des défauts pouvant apparaître au cours d'une opération de soudage ou de FA (fissuration à froid, fissuration à chaud et fissuration par relaxation) et à une augmentation de la durée de vie des structures soudées au regard de la corrosion sous contraintes (CSC), la fatigue...

## La simulation numérique des procédés de soudage et de fabrication additive et de leurs effets

La simulation numérique du soudage (SNS) se décompose en deux volets : la simulation du procédé lui-même et la simulation des *effets* du procédé. La démarche et les outils pour la simulation numérique des procédés FA-fil (*wire arc additive manufacturing* ou WAAM, *wire laser additive manufacturing* ou WLAM) sont les mêmes que pour les calculs de soudage. Il s'agit de simulations basées sur des modèles intégrant des couplages plus ou moins forts de différents domaines de la physique comme la thermohydraulique, la dynamique des fluides, l'électromagnétisme ou l'électrothermie. Cette modélisation à l'échelle microscopique est qualifiée de simulation multi-physique. La simulation des effets du soudage concerne quant à elle les effets induits par le procédé sur la pièce, tels que le champ thermique, les contraintes, les déformations et les transformations microstructurales. Il s'agit alors principalement de simulations thermomécaniques et thermométallurgiques à l'échelle macroscopique. À une échelle intermédiaire, dite mésoscopique, sont menés des calculs de microstructures de grains dans la zone fondue lors de la solidification.

Dans presque toutes les simulations thermomécaniques et thermométallurgiques – et dans la totalité des simulations numériques du soudage qui sont menées dans un cadre industriel –, le procédé n'est pas simulé. En revanche, la chaleur apportée par le procédé – donnée d'entrée nécessaire aux simulations thermiques – est représentée *a priori* par une distribution analytique, communément appelée « source de chaleur équivalente » et dont les paramètres sont calibrés par l'utilisateur de la simulation sur une expé-

rience instrumentée représentative de la fabrication. Toutes les modélisations et simulations numériques sont réalisées dans le logiciel du CEA Cast3M [2] et ont été capitalisées dans le logiciel WPROCESS.

## Un exemple de modélisation multi-physique : le procédé arc TIG

Les modélisations au niveau microscopique du procédé à l'arc TIG emploient la physique des plasmas et la dynamique des fluides pour simuler l'arc de soudage et les écoulements dans le bain de fusion. Par exemple, les principales forces s'appliquant sur le bain de soudage, la force électromagnétique de Lorentz, la force de flottabilité, de tension de surface et de cisaillement génèrent différents écoulements qui agissent fortement sur la morphologie du bain de soudage. L'intérêt de ces travaux est de disposer d'une modélisation directe, à partir des paramètres du procédé, permettant une simulation dite (par abus de langage) prédictive des flux de chaleur traversant la pièce, des gradients thermiques, de la géométrie du bain. Ces données servent en entrée des simulations thermo-mécano-métallurgiques et de solidification, mais également pour accroître la compréhension de l'influence des principaux paramètres sur les phénomènes physiques nombreux et complexes du procédé à l'arc TIG. Des modélisations multi-physiques 3D MHD (magnétohydrodynamique) d'arc-plasma de soudage couplées à des modélisations thermohydrauliques du bain de soudage avec surface libre et défilement de la source TIG permettent d'obtenir des données satisfaisantes sur les dimensions du bain de fusion (voir fig. 44). Elles ont été mises en place dans le cadre de thèses successives.

Brochard [3] commence par une modélisation 2D axisymétrique, à surface fixe du bain, avec une torche de soudage fixe, puis Kong [4] [5] passe en 3D et laisse libre la surface libre du bain et la torche de soudage est mobile, puis Nguyen, à partir de ces modèles [6] [7], étudie les phénomènes physiques comme les forces motrices de flottabilité, Marangoni et Lorentz, pour différentes positions de soudage, il a montré que la position de soudage influe très nettement sur la forme du bain de fusion, particulièrement celle de la surface (voir fig. 44).

Nahed [8] [9] ajoute la modélisation fine de la géométrie de la cathode et de l'arc TIG (électrode-plasma) lui permettant une meilleure compréhension des effets dynamiques et thermiques qui interagissent avec le bain.

Les phénomènes physiques impliqués en soudage et en fabrication additive sont similaires, mais, pour aller vers la simulation numérique de la fabrication additive, plusieurs difficultés sont à lever :

- la modélisation de l'apport de matière, sujette à des difficultés numériques pour le très grand nombre de passes [10] [6] ;
- les caractéristiques thermophysiques des matériaux jusque très haute température qui sont des données d'entrée indispensables pour nourrir les modèles, mais souvent difficiles à obtenir ;
- les temps de calculs importants auxquels il faudra apporter des solutions (maillage adaptatif...) ;
- les essais de validation, difficiles à instrumenter.

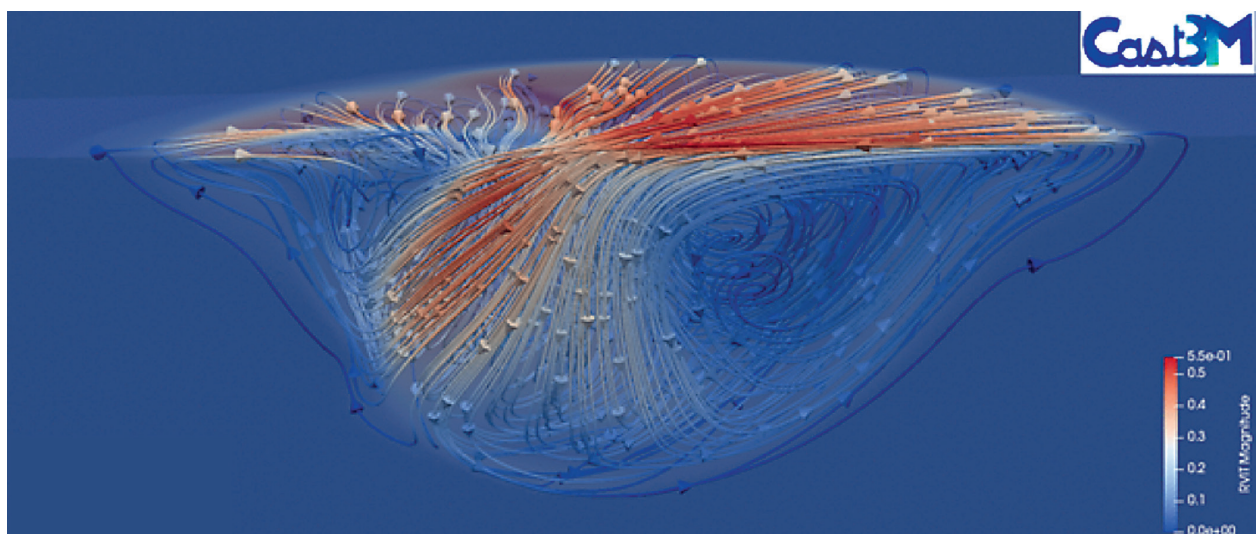


Fig. 44. Modélisation couplée arc-bain du soudage TIG : champs de vitesse (V) dans le bain simulé.



## Simulation des effets du soudage : modélisation thermique

Pour réaliser la simulation des effets d'une opération de soudage/fabrication additive, il est nécessaire de connaître la distribution de l'énergie transférée à la pièce au cours du procédé. Une modélisation thermique dite indirecte basée sur le concept de source de chaleur apparente supposant *a priori* la forme mathématique de la distribution de la densité de puissance est utilisée. Les paramètres du modèle sont identifiés par méthode inverse, à partir d'une expérience de soudage instrumentée. Une méthodologie pour la calibration des modèles de source de chaleur pour le soudage [11] est implémentée dans le logiciel WPROCESS s'appuyant sur le code éléments finis Cast3M du CEA [12]. L'outil WPROCESS permet également le design d'expérience basé sur des analyses de sensibilité permettant de concevoir l'essai de soudage instrumenté de manière optimale.

Une application de la méthodologie à l'aide de l'outil WPROCESS (<https://hal.science/hal-04124222>) et de données expérimentales des évolutions de température et des macrographies est illustrée sur la figure 45. Il s'agit du soudage d'un composant industriel comportant un très grand nombre de passes en chanfrein étroit et avec un procédé novateur utilisant deux passes par couche [13]. Après calibration de la source de chaleur (à partir des données de l'essai instrumenté au design optimisé grâce à des études de sensibilité), une très bonne concordance est observée entre les calculs et les mesures (à la fois sur la forme de la zone fondue et sur les évolutions thermiques à différentes distances de l'axe de soudage). Il est considéré que cette approche indirecte est très pertinente et complète la mesure puisqu'elle fournit un champ de température dans toute la pièce soudée très représentatif pour une configuration complexe. Elle est donc généralement utilisée pour tout calcul thermique de soudage

et fabrication additive comme donnée d'entrée pour les calculs thermomécaniques, thermomécaniques et de microstructures.

## Simulation des effets du soudage : microstructures de solidification

La prédiction de la microstructure des pièces soudées et de fabrication additive résultant des conditions de fabrication est une étape importante pour améliorer leur contrôlabilité et maîtriser les propriétés d'usage de ces pièces, en particulier mécaniques. En effet, ces propriétés sont héritées des caractéristiques des microstructures de solidification générées au cours du procédé. Des structures présentant une texture cristallographique marquée sont souvent obtenues, conduisant à des comportements mécaniques anisotropes. L'outil développé doit pouvoir rendre compte de l'influence des paramètres du procédé afin d'optimiser le mode opératoire de soudage/fabrication additive poudre-fil.

Les microstructures sont très dépendantes des mécanismes intervenant lors de la solidification. Un modèle de type CA (*cellular automaton*) – FE (*finite element*) est utilisé pour réaliser les calculs de microstructures [14] [16] [15] en s'appuyant sur la bibliographie [22] [21] [20] [19] [18] [17].

Ce modèle 3D « CA-FE » repose sur le couplage de deux calculs : une modélisation thermique du procédé par éléments finis (logiciel Cast3M) afin de simuler le champ thermique dans la pièce et une modélisation des structures de grains basée sur la méthode des automates cellulaires (Fortran) pour prédire les caractéristiques des grains. Les phénomènes physiques de solidification intégrés dans le modèle sont la germination et la croissance dendritique. Le modèle est développé pour le procédé de fusion laser sur lit de

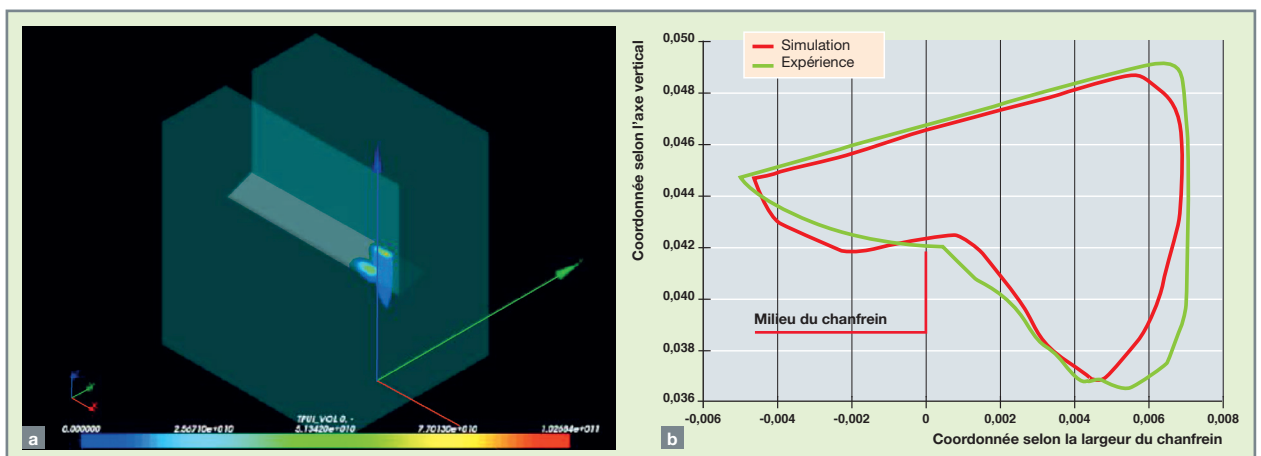


Fig. 45. Modélisation thermique pour une passe déposée du côté droit du chanfrein : distribution de l'énergie dans les deux modèles Goldak (a) ; comparaison calcul/expérience de la géométrie de la zone fondue (à gauche) [13].

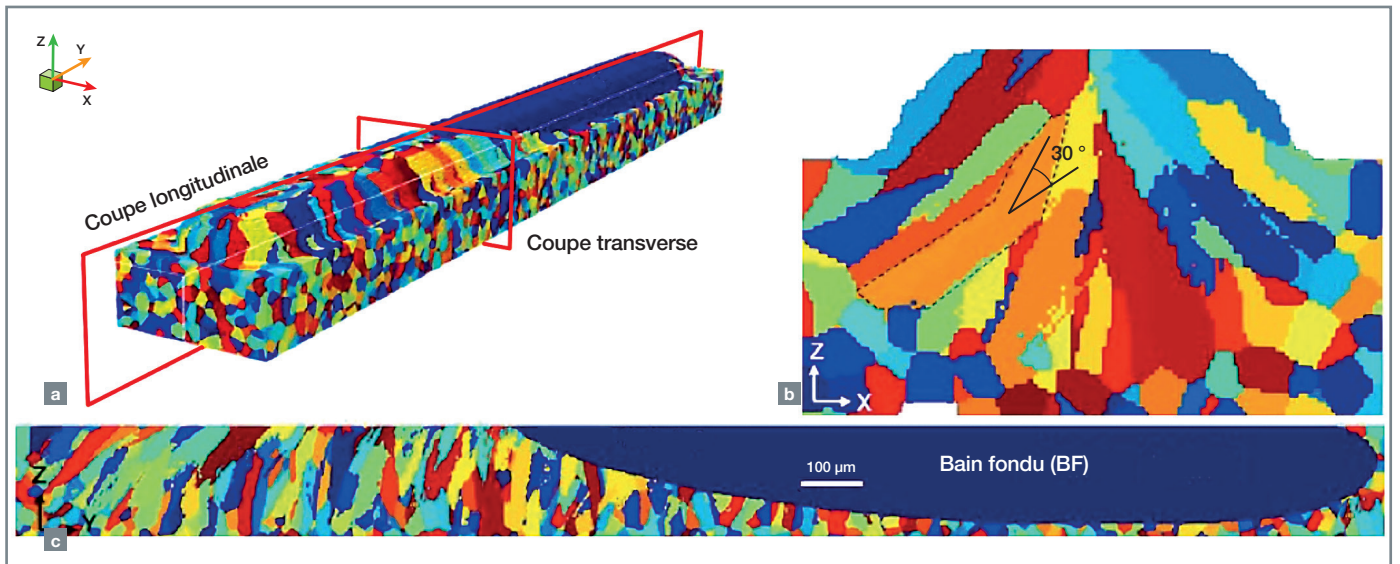


Fig. 46. Simulation CA-FE de la structure de grains d'un monocordon fusion laser lit de poudre acier 316L : vue globale 3D (a), coupe transverse (b), coupe longitudinale (c) [15].

poudre en acier 316L [16] [15] [14], mais peut être transposé pour d'autres procédés de fabrication (soudage, FA poudre/fil), la méthodologie restant la même quel que soit le procédé. Le post-traitement des résultats de simulation de la thermique du procédé par éléments finis permet de mener des analyses du gradient thermique et du taux de croissance simulés le long du front de solidification. Ces deux grandeurs physiques sont en effet primordiales puisqu'elles contrôlent les caractéristiques des structures de grains formés en termes de morphologie et de taille. La structure granulaire simulée après un calcul CA-FE sur un monocordon sur acier 316L par fusion laser lit de poudre composée de grains colonnaires formés par épitaxie à partir des grains composant le substrat, comme observée expérimentalement, est illustrée en figure 46 [15].

La simulation des microstructures de solidification ouvre de nouvelles perspectives.

Plusieurs options permettent d'améliorer la représentativité de la méthode développée :

#### 1. Chaînage amont multi-physique → Modèle automates cellulaires (calcul CA-FE) de calcul de grains.

La modélisation multi-physique fluide à partir des paramètres du procédé permettra d'être plus prédictif pour le champ de température et la limite du bain fondu et de transférer au modèle automate cellulaire une meilleure description de l'interface solide/liquide et des températures pour les calculs de microstructure. En effet, les écoulements dans le bain influencent non seulement la taille et la forme du bain et le champ de température, mais peuvent aussi avoir un

impact sur le comportement à la solidification. La modélisation fluide permettra ainsi de faire évoluer les modèles de germination et de croissance dans le modèle CA.

#### 2. Chaînages aval CA-FE → CIVA et CA-FE → AMITEX

Un chaînage en aval du calcul CA-FE vers l'outil de simulation des contrôles non destructifs (CND) de DRT/LIST CIVA [23] permettra d'évaluer la fiabilité des CND grâce à la simulation de la contrôlabilité des pièces avec prise en compte d'une microstructure représentative, car la propagation des ondes ultrasonores dépend des caractéristiques des structures de grains.

De même, un chaînage en aval du code CA-FE vers l'outil de simulation du comportement mécanique AMITEX de l'ISAS [24] permettra de prédire les propriétés mécaniques de la pièce fabriquée en tenant compte des caractéristiques des grains.

### Simulation des effets du soudage : modélisation thermo-métallo-mécanique

Ce type de simulation, à l'échelle macroscopique de la pièce, prédit les effets du soudage sur la métallurgie en termes de proportions de phases métallurgiques transformées à l'état solide, donc hors zone fondue – il s'agit typiquement des zones affectées thermiquement (ZAT) – et sur la mécanique des assemblages en termes de contraintes résiduelles et distorsions. Les contraintes résiduelles s'ajoutent aux chargements de service du composant soudé

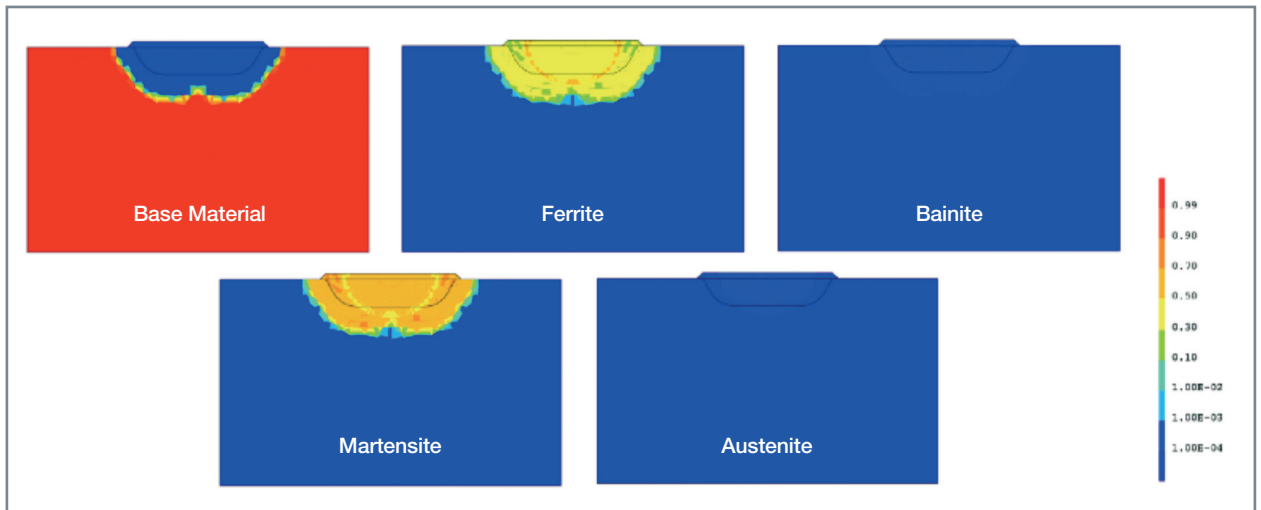


Fig. 47. Simulation numérique des transformations de phases après cinq passes de la maquette du groupe de travail 8 du réseau NeT « TG8 : 5-Pass Slot Dissimilar Weld (Ni alloy) on Ferritic Steel », <https://www.net-network.eu/tg8> [29].

et jouent donc un rôle important sur la durée de vie des structures en favorisant les ruptures par fatigue, la fissuration et la corrosion sous contrainte. Il faut donc pouvoir les évaluer et les prendre en compte ultérieurement dans les analyses d'intégrité pour la durée de vie. Les distorsions peuvent quant à elles poser des problèmes de tolérances dimensionnelles des structures. Afin d'avoir accès à ces grandeurs résiduelles dans la structure, il est nécessaire de modéliser les phénomènes thermiques, métallurgiques et mécaniques ainsi que leurs interactions [25].

Les difficultés résident principalement dans la modélisation des transformations de phase ainsi que la modélisation du comportement mécanique du matériau multi-phasé. Le calcul des proportions de phase est basé sur des lois phénoménologiques, comme les modèles de Leblond [26] et Koistinen-Marburger [27]. L'implémentation des modèles métallurgiques et du couplage thermométallurgique dans Cast3M [28] permet de modéliser les proportions de phases sur une maquette de soudage (voir fig. 47) [29]. Le couplage à la mécanique est en cours dans Cast3M.

Des calculs thermomécaniques, sur matériaux sans transformation de phase sont menés sous Cast3M pour évaluer les contraintes résiduelles en soudage multi-passe afin d'améliorer leur prédiction et optimiser la fabrication des composants soudés. L'objectif à terme est de développer leur prise en compte dans les analyses d'intégrité. Ces actions sont généralement menées sous forme de *benchmarks* numériques afin de se confronter aux résultats numériques issus d'autres outils logiciels et de se comparer à des mesures de contraintes résiduelles [30] [31]. Les résultats comparatifs sont très satisfaisants sur les profils de contraintes résiduelles tant du point de vue numérique entre les codes que du point de vue expérimental.

Dans le cas du procédé de fabrication additive arc fil (WAAM), les simulations thermomécaniques permettent d'évaluer l'influence des paramètres opératoires sur la qualité de pièces fabriquées et prédisent avec une bonne précision l'histoire thermique et les déformations des murs fabriqués [32]. Deux difficultés sont liées à la simulation par éléments finis de la fabrication additive : d'une part, disposer des données relatives au comportement thermomécanique des matériaux et des lois de comportement associées et, d'autre part, réduire les temps de calcul pour pouvoir simuler des pièces de géométrie représentative. Le défi pour ces calculs thermomécaniques concerne le grand nombre de passes à simuler [33] [34]. Des méthodes numériques sont en cours de développement pour surmonter cette difficulté.

### Fissuration à chaud et fissuration par relaxation

Lors du soudage, ou de la fabrication additive, des défauts de fissuration à chaud, dus à une décohésion inter-dendritique, peuvent apparaître dans le métal à l'état pâteux de la zone fondue en cours de solidification. La formation des fissures à chaud de solidification peut avoir deux origines : métallurgique et mécanique. Couplée à la réalisation d'essais dédiés de fissuration à chaud fortement instrumentés, la simulation thermomécanique de ces essais permet de mieux comprendre le phénomène, d'évaluer l'effet des paramètres du procédé sur l'apparition des défauts de fissuration à chaud et d'identifier des indicateurs thermomécaniques locaux dans la zone sensible [35] [36].

La fabrication additive regroupe un ensemble de technologies permettant de fabriquer, par ajouts de matière successifs, une pièce à partir d'un fichier numérique. Les premiers procédés de fabrication additive se sont développés dans les années 1980 avec la stéréolithographie, utilisant un polymère sensible aux rayons ultraviolets. Concernant les procédés de fabrication additive appliqués aux matériaux métalliques, une croissance exponentielle de ces technologies a été observée à partir des années 2000, en lien avec la montée en compétences sur la maîtrise des lasers ou des faisceaux d'électrons. Ces différents procédés connaissent alors un développement fulgurant ainsi qu'un réel engouement de différentes industries telles que l'aéronautique, le médical ou encore les énergies qui envisagent de les utiliser en alternative aux procédés conventionnels de fabrication.

Deux d'entre eux sont particulièrement utilisés et étudiés pour la fabrication de composants métalliques :

- Le procédé de fusion sur lit de poudre (**PBF** : *powder bed fusion* ou **SLM** : *selective laser melting*) utilise une source d'énergie pour faire fondre localement une couche de poudre métallique et ainsi construire la pièce désirée couche par couche. Cette technologie est destinée à la fabrication de géométries complexes de petites tailles avec des résolutions géométriques poussées et permet la réalisation de petites à moyennes séries ;
- le procédé de dépôt sous énergie concentrée (**DED** : *directed energy deposition*) pour lequel du métal fondu est directement déposé pour construire la pièce souhaitée. L'approvisionnement de métal peut s'effectuer sous la forme de poudre ou de fil et la fusion du métal peut être réalisée avec différentes sources d'énergie. Cette technologie est destinée à la construction de pièces de grandes dimensions, ainsi que l'ajout de fonctionnalités ou la réparation de pièces par rechargement.

Le CEA dispose à Saclay de deux installations « fil », une équipée d'une source laser YAG et une seconde de sources arc multi-procédés. Ces technologies présentent de nombreux avantages : économie de matière nécessaire à la fabrication d'une pièce, réductions des coûts d'usinage en réalisant des ébauches au plus proche des cotes finales des pièces usinées ou encore réduction des cycles de développement et des coûts des pièces (absence d'outillage, réduction du nombre d'étapes dans la gamme de fabrication, etc.). Elles présentent également des taux de dépôt de matière très élevés et minimisent les problématiques de santé, sécurité et environnement rencontrées dans les procédés à base de poudres métalliques.

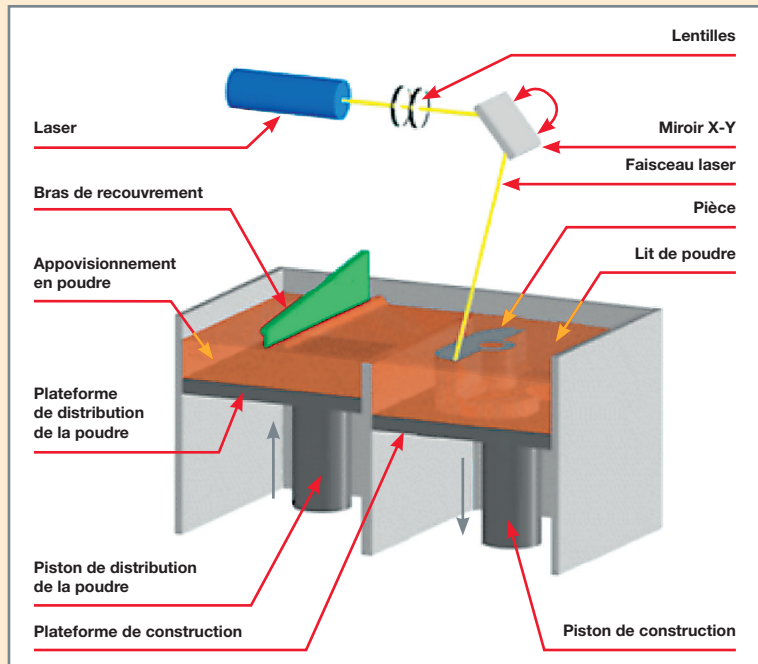


Fig. 48. Schéma de principe du procédé PBF.

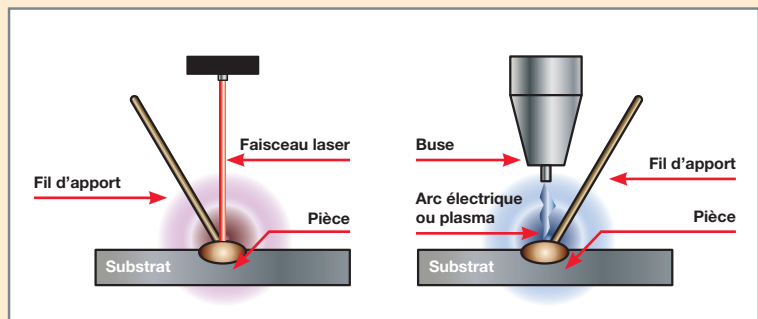


Fig. 49. Schéma de principe DED source laser (à gauche) et DED source arc (à droite).



Les sources d'énergie actuellement utilisées sont issues des procédés de soudage et différentes sources de chaleur peuvent être utilisées (arc électrique, induction, laser, faisceau d'électrons) suivant les taux de dépôts visés.

Les principaux défis technologiques sont les suivants :

- La mise au point des conditions de dépôts pour maîtriser la qualité de pièces construites en limitant la génération de défauts (porosité, projections) et en veillant à la stabilité et à la régularité du procédé (maintien des dimensions géométriques des cordons) ;
- du fait des forts gradients et cycles thermiques générés lors de la fabrication, ces procédés génèrent de nombreuses contraintes résiduelles à l'origine de déformations voire de fissuration. L'optimisation des trajectoires de fabrication ainsi que le contrôle des températures dans la pièce est nécessaire pour les minimiser et ainsi obtenir des pièces aux tolérances géométriques souhaitées ;
- la connaissance des propriétés mécaniques et métallurgiques des pièces fabriquées, avec pour finalité la prédiction de leur comportement en service et leur durabilité.

Des activités de développement de méthodes et d'outils de simulation numérique ainsi qu'expérimentale sont alors menées conjointement pour répondre à ces problématiques.

Concernant la simulation numérique de la fabrication additive, trois types de modélisation sont développés et mis en œuvre : un premier à l'échelle globale de la pièce à réaliser et deux autres à des échelles plus locales. Il s'agit de :

- Simulations thermomécaniques de la fabrication de la pièce par la méthode des éléments finis (développées dans le logiciel Cast3M). Le premier intérêt de ces simulations est de pouvoir apprécier la géométrie finale de la pièce fabriquée en tenant compte des distorsions induites par le procédé et d'estimer l'état de contrainte résiduel au sein de la pièce. Il est ainsi possible d'optimiser le *process* de fabrication voire les étapes de la gamme (avec un traitement thermique par exemple). Un exemple de simulation des déformations engendrées par le procédé est donné en figure 50 ;
- simulations multi-physiques du procédé d'apport d'énergie et de matière (simulation de l'arc de soudage et du bain de métal fondu ou de l'interaction laser-matière) par des approches eulériennes ou ALE (voir fig. 51). Ces dernières

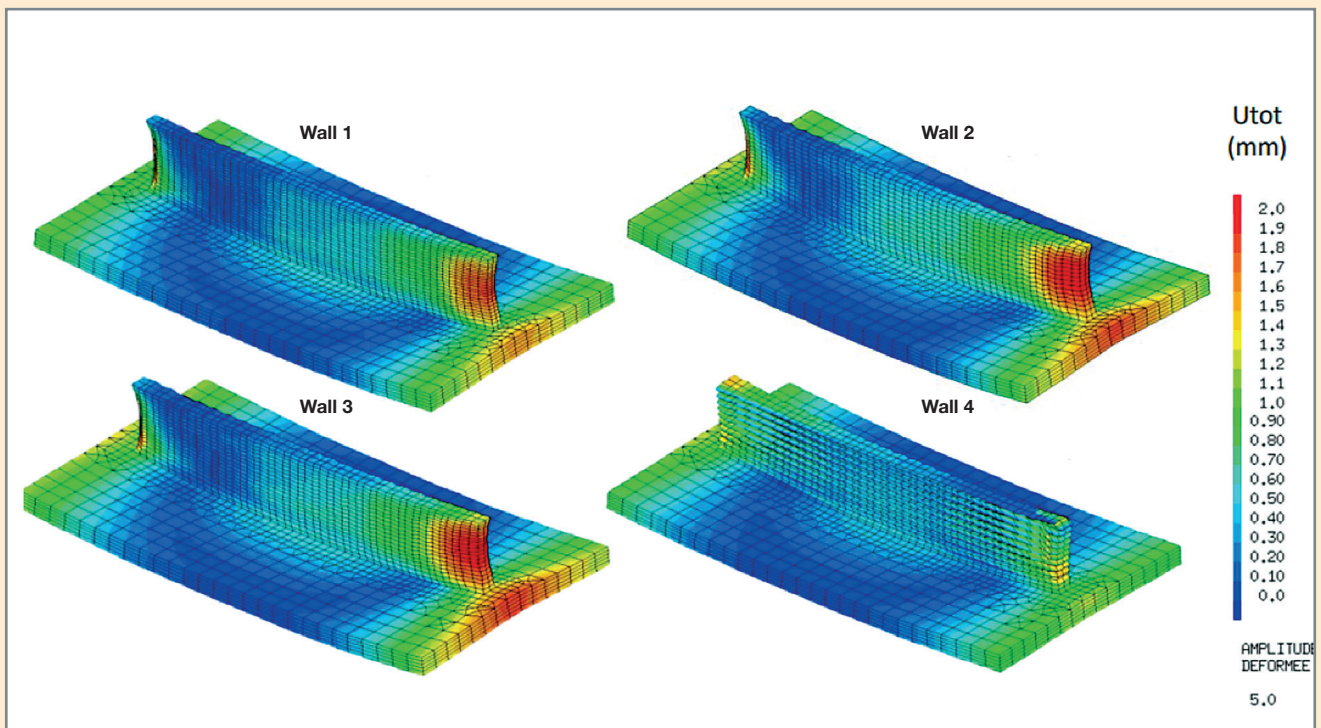


Fig. 50. Prédiction des déformations pour des géométries simples par simulation thermomécanique.

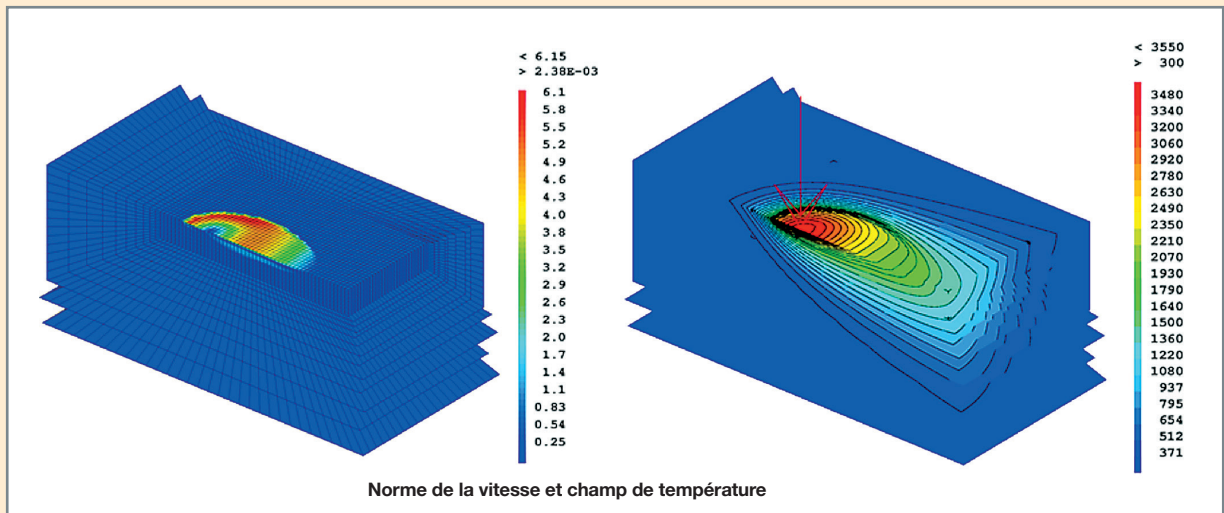


Fig. 51. Calcul thermohydraulique à l'échelle du bain liquide.

constituent une aide à la compréhension des phénomènes physiques, notamment par l'exploitation de données de mesure difficilement accessibles expérimentalement telles que le champ de température ou son gradient ;

- simulations de microstructures issues de la solidification du métal d'apport par des approches de type automates cellulaires (modèle CA-FE). L'objectif serait alors de pouvoir relier paramètres opératoires, microstructures et propriétés d'usage (voir fig. 52).

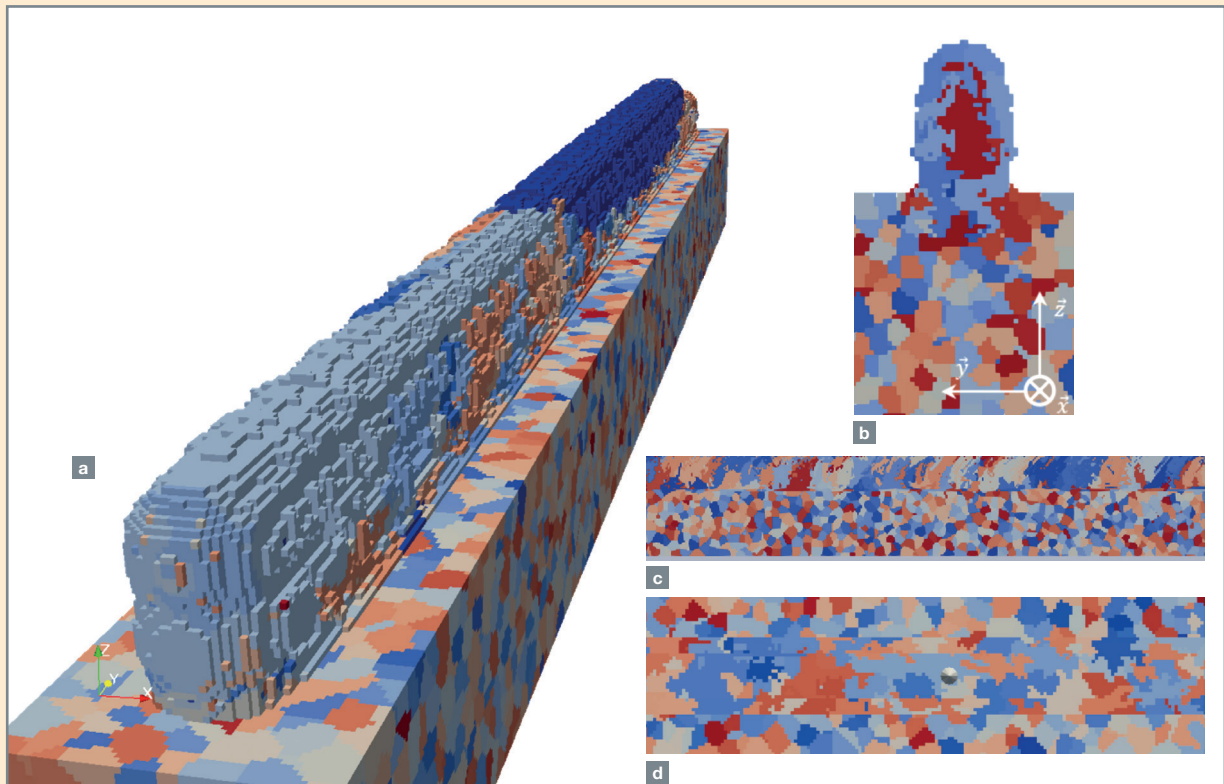


Fig. 52. Microstructure simulée d'un mur de quatre cordons en acier 316L (a). Différentes coupes : transversale (b), longitudinale (c) et vue du dessus (d).

Outre la pré-déformation et la précipitation des carbures et phases intermétalliques, le niveau des contraintes résiduelles est un des principaux facteurs intervenant dans le phénomène de fissuration en relaxation des aciers. Ce type d'endommagement peut se produire dans les ZAT en service à haute température du composant ou au cours d'un traitement thermique de détensionnement immédiatement après soudage. Ce phénomène est en partie généré par la relaxation des champs de contraintes résiduelles de soudage. La simulation thermomécanique de l'essai couplée aux caractérisations (thermique, recherche de fissurations, analyses métallurgiques au niveau des joints de grains) et à des mesures de contraintes résiduelles permet d'avancer dans la compréhension du mécanisme de fissuration [37] [38] [39].

## Distorsions de soudage

Dans le cadre du programme Fusion, la problématique de minimisation des distorsions de soudage résultant de la dilatation et contraction du métal fondu et du métal de base adjacent pendant les cycles de chauffage et refroidissement à l'aide de la simulation numérique lors du soudage à l'arc TIG et laser de grands composants est à l'étude afin de pouvoir émettre des recommandations pour les meilleures séquences d'assemblage. Un des composants d'intérêt est le TBM (*Test Blanket Module*) en matériau Eurofer dont la fabrication inclut de très nombreuses soudures (voir p. 243). Des simulations thermomécaniques permettent d'évaluer le meilleur séquençage des passes au regard des distorsions dans le cadre du projet ITER [40] et pour le projet DEMO [42] [41]. Pour rester suffisamment raffiné dans les zones d'intérêt, des méthodes numériques utilisant des super-éléments et des techniques de maillage adaptatif sont évaluées [42].

## Vers la normalisation de la simulation numérique

Les contraintes résiduelles issues d'une opération de soudage constituent des données d'entrée pour les analyses des risques de dégradation par endommagement en fatigue, en corrosion sous contraintes et par rupture brutale. Les industriels du nucléaire ambitionnent d'utiliser la SNS dans le but de calculer les contraintes résiduelles et de les utiliser dans l'élaboration des dossiers établissant la démonstration de sûreté couvrant l'îlot nucléaire.

Ainsi, un guide méthodologique de simulation à destination des industriels concepteurs et exploitants a été rédigé conjointement par le CEA, EDF et Framatome en 2019 [43] sur la base d'un REX de plus de 30 ans. Ce guide a été élaboré en tenant compte des recommandations du *Guide de l'ASN* n° 28 « Qualification des outils de calcul scientifique (OCS) utilisés dans la démonstration de sûreté nucléaire » et

de la PTAN (*Publication technique de l'AFCEM*) correspondante (RC 19 002 révision A).

Pour justifier auprès des autorités de sûreté l'utilisation de notre méthodologie de calcul en faisant référence à un référentiel normatif, le CEA, EDF et Framatome ont proposé au comité 44 de l'ISO (*Welding and Allied Processes*) l'établissement d'un référentiel de simulation numérique du soudage basé sur le guide méthodologique rédigé en 2019. Ce sont dix pays et près d'une trentaine de participants qui se sont montrés intéressés par ce projet. Le CEA en pilote et en anime la rédaction. Ainsi, toute simulation basée sur les prescriptions de la norme pourra être utilisée dans un cadre réglementaire, ce qui simplifiera et appuiera les discussions avec les AS. La méthode « nucléaire » sera couverte par la norme.

## Conclusions et perspectives

Les calculs microstructuraux et thermo-métallo-mécaniques de soudage/fabrication additive nécessitent avant tout une modélisation du procédé pour fournir le champ de température dans la pièce, donnée d'entrée des simulations numériques. Pour les procédés à l'arc, la modélisation multi-physique présente un intérêt crucial pour la description fiable à partir des données du soudeur de la morphologie des bains fondus et du champ de température dans la pièce. Pour tous les procédés (arc, laser...), la modélisation thermohydraulique des écoulements dans le bain améliore la prédiction de la thermique.

Les efforts doivent se poursuivre sur le développement du modèle CA-FE 3D pour prédire les caractéristiques des grains générés lors de la solidification ainsi que les chaînes en aval avec les outils du CEA AMITEX pour la mécanique et CIVA pour les CND.

Parmi les grands challenges de ces modélisations [44], l'un concerne la nécessité de réduire les temps de calculs tout en conservant une description fine de la physique des phénomènes dans les zones d'intérêt. Pour ce faire, des méthodes numériques sont en cours de développement. Un autre point récurrent, pour tous les types de modélisation, concerne les données thermophysiques à haute et très haute températures difficiles à obtenir. Enfin, des essais instrumentés doivent être menés afin de valider les calculs numériques et s'assurer que les modèles prennent bien en compte les principaux phénomènes physiques et restituent de manière satisfaisante les observables expérimentaux.

Le meilleur moyen d'y parvenir reste de favoriser les synergies (collaborations, mise en commun des moyens, assemblage des compétences et fusion des méthodologies) au travers de *benchmarks* et de *round robins* dans des réseaux d'experts mêlant académiques et industriels tel qu'il est par exemple pratiqué dans le réseau NeT [45] ou qu'il fut pratiqué dans MUSICAS [46].

**Olivier ASSERIN, Danièle AYRAULT, Diogo GONÇALVES, Stéphane GOUNAND, Serge PASCAL,**

*Département de Recherche sur les Matériaux et la Physico-chimie pour les énergies bas carbone*

**et Séverine PAILLARD,**

*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*

### ► Références

- [1] O. ASSERIN et S. GOUNAND, Premiers résultats du projet collaboratif FUI – MUSICAS, Congrès NAFEMS France 2016 - Simulation numérique, moteur de performance, état de l'art : pratiques, tendances, impact industriel, Juin 2016, Paris, France. <https://cea.hal.science/hal-02442269>.
- [2] <http://www-cast3m.cea.fr>.
- [3] M. BROCHARD, *Modèle couplé cathode-plasma-pièce en vue de la simulation du procédé de soudage à l'arc TIG*, thèse de doctorat, université de Provence (Aix-Marseille I), 2009.
- [4] X-F. KONG, *Modélisation 3D d'écoulements avec surface libre pour le soudage à l'arc TIG*, thèse de doctorat, École nationale d'ingénieurs de Saint-Étienne (ENISE), 2012.
- [5] X-F. KONG, O. ASSERIN, S. GOUNAND, P. GILLES, J-M. BERGHEAU and M. MÉDALE, "3D finite element simulation of TIG weld pool", *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, Vol. 33, N° 1, <http://stacks.iop.org/1757-899X/33/i=1/a=012025>, 2012.
- [6] M-C. NGUYEN, *Modélisation et simulation multi-physique du bain de fusion en soudage à l'arc TIG*, thèse de doctorat, université d'Aix-Marseille I, 2015.
- [7] M-C. NGUYEN, M. MÉDALE, O. ASSERIN, S. GOUNAND and P. GILLES, "Sensitivity to welding positions in GTA welding with a 3D multiphysics numerical model", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 71, No. 3, pp. 233-249, <https://dx.doi.org/10.1080/10407782.2016.1264747>, 2017.
- [8] C. NAHED, *Magneto-thermo-hydrodynamic modelling of TIG welding : a 3D unified coupling of the arc-plasma and the weld pool*, thèse de doctorat, université d'Aix-Marseille I, 2021.
- [9] C. NAHED, S. GOUNAND and M. MÉDALE, "A numerical study of the effects of cathode geometry on tungsten inert gas type electric arcs", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 182, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931021010280>, 2022.
- [10] S. MORVILLE, *Modélisation multi-physique du procédé de fabrication directe par projection laser en vue d'améliorer l'état de surface final*, thèse de doctorat, université de Bretagne-Sud, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-0080669>, 2012.
- [11] F. GABRIEL, D. AYRAULT, A. FONTES, J.-L. ROATTA and M. RAYNAUD, "Global method for estimation of heat source parameters dedicated to narrow gap GTA welding", *Mathematical Modelling of Weld Phenomena*, 8, pp. 921-936, 2006.
- [12] O. ASSERIN, *Méthodologie pour l'identification des paramètres d'un modèle de source de chaleur dédié à la simulation numérique du soudage. Mise en œuvre avec le logiciel WPROCESS*, rapport technique CEA/DEN/DM2S/SEMT/LTA/RT/09-003/A, 2009.
- [13] O. ASSERIN, P. GILLES, E. GUYOT and J. SCHROEDER, "Identification of a heat source model for multipass narrow groove GMA welding process", *Welding in the World*, 58, pp. 161-169, <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0109-4>, 2014.
- [14] A. BAUMARD, *Prédiction des microstructures de solidification d'un composant en acier 316L élaboré par fabrication additive*, thèse de doctorat, université de Montpellier, <http://www.theses.fr/s191801>, 2020.
- [15] A. BAUMARD, D. AYRAULT, O. FANDEUR, C. BORDREUIL and F. DESCHAUX-BEAUME, "Numerical prediction of grain structure formation during laser powder bed fusion of 316L stainless steel", *Materials and Design*, 199, 109434, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109434>, 2021.
- [16] R. ENGEL, *Modélisation des microstructures de solidification de l'acier 316L élaboré par fabrication additive*, thèse de doctorat en cours, université de Montpellier, 2020-2023.
- [17] Ch-A. GANDIN and M. RAPPAZ, "A coupled finite element-cellular automaton model for the prediction of dendritic grain structures in solidification processes", *Acta Metall. Mater.*, Vol. 42, No. 7, pp. 2233-2246, 1994.
- [18] Ch-A. GANDIN, J-L. DESBIOLLES and M. RAPPAZ, "A three-dimensional cellular automaton-finite element model for the prediction of solidification grain structures", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 30A, 1999.
- [19] G. GUILLEMOT, Ch-A. GANDIN, H. COMBEAU and R. HERRINGER, "A new cellular automaton-finite element coupling scheme for alloy solidification", *Modelling and simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 12, No. 3, pp. 545-556, 2004.
- [20] T. CAROZZANI, *Développement d'un modèle 3D automates cellulaires – éléments finis (CAFE) parallèle pour la prédiction de structures de grains lors de la solidification d'alliages métalliques*, thèse de doctorat, ENSAM ParisTech, 2012.
- [21] S. CHEN, *Three-dimensional Cellular Automaton-Finite Element (CAFE) modelling for the grain structures development in Gas Tungsten/Metal Arc Welding Processes*, thèse de doctorat, Mines ParisTech, 2014.
- [22] S. CHEN, G. GUILLEMOT and Ch-A. GANDIN, "Three-dimensional cellular Automaton-Finite Element modelling of solidification grain structures for arc welding processes", *Acta Materialia*, Vol. 115, pp. 448-467, 2016.
- [23] <http://www.extende.com/civa-in-a-few-words>.
- [24] <https://amitexfftp.github.io/AMITEX/index.html>.
- [25] A. BONAVENTURE, *Évaluation expérimentale et numérique des contraintes résiduelles dans les structures soudées en multi-passe*, thèse de doctorat, université de technologie de Troyes, 2012.



- [26] J.-B. LEBLOND and J. DEVAUX, "A new kinetic model for anisothermal metallurgical transformations in steels including effect of austenite grain size", *Acta Metallurgica*, Vol. 32, Issue 1, pp. 137-146, January 1984.
- [27] D. P. KOISTINEN and R. E. MARBURGER, "A general equation prescribing the extent of the austenite-martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels", *Acta Metallurgica*, Vol. 7, Issue 1, pp. 59-60, January 1959.
- [28] C. BERTHINIER, *Implémentation des modèles de changement de phase métallurgique de type Leblond et Koistinen-Marburger dans Cast3M*, note technique CEA/DEN/DANS/DM2S/SEMT/LT2S/NT/2019-62475/A, 2019.
- [29] S. PASCAL, *Net TG8 simulation Protocol with Cast3M : thermal analysis*, compte rendu de réunion de clôture des actions du lot 3 du projet MSNS de l'I3P », 9 décembre 2021.
- [30] H. POMMIER, « Lot 3 du projet Modélisation et simulation numérique du soudage : résultats des travaux CEA-EDF-FRAMATOME de 2018 », DEN/DANS/DM2S/SEMT/LTA/NT/2019-64183/A, 2019.
- [31] D. GONÇALVES, "Deliverable 2.6 of GEMMA H2020 Project : Residual Stress Modelling (WP2, Task 2.4)", DES/ISAS/DM2S/SEMT/LTA/NT/2021-68762/A, 2021.
- [32] D. ARTIÈRES, *Wire Arc Additive Manufacturing : Experimental study and thermomechanical modelling*, Master Thesis Report, 2021.
- [33] C. BERTHINIER, « Simulation 3D à très grand nombre de passes – Réalisation d'un tube en acier 316L par la technologie WAAM », *Séminaire Fab-Add*, CEA Saclay, 28-29 janvier 2020.
- [34] S. PASCAL, « Quelques nouvelles fonctionnalités pour la simulation numérique du soudage et de la fabrication additive dans Cast3M », *Club Cast3M 2020*, Paris, [http://www-cast3m.cea.fr/html/ClubCast3m/club2020/Expose\\_Serge\\_PASCAL.pdf](http://www-cast3m.cea.fr/html/ClubCast3m/club2020/Expose_Serge_PASCAL.pdf), 2020.
- [35] M. LE, *Approches expérimentale et numérique de la fissuration à chaud dans les soudures en acier inoxydable*, thèse de doctorat, université de Bretagne-Sud, 2014.
- [36] Y. GAO, *Un essai robuste et fiable pour la recette de produits d'apport en soudage d'aciers inoxydables*, thèse de doctorat, université de Bretagne-Sud, 2017.
- [37] H. POMMIER, « Simulation thermomécanique du soudage multi-passe et prédiction de la fissuration en relaxation d'une éprouvette Borland », DEN/DANS/DM2S/SEMT/LTA/NT/2018-62326/A, 2018.
- [38] D. GONÇALVES, « Avancement de l'étude sur la fissuration en relaxation des éprouvettes type Borland : comparaison entre les mesures de contrainte résiduelles et les simulations numériques », DES/ISAS/DM2S/SEMT/LTA/NT/2020-66997/A, 2020.
- [39] B. PY-RENAUDIE, « Rapport d'avancement de deuxième année de thèse : effet du soudage sur la fissuration en relaxation de l'acier austénitique inoxydable AISI 316L(N) », DES/ISAS/DM2S/SEMT/LTA/NT/69520-2022/A, 2022.
- [40] O. DOYEN, N. RIZZO, L. FOREST, J. TOSI, N. THOMAS and M. ZMITKO, "Assessment of HCLL-TBM optimum welding sequence scenario to minimize welding distortions", *Fusion Engineering and Design*, 121, pp. 80-86, 2017.
- [41] L. FOREST, "Breeding Blanket Project. 2019 – Yearly monitoring report deliverable BB-7.9-T006-D001", DES/ISAS/DM2S/SEMT/LTA/NT/2020-66480/A, 2020.
- [42] S. PASCAL, "Deliverable BB-7.1.2-T007-D002 / Welding simulation of a breeding blanket module: last results", DES/ISAS/DM2S/SEMT/LTA/NT/2021-67696/A, 2021.
- [43] O. ASSERIN, A. BROSSE, S. CHAPULIOT et V. ROBIN, « Guide méthodologique de simulation des contraintes résiduelles du soudage avec un outil de calcul scientifique employé dans la démonstration de sûreté couvrant l'îlot nucléaire », DEN/DANS/DM2S/SEMT/LTA/RT/2019-65749/A, 2019.
- [44] O. ASSERIN et E. DEMALDENT, « Les grands enjeux de simulation », *Clefs CEA*, n° 72, « L'impression 3D au cœur des grandes transitions », [https://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/clefs-cea/clefs\\_N72-fabrication-additive.pdf](https://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/clefs-cea/clefs_N72-fabrication-additive.pdf), 2021.
- [45] <https://www.net-network.eu>, 2023.
- [46] O. ASSERIN et S. GOUNAND, Premiers résultats du projet collaboratif FUI – MUSICAS, <https://cea.hal.science/hal-02442269>, 2020.



# Vibrations sous écoulement

## Introduction

Les phénomènes d'interaction fluide-structure (IFS) sont omniprésents dans les installations industrielles où des structures sont en contact avec un fluide sous écoulement qui exerce un chargement mécanique. Pour des structures élancées et souples, l'IFS peut induire des phénomènes vibratoires et des instabilités mécaniques à l'origine de grandes amplitudes de déplacements. L'industrie nucléaire est confrontée à cette problématique, notamment au niveau des tuyauteries, des assemblages de combustible, des grappes de commande ou encore des générateurs de vapeur. Pour des raisons évidentes de sûreté, la surveillance et la maîtrise de ces vibrations sont un point fondamental pour le concepteur et l'exploitant d'une centrale, ainsi que pour les autorités de sûreté.

On identifie dans une centrale de type REP (réacteur à eau sous pression) deux lieux significatifs où le couplage entre réponse dynamique des structures et écoulement présente des enjeux majeurs, avec des développements méthodologiques généralisables à d'autres composants : le générateur de vapeur, d'une part, le cœur et les assemblages de combustible, d'autre part. Ces deux points critiques sont détaillés ci-après.

## Couplage fluide-structure avec risque d'instabilité fluide-élastique pour le générateur de vapeur

### Problématique principale

Un REP comprend habituellement plusieurs générateurs de vapeur (GV) permettant le transfert de chaleur du circuit primaire vers le circuit secondaire, les deux circuits devant rester parfaitement isolés. L'échange thermique entre les deux circuits se fait au travers de tubes en forme de U renversé. L'eau chaude du circuit primaire, pressurisée (155 bars) et chauffée (320 °C) par le cœur du réacteur nucléaire, s'écoule à l'intérieur des tubes alors que l'eau froide du circuit secondaire s'écoule à l'extérieur des tubes. Cette dernière, portée à ébullition, se transforme en vapeur qui alimente les turbines génératrices d'électricité. Un GV est constitué de quelques milliers de tubes (faisceau de tubes) représentant une surface d'échange de l'ordre de 5 000 m<sup>2</sup>. Ces tubes

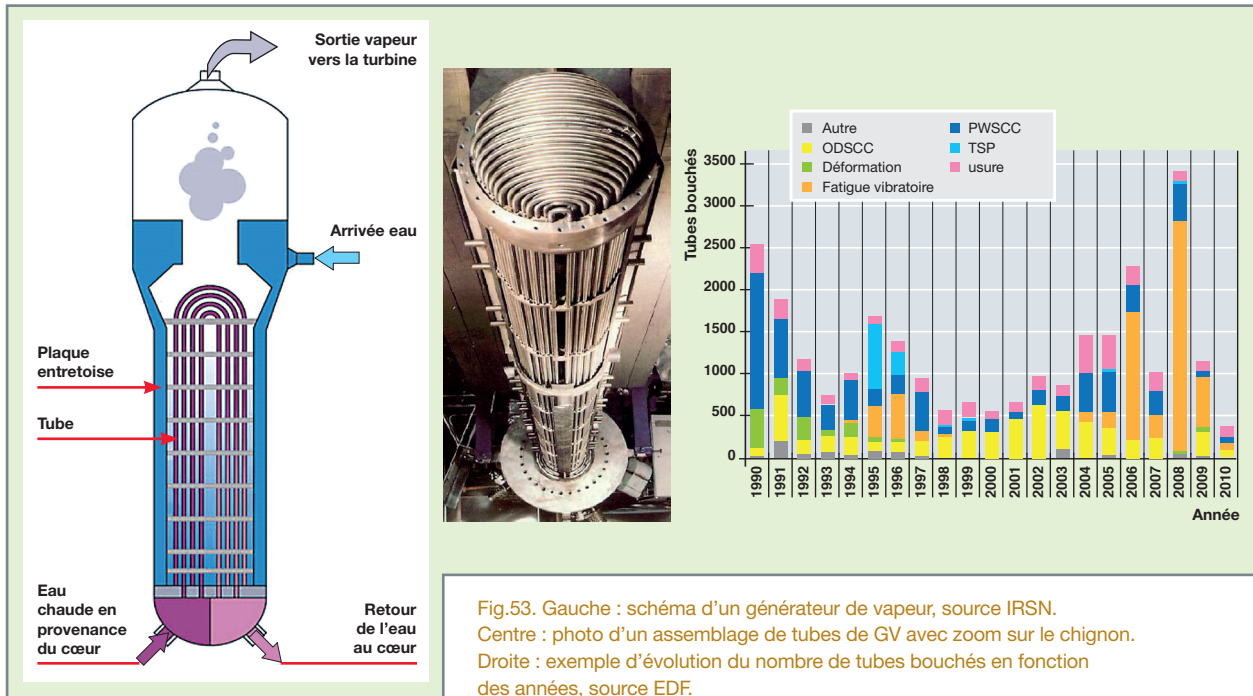
élancés sont dudgeonnés en partie basse sur une plaque tubulaire et guidés sur leur hauteur par des plaques entretoises composées d'orifices qui permettent à l'eau liquide du circuit secondaire de s'écouler pour se transformer progressivement en vapeur.

En tant que structures élancées et flexibles, les tubes de GV sont soumis aux mécanismes de l'IFS, en particulier au niveau de la partie supérieure cintrée (chignon) soumise à un écoulement transverse diphasique eau-vapeur. Les vibrations liées à cette interaction peuvent induire des dommages (fatigue et usure par frottement et chocs) pouvant entraîner de graves conséquences pour la sûreté nucléaire. Pour faire face à ces différents modes de dégradation des tubes de GV et éviter des fuites entre le circuit primaire radioactif et le circuit secondaire, des contrôles à l'aide de sondes à courant de Foucault passant dans les différents tubes sont réalisés lors des arrêts des réacteurs. En fonction des résultats de ces contrôles, des bouchages de tubes peuvent être réalisés de manière préventive (voir fig. 53). Enfin, lorsque les dégradations des tubes deviennent trop importantes, ce qui entraîne une perte conséquente de l'efficacité du GV et pénalise le rendement total de la centrale, des opérations lourdes de remplacement des générateurs de vapeur associés à un réacteur sont réalisées.

Dans le cadre de la prévention des risques vibratoires des tubes de GV, et afin d'améliorer le dimensionnement et évaluer les marges en fonctionnement normal ou dégradé des GV, des études expérimentales, numériques et théoriques (voir [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8]) sont conduites par les acteurs du nucléaire. Pour les tubes de GV, ces études portent essentiellement sur les mécanismes de l'IFS en écoulement transverse monophasique (IFS en partie basse des tubes) ou diphasique (IFS au niveau du chignon). L'étude des mécanismes d'IFS dans ces deux zones est alors réalisée à l'aide de faisceaux analytiques de tubes droits soumis à un écoulement transverse, monophasique ou diphasique.

### Démarche expérimentale

Dans le but de mieux appréhender et quantifier les phénomènes vibratoires des tubes de GV, des travaux expérimentaux sont menés depuis une quarantaine d'années au sein du Laboratoire d'Études de Dynamique (DYN) du CEA, sur des maquettes analytiques à échelle réduite. Afin de limiter



le coût des installations, et par souci de sécurité, ces études sont réalisées avec des fluides simulants, en l'occurrence de l'eau et de l'air. Les deux principales maquettes exploitées au sein du laboratoire DYN s'appellent DIVA et TITAN (voir fig. 54). La maquette DIVA est principalement dédiée à l'étude des vibrations dans les faisceaux à pas carré. Elle reproduit ainsi à échelle réduite l'IFS dans les GV qui équipent actuellement les 32 réacteurs nucléaires de 900 MWe et les 20 réacteurs de 1 300 MWe du parc français. La maquette TITAN est quant à elle dédiée à l'étude des vibrations dans les faisceaux à pas triangulaire. Ces faisceaux permettent de placer un plus grand nombre de tubes au sein des GV qui équipent actuellement les quatre réacteurs de 1 450 MWe de palier N4 et équiperont les futurs EPR. Les deux maquettes sont alimentées par une boucle équipée d'une pompe pouvant débiter de 5 à 300 L/s d'eau et d'un compresseur à air pouvant débiter jusqu'à 3 000 m<sup>3</sup>/h sous une pression absolue de 8 bars. La boucle peut ainsi fonctionner en écoulement d'eau, en écoulement d'air ou en écoulement diphasique eau-air. La maquette DIVA est constituée de 15 tubes en acier inox placés sur cinq rangées et de 10 demi-tubes pour limiter les effets de bord. Les tubes ont un diamètre  $D = 30$  mm, une longueur  $L = 300$  mm et le faisceau un pas carré  $P = 45$  mm (distance entre les centres des tubes). La maquette TITAN est quant à elle composée de tubes similaires à ceux utilisés pour DIVA, mais disposés selon un arrangement triangulaire parallèle et un pas  $P = 43,2$  mm. Ces deux maquettes permettent d'étudier plusieurs configurations flexibles, notamment le cas d'un tube unique monté sur un bilame flexible positionné au centre

d'un faisceau rigide (voir fig. 54), ou le cas d'une cellule de tubes montés sur des mono-lames flexibles. Deux caractéristiques fondamentales de ces maquettes sont i) la possibilité de découpler le mouvement des tubes selon les directions de portance (direction perpendiculaire à l'écoulement) et de traînée (même direction que l'écoulement), ii) l'utilisation d'un système de contrôle actif sans contact (actionneur électrodynamique ; voir fig. 54), permettant d'amortir les vibrations des tubes afin d'explorer leur dynamique sous d'importantes vitesses d'écoulement (au-delà du seuil d'instabilité). La mesure expérimentale de la force fluide s'exerçant sur un tube flexible est réalisée par la méthode directe ou indirecte. Dans la méthode directe, le déplacement du tube est imposé par un pot vibrant (actionneur PRODERA ; voir fig. 54) et la force fluide est directement mesurée par un capteur piézoélectrique. Malgré son apparente simplicité, cette méthode introduite par Tanaka dans les années 1980 [9] reste difficile à mettre en place expérimentalement, car elle nécessite une parfaite maîtrise du déplacement imposé. Dans la méthode indirecte, le mouvement du tube est libre, piloté par son interaction naturelle avec l'écoulement incident. La force fluide est alors obtenue indirectement à partir de la mesure, via un capteur laser, du déplacement et de la vitesse du tube. Les variations de fréquence et d'amortissement du tube par rapport aux références mesurées en fluide au repos permettent alors de remonter aux caractéristiques de la force fluide sous écoulement. La méthode indirecte est simple, robuste et sert de référence pour les essais effectués sur les maquettes DIVA et TITAN. Dans ce qui suit, nous présenterons les principaux résultats



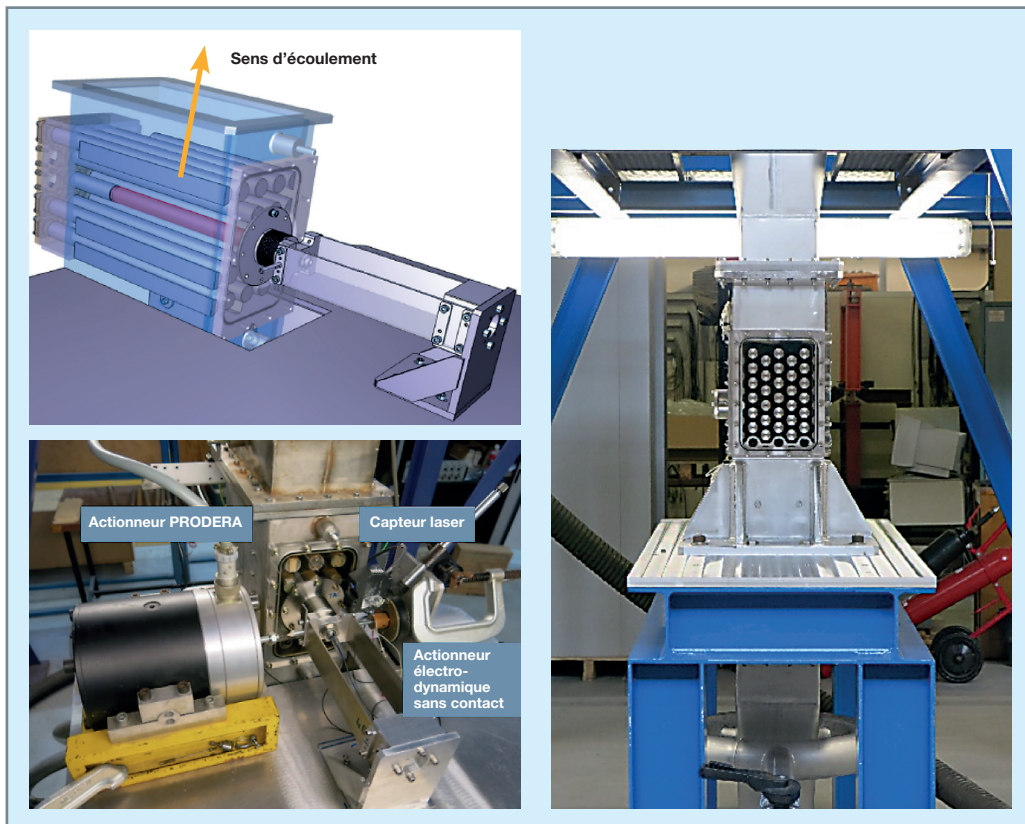


Fig. 54. Haut : schéma de la maquette DIVA (faisceau à pas carré) et bas : photo de l'instrumentation. Droite : photo de la maquette TITAN (faisceau à pas triangulaire).

obtenus par le laboratoire DYN, en écoulement monophasique (maquette DIVA), puis diphasique eau/air (maquettes DIVA et TITAN). Avant d'introduire ces résultats, il convient de faire un point sur la modélisation de l'IFS, en particulier des forces de couplage entre un tube flexible et un écoulement.

### Modélisation pour l'étude de la stabilité du système fluide-structure couplé

La modélisation du chargement mécanique exercé par un écoulement sur un tube flexible repose sur l'hypothèse d'un découplage de la force fluide en deux types de phénomènes distincts :

- Les phénomènes aléatoires, modélisés par une force fluide indépendante du mouvement du tube. Cette force, aussi appelée excitation aléatoire, est liée à l'intensité turbulente générée par l'écoulement à travers le faisceau. L'augmentation de cette intensité avec la vitesse de l'écoulement conduit à une croissance linéaire de l'amplitude vibratoire de la structure (voir fig. 55) ;

- les phénomènes couplés, modélisés par une force fluide  $F_{FE}$  qui dépend du déplacement  $X$ , de la vitesse  $\frac{dX}{dt}$  et de l'accélération  $\frac{d^2X}{dt^2}$  du tube. Cette force est traditionnellement décomposée sous la forme :

$$F_{FE} = -M_f \frac{d^2X}{dt^2} - C_f \frac{dX}{dt} - K_f X \quad (1.1),$$

où  $(M_f, C_f, K_f)$  sont des fonctions de la vitesse de l'écoulement et représentent des coefficients de masse, d'amortissement et de rigidité ajoutés.

Sous l'hypothèse de décomposition (1.1), le système couplé fluide-structure est alors caractérisé par un triplet de coefficients  $(M_s + M_f, C_s + C_f, K_s + K_f)$ , où  $(M_s, C_s, K_s)$  représentent la masse, l'amortissement et la rigidité du tube en air. Pour une vitesse d'écoulement critique  $V_c$ , l'amortissement total  $(C_T = C_s + C_f)$  du système couplé devient nul, entraînant une instabilité fluide-élastique qui se manifeste sous la forme d'une croissance exponentielle de l'amplitude de vibration (voir fig. 55). Ce type de phénomène peut conduire à une usure voire à un percement rapide des tubes de GV et a donc conditionné la plupart des études menées sur les

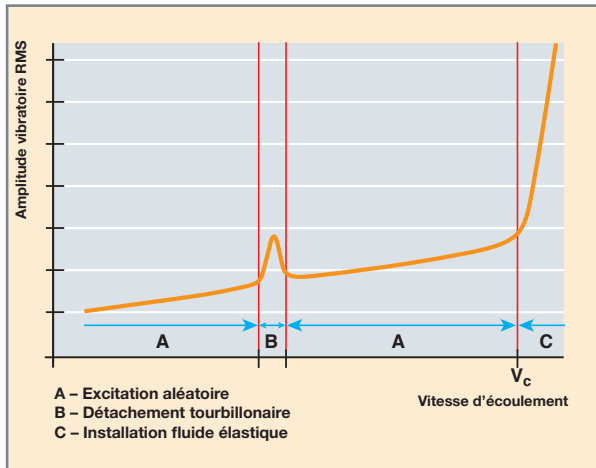


Fig. 55. Évolution de l'amplitude vibratoire en fonction du débit de l'écoulement. L'excitation aléatoire est liée à l'intensité turbulente de l'écoulement. Le détachement tourbillonnaire, absent en écoulement diphasique, correspond à une organisation périodique de l'écoulement autour du tube. L'instabilité fluide-élastique est caractérisée par une croissance exponentielle de l'amplitude vibratoire [10].

faisceaux. Un adimensionnement est alors nécessaire pour transposer les résultats de ces études, réalisées sur des maquettes à échelle réduite, vers le cas du GV à échelle industrielle.

Les principaux nombres sans dimension permettant cette transposition sont :

- Le pas réduit,  $p = P/D$ , qui caractérise la taille de l'espace libre utilisé par le fluide pour circuler entre les tubes ;
- le nombre de Reynolds,  $Re = DV/v$ , avec  $V$  la vitesse de l'écoulement au sein du faisceau de tubes et  $v$  la viscosité cinématique du fluide de densité  $\rho$ . Ce nombre caractérise principalement la vitesse de l'écoulement ;
- le nombre de Stokes,  $Sk = F_0 D^2/v$ , avec  $F_0$  la fréquence du tube en fluide au repos. Ce nombre caractérise principalement la flexibilité du tube ;
- la vitesse réduite,  $Vr = V/F_0 D$ , qui caractérise le rapport entre la vitesse de l'écoulement et une vitesse caractéristique de vibration du tube. Ce nombre sans dimension s'exprime en fonction de  $Re$  et  $Sk$  sous la forme  $Vr = Re/Sk$  ;
- le nombre de Scruton,  $Sc = C_0/(2\rho D^2 L F_0)$  avec  $C_0$  l'amortissement du tube en fluide au repos. Ce nombre caractérise principalement la masse et l'amortissement du tube et est parfois appelé paramètre masse-amortissement.

Tous ces nombres sans dimension caractérisent le système couplé fluide-structure, en particulier son amortissement total  $C_T = C_s + C_f$  et son seuil de stabilité  $C_T = 0$ .

## Résultats en monophasique

Dans le cas d'un tube monté sur un bilame flexible, positionné au centre d'un faisceau rigide à pas carré (maquette DIVA, pas réduit  $p = 1,5$ ), libre de vibrer dans la direction de portance (méthode indirecte), et soumis à un écoulement transverse monophasique, l'amortissement total réduit  $c_T = C_T/C_0$  du système couplé est alors une fonction du nombre de Reynolds (effet de la vitesse du fluide) et du nombre de Stokes (effet de la rigidité des lames). Les résultats expérimentaux [11] obtenus avec différents jeux de lames de raideur différente, et représentés sur la figure 56, montrent alors que :

- Pour des faibles nombres de Reynolds, l'amortissement du système couplé est constant, indiquant une faible influence de la vitesse de l'écoulement sur l'amortissement du tube ;
- pour des nombres de Reynolds intermédiaires, l'amortissement du système couplé augmente, indiquant une stabilisation du tube par le fluide ;
- pour des grands nombres de Reynolds, l'amortissement du système couplé diminue et le tube devient instable pour  $C_T = 0$ .

Des essais complémentaires réalisés en méthode directe ont permis de définir une carte de stabilité du système couplé, dans le plan de Connors ( $Sc, Vr$ ) (voir fig. 56). Cette carte montre que :

- Pour un nombre de Scruton fixé, un tube est d'autant plus stable (dans le sens où le nombre de Reynolds augmente) que le nombre de Stokes est grand ;
- pour un nombre de Stokes fixe, un tube est d'autant plus stable que le nombre de Scruton est grand ;
- pour un nombre de Reynolds fixe, plus le nombre de Scruton est grand et plus il faut diminuer le nombre de Stokes pour le rendre instable.

En d'autres termes, les variations observées expérimentalement confirment qu'un tube est d'autant plus stable qu'il est rigide et/ou que son paramètre masse-amortissement est grand. Une régression non linéaire des résultats expérimentaux a permis d'obtenir une nouvelle loi capable de prédire très correctement le seuil de stabilité en écoulement monophasique. Cette nouvelle loi montre en particulier qu'il n'est pas possible de condenser les effets du nombre de Stokes (*i.e.* de la fréquence) et du nombre de Reynolds en un unique paramètre sans dimension, la vitesse réduite, comme le suggérait Connors [12].

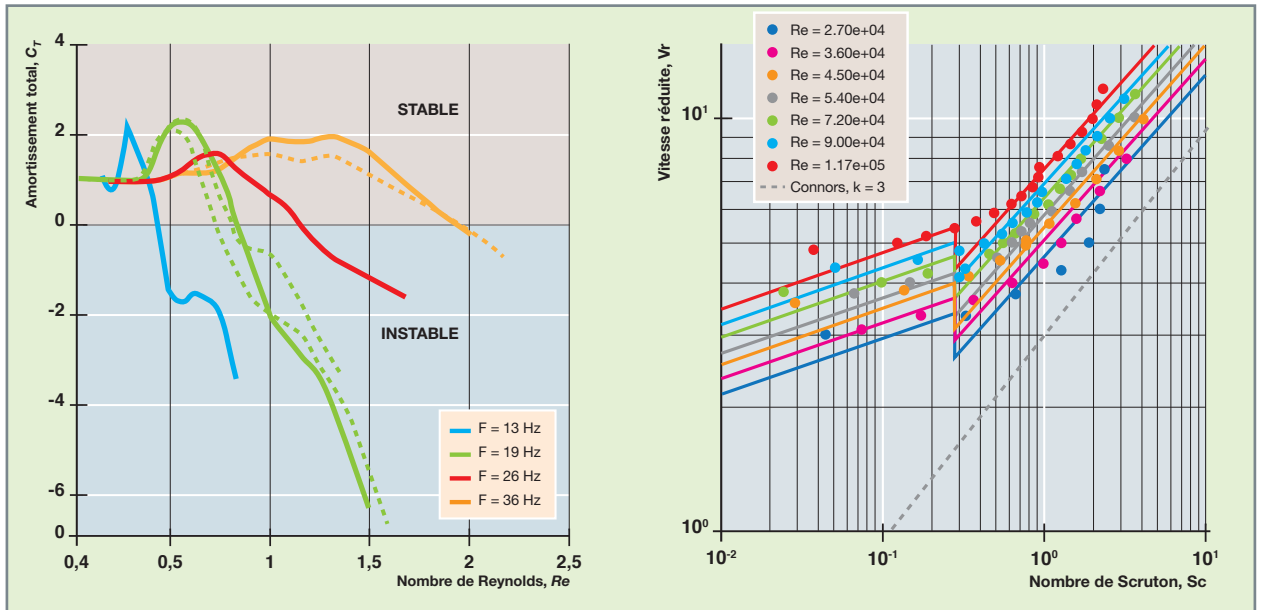


Fig. 56. Gauche : amortissement du système couplé obtenu par la méthode indirecte, avec des jeux de lames de différentes fréquences en fluide au repos, en fonction du nombre de Reynolds. Droite : diagramme de stabilité obtenu par la méthode directe, pour différents nombres de Reynolds.

### Cas des écoulements diphasiques

Les écoulements diphasiques se distinguent des écoulements monophasiques en particulier par la richesse des régimes hydrodynamiques qu'ils génèrent. En effet, les propriétés physiques du fluide diphasique (densités et viscosités des phases, tension superficielle) et les caractéristiques de son écoulement (vitesse des phases, taux de vide) peuvent conduire à diverses distributions spatiales d'interfaces entre les phases, correspondant à différents régimes d'écoulement. Afin de comprendre la physique de ces régimes, il est alors nécessaire de procéder à leur classification via l'introduction de cartes d'écoulement. La généralité de ces cartes reste néanmoins limitée, car leur établissement est bien souvent lié à des observations visuelles ou, dans le meilleur des cas, repose sur des indicateurs expérimentaux mesurés dans des conditions bien précises. Dans le cadre de l'étude de l'IFS entre un écoulement diphasique eau-air et un faisceau à pas carré (DIVA), le Laboratoire d'Études de Dynamique a réalisé des mesures avec une bisonde optique introduite au sein du faisceau. Une carte des régimes d'écoulement a été proposée à partir d'une analyse du nombre de bulles passant devant la bisonde optique (voir fig. 57). Cette carte a permis de définir, en fonction des débits des deux phases et des vitesses superficielles associées, des frontières entre différents régimes d'écoulement :

- Les écoulements à bulles, caractérisés par la présence de petites bulles d'air dispersées au sein de la phase liquide ;

- les écoulements à poches ou à bouchons, caractérisés par l'existence de grosses bulles d'air entourées d'un film d'eau ;
- les écoulements à brassage intense, caractérisés par un important nombre de bulles d'air pouvant interagir et coalescer les unes avec les autres pour former de plus grandes bulles déformées ;
- les écoulements dispersés/annulaires caractérisés par la formation d'un film d'eau annulaire autour d'un noyau central d'air.

L'analyse précise de l'IFS en écoulement diphasique nécessiterait une prise en compte de ces différents régimes d'écoulement. Un travail théorique [13] a cependant montré que la limite de stabilité pour les vibrations d'un faisceau de tubes à pas carré sous écoulement eau-air était, au premier ordre, peu sensible à l'existence de ces régimes d'écoulement. Ce travail a permis en effet d'établir une loi de stabilité, sans paramètre ajustable, qui s'exprime sous la forme d'une relation entre nombres adimensionnels caractéristiques des propriétés géométriques, cinématiques et matérielles du système couplé fluide-structure. Cette loi montre que le seuil de stabilité en écoulement diphasique est directement lié aux seuils de stabilité en écoulement monophasique air et eau, ainsi qu'au taux de présence du gaz dans le mélange. Cette loi a été validée expérimentalement lors d'une campagne d'essais réalisés sur la maquette DIVA (voir fig. 57).

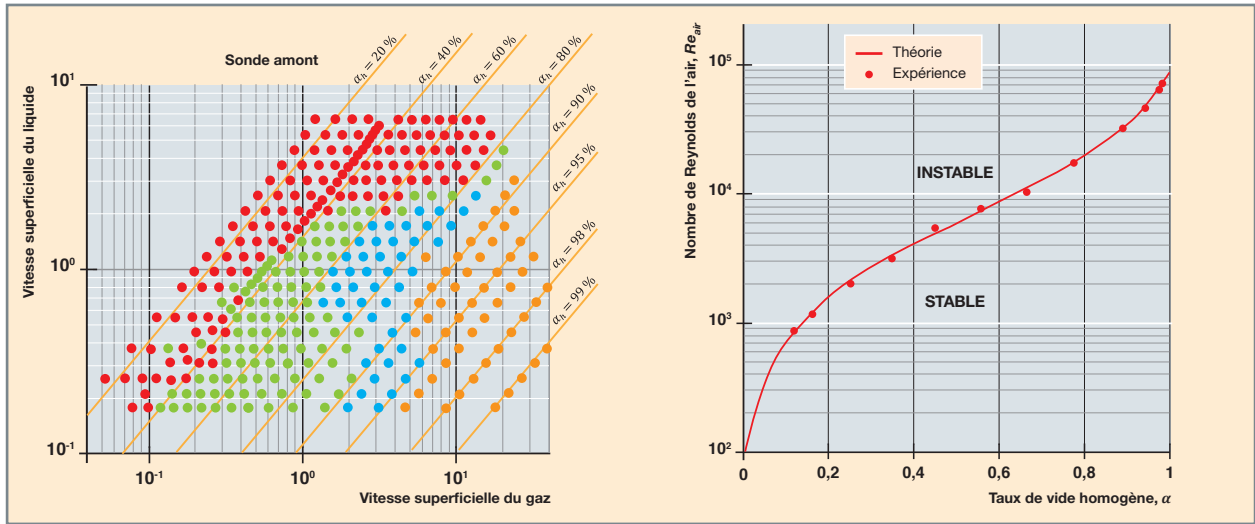


Fig. 57. Gauche : carte des régimes d'écoulement déterminés expérimentalement. Écoulement à bulles (rouge), écoulements à bouchons (« plug/slug », vert), écoulements à brassage intense (« chum », bleu), dispersé/annulaire (orange). Les axes représentent les vitesses superficielles des phases, exprimées en m/s. Droite : diagramme de stabilité en pas carré (DIVA).

En perspective, il est prévu d'éprouver la validité de cette loi sur des résultats d'essais obtenus avec d'autres fluides simulants et sur des faisceaux à pas triangulaires. Ce type de faisceau fait l'objet d'une attention particulière depuis l'incident de la centrale nucléaire de San Onofre en 2012. Des inspections ont en effet montré que les tubes de GV, disposés suivant un arrangement triangulaire, ont subi une instabilité fluide-élastique dans la direction de traînée (instabilité dans le plan). Cette instabilité a provoqué une usure des tubes, conduisant à la fermeture définitive de la centrale en 2013.

Dans ce cadre, le Laboratoire d'Études de Dynamique a réalisé des mesures expérimentales en faisceaux à pas triangulaire, sur la maquette TITAN (faisceau à pas triangulaire caractérisé par un pas réduit  $p = 1,44$ ) [14]. Les mesures réalisées sous écoulement diphasique eau-air ont confirmé l'existence d'une instabilité fluide-élastique dans le plan. Elles ont également montré que, pour un taux de vide homogène supérieur à 30 %, un tube unique flexible positionné au sein d'un faisceau rigide à pas triangulaire ne subissait pas d'instabilité fluide-élastique dans la direction de portance (instabilité hors plan) pour des taux de vide homogènes

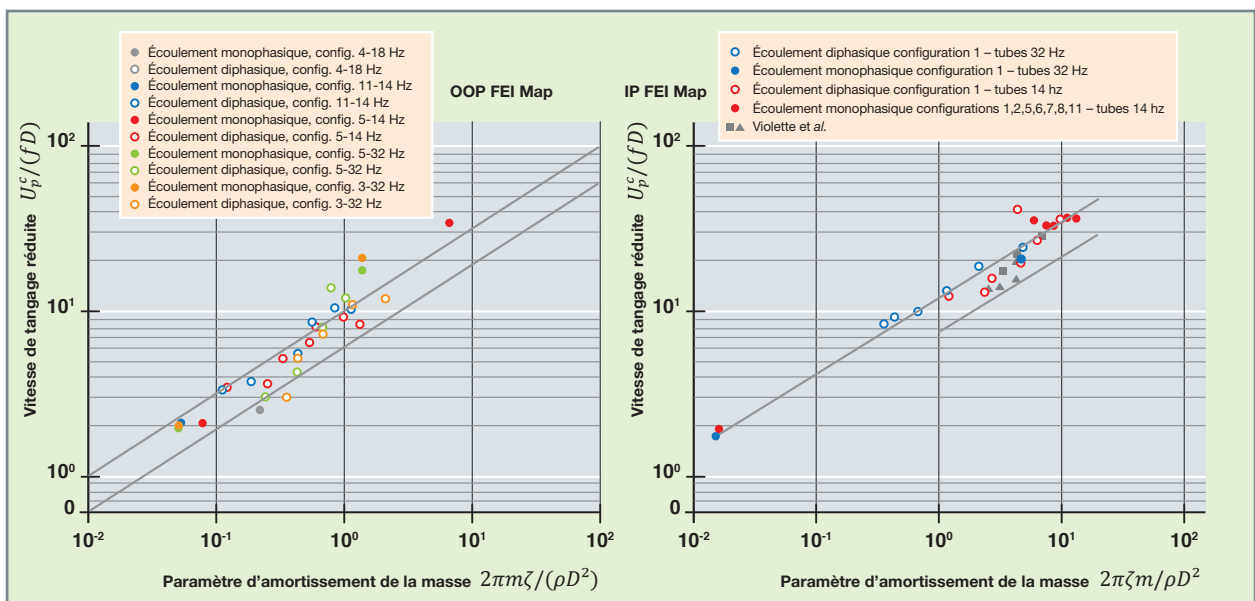


Fig. 58. Diagrammes de stabilité en portance (gauche) et en traînée (droite) en pas triangulaire (TITAN). Compilation de plusieurs données expérimentales obtenues avec plusieurs configurations de faisceaux flexibles, en écoulement monophasique ou diphasique.



supérieurs à 30 %. Ce comportement diffère de celui observé sur la maquette DIVA et semble ainsi indiquer qu'il n'est pas possible de transposer la loi de stabilité obtenue en faisceau à pas carré au cas du faisceau à pas triangulaire. Des expériences récentes ont toutefois montré l'existence d'une instabilité fluide-élastique dans la direction de portance, apparaissant pour tous les taux de vide, dans le cas d'un faisceau à pas triangulaire constitué de plusieurs tubes flexibles. Le report de l'ensemble de ces mesures dans un plan de Connors (vitesse réduite critique en fonction du nombre de Scruton ; voir fig. 58) a permis d'établir deux cartes de stabilité (en portance et en traînée) pour un faisceau à pas triangulaire. La comparaison de ces deux cartes montre que la vitesse réduite critique de l'instabilité hors plan est inférieure à celle de l'instabilité en traînée.

### Interaction fluide-structure à plusieurs échelles sous écoulement majoritairement axial pour l'assemblage de combustible REP

L'assemblage de combustible REP est une structure élançée composée d'un squelette relativement rigide (embouts inférieurs et supérieurs connectés par des tubes cylindriques) maintenant *via* des grilles régulièrement espacées sur sa hauteur un jeu de crayons contenant les pastilles de combustible. Composant multi-échelles par conception (voir notamment la figure 59), il met en évidence des phénomènes différents suivant que l'on s'intéresse localement aux crayons ou à la réponse globale de l'assemblage, comprenant l'interaction avec ses voisins dans un cœur de réacteur.

En termes d'interaction fluide-structure, l'assemblage est soumis à un écoulement majoritairement axial et monophasique liquide, fortement turbulent, avec un nombre de Reynolds de l'ordre de 500 000 dans les conditions réacteur de 155 bars et 310 °C. Parmi les régimes d'intérêt en fonction de l'échelle ou de la nature de la réponse de la structure, on sélectionne ci-dessous deux régimes particuliers, l'un pilotant le risque d'usure du crayon combustible, l'autre la réponse de l'assemblage à un transitoire incidentiel comme le séisme.

#### Interaction fluide-structure à l'échelle crayon/grille

On s'intéresse à cette échelle à la réponse du crayon en tant que poutre multi-supportée sur des appuis non linéaire soumise à une excitation turbulente. Les vibrations induites sont de très faibles amplitudes (de l'ordre de quelques  $\mu\text{m}$ ), donnant lieu à une usure caractérisée sous le nom de *fretting*. Il est alors communément admis que les caractéristiques spectrales de l'excitation fluide ne sont pas influencées par le mouvement des structures, autorisant un traitement

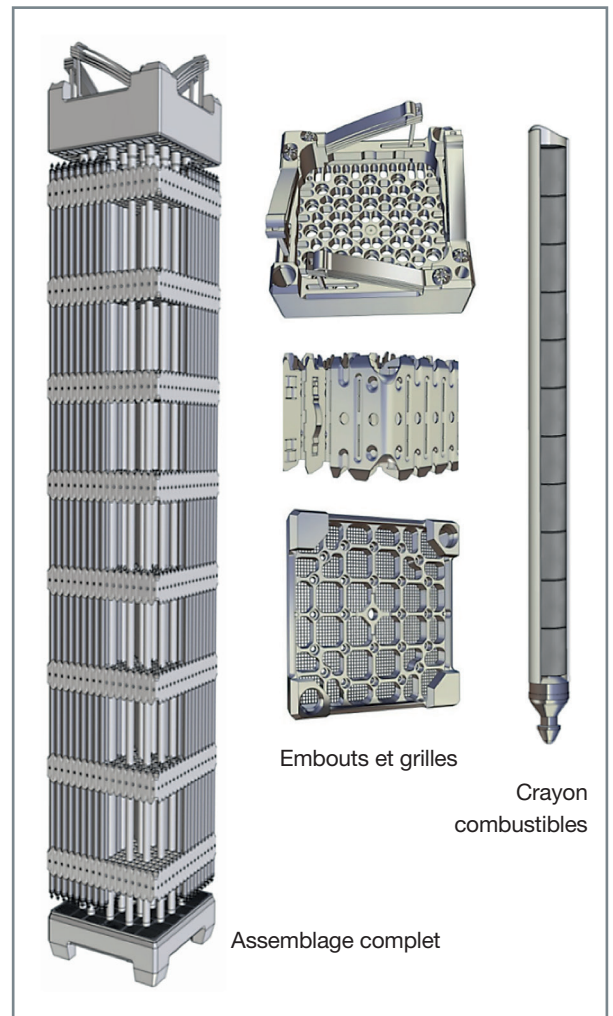


Fig. 59. Assemblage de combustible pour un réacteur à eau pressurisée.

séparé du problème fluide pour l'évaluation des forces de pression fluctuante sur les crayons et de la réponse vibratoire de ces derniers.

Pour le problème fluide, une approche couplée expérience/calcul est mise en œuvre au Département de Technologie Nucléaire (Laboratoire d'Essais en Thermohydraulique et Hydromécanique). Elle comprend des expériences de nature *CFD-grade* à échelle dilatée avec nombre de Reynolds en 20 000 et 140 000 [15], dont une illustration est donnée sur la figure 60, servant de base de validation à des outils de simulation en CFD avec représentation de la turbulence par *Large Eddy Simulation* (LES, voir également la référence [16]). Que ce soit expérimentalement ou numériquement, la sortie de cette étape pour le fluide est une série de spectres d'excitation turbulente à appliquer sur les crayons.

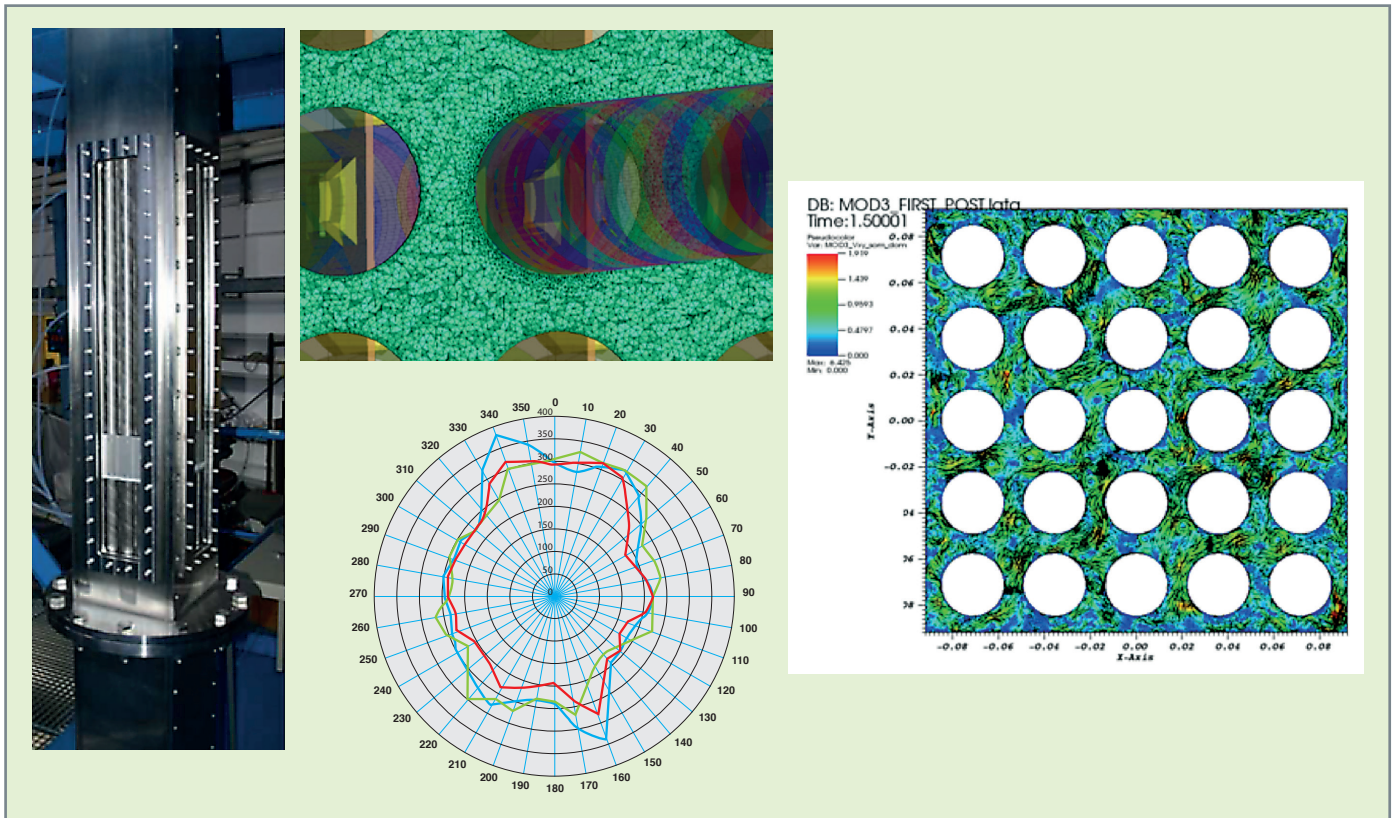


Fig. 60. Expériences et calculs pour les écoulements turbulents à l'échelle crayon/grille dans un assemblage. En haut à gauche, l'expérience CALIFS du Département de Technologie Nucléaire ; autres vues : maillage et résultats de calculs comparés à l'expérience, dont champ de vitesse en aval de la grille et distribution des fluctuations de pression autour du crayon central du faisceau de crayons.

Au niveau du calcul de structure, l'outil de référence pour le CEA est VITAMINE calculant la dynamique d'une poutre multi-supportée en réponse à une excitation turbulente transitoire générée à partir des spectres issus du problème fluide (voir fig. 61). Des grandeurs bien choisies calculées en

post-traitement du calcul de structure permettent d'enchaîner avec une évaluation des risques d'usure au niveau de l'interaction entre les crayons et leurs supports dans l'assemblage.

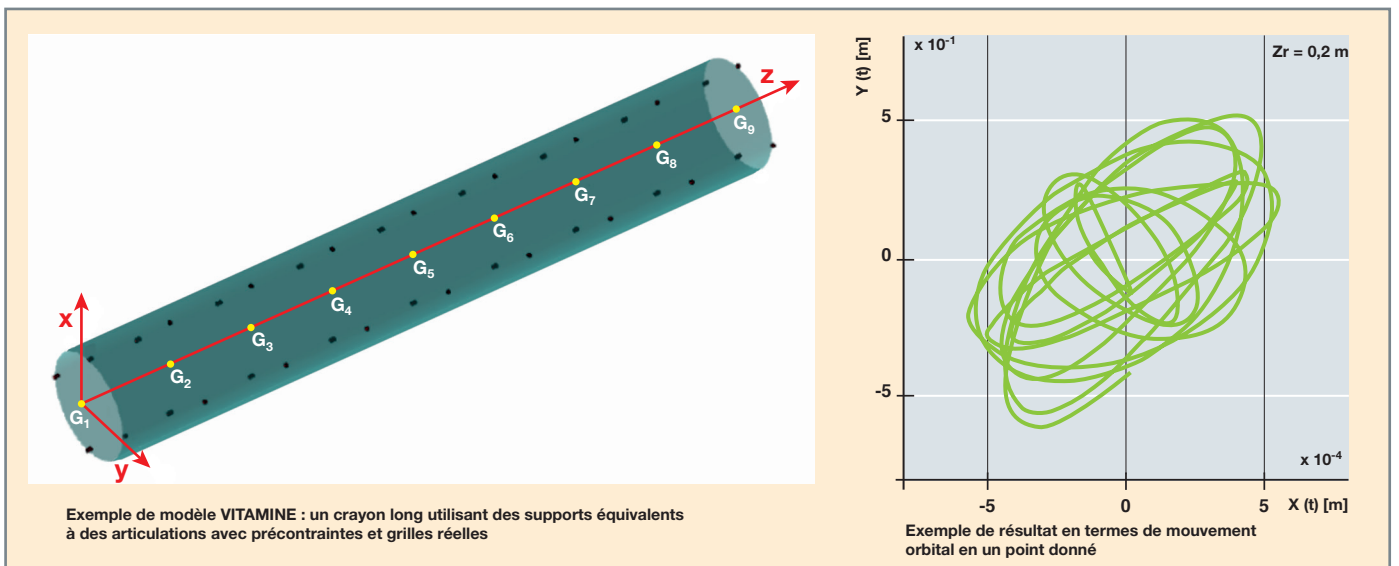


Fig. 61. Exemple de modèles et résultats pour le code VITAMINE.

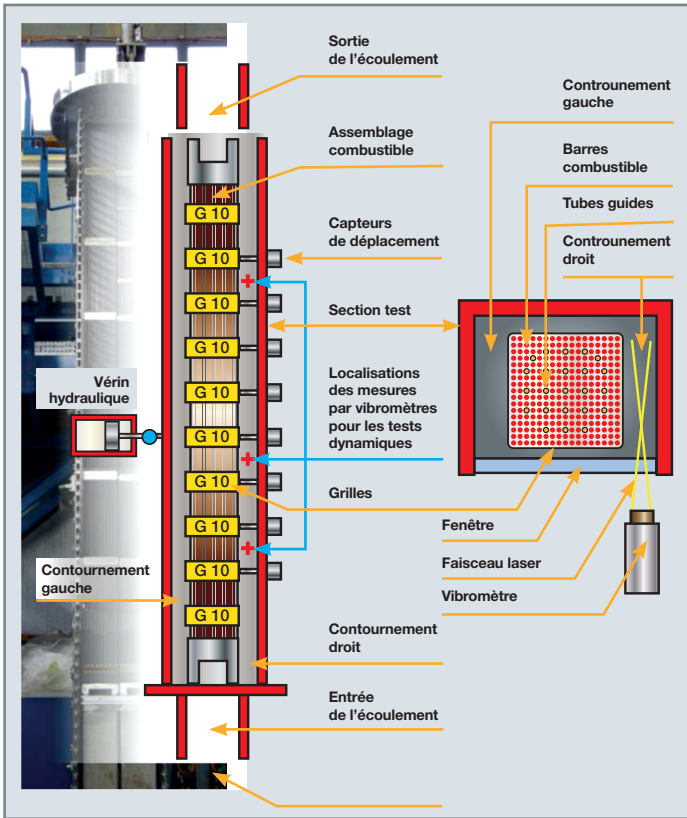


Fig. 62. Principe d'un essai dans HERMES T d'analyse de la réponse dynamique dans un assemblage en pleine échelle sous écoulement et excité au niveau d'une de ses grilles ; mesures de la vitesse fluide dans l'assemblage et dans les *by-passes* latéraux par LDV depuis la face avant transparente de la section d'essai.

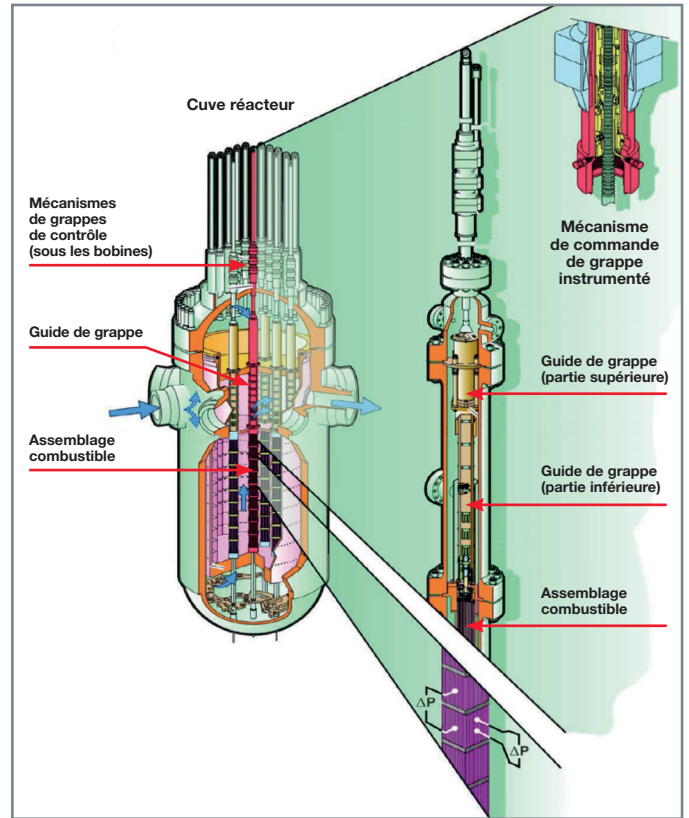


Fig. 63. Schéma de principe de la boucle HERMES P en pleine échelle et en conditions réacteur représentatives.

Le CEA dispose de plus de moyens d'essais d'exception permettant l'étude des phénomènes d'intérêt pour un assemblage en pleine échelle. Il s'agit des boucles HERMES (voir notamment la figure 62 pour HERMES T et la figure 63 pour la boucle HERMES P). Pour les vibrations induites et l'usure associée, les essais les plus significatifs sont :

- Des essais de vibrométrie sur HERMES T, en conditions de température et pression modérées permettant un accès optique intégral en face avant de la section d'essai et des mesures par interférométrie laser ;
- des essais d'endurance dans les conditions réacteur sur HERMES P, référence internationale pour les essais de cette nature.

### Interaction fluide-structure en dynamique à l'échelle assemblage

On s'intéresse à la réponse des assemblages composant un cœur de REP à une sollicitation mécanique externe, de type séisme ou transitoire de dépressurisation dans une des branches du réacteur. Dans cette configuration où l'écoulement est majoritairement axial, le risque d'instabilité fluide-élastique n'est pas un enjeu, contrairement au générateur de vapeur considéré précédemment. L'effet du fluide sur la dynamique d'un assemblage présente alors plusieurs aspects d'intérêt majeur :

- L'amortissement important induit par l'écoulement turbulent dans la dynamique du système fluide-structure, valorisable pour la sûreté ;
- les redistributions rapides de l'écoulement à travers l'assemblage en mouvement et dans les lames d'eau entre les assemblages ;
- les couplages hydrauliques (*i.e.* *via* le fluide sans contact entre les structures) ;
- l'effet de l'écoulement sur les forces d'impact entre structures au niveau des grilles.



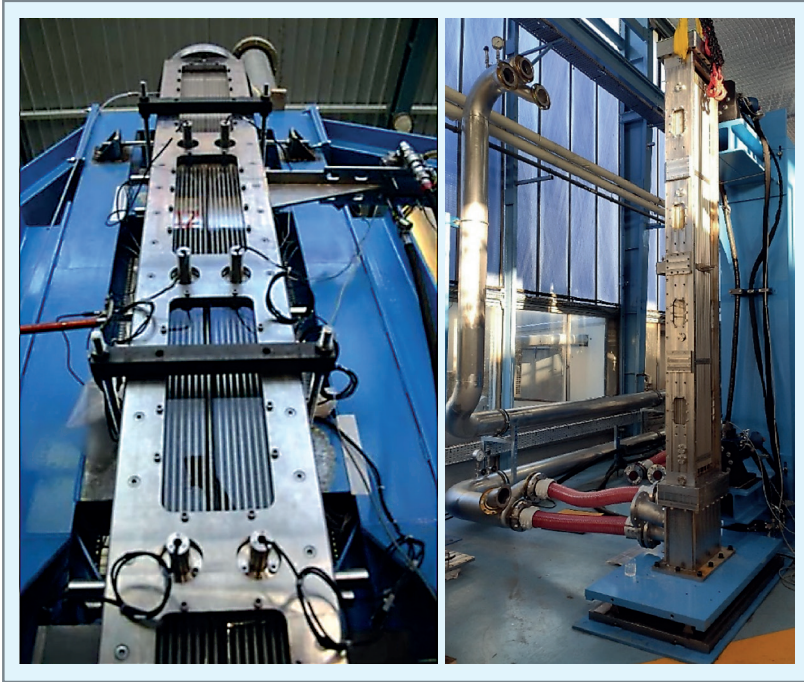


Fig. 64. Boucles ICARE et EUDORE à échelle réduite ; ICARE à gauche avec jusqu'à quatre assemblages en matrice 2x2 sous écoulement et sollicitations dynamiques locales ; EUDORE à droite avec trois assemblages en ligne sous écoulement et excitation sismique externe.

Les trois premiers points ont fait l'objet de progrès très importants sur les quinze dernières années, en mettant en œuvre comme précédemment une approche associant systématiquement expérience et modélisation. La caractérisation et la compréhension fine des phénomènes sont obtenues à échelle réduite. Expérimentalement, il s'agit de

l'installation ICARE/EUDORE (voir fig. 64) qui permet de placer jusqu'à quatre assemblages à échelle 1/2 sous écoulement axial et excitation dynamique forcée. Plus particulièrement, la section d'essai ICARE est dédiée à l'étude des couplages hydrauliques, alors que la section d'essai EUDORE est au contraire consacrée à l'étude d'un transitoire de nature sismique sous écoulement sur une ligne d'assemblages, en ajoutant les contacts sous l'effet d'une excitation externe appliquée à la section d'essai entière par un jeu de vérins hydrauliques connectés au boîtier. La boucle HERMES T permet à nouveau de produire des essais de caractérisation et de validation en pleine échelle [17], autorisant un mouvement forcé au niveau d'une grille et des mesures riches pour structure et fluide grâce à l'accès optique en face avant (voir à nouveau la figure 62).

En termes de modélisation à l'échelle assemblage en dynamique, les travaux reposent sur une approche de type milieu poreux spécifique à la géométrie particulière de la structure. Les équations de Navier-Stokes pour le fluide incompressible turbulent sont filtrées pour obtenir une représentation équivalente pour les grandeurs vitesse et pression dans le volume de l'assemblage complet (voir fig. 65). Ce modèle pour le fluide est connecté à la dynamique des structures *via* une évaluation semi-empirique des efforts fluide-structure issue de la théorie de Païdoussis-Lighthill pour un cylindre incliné dans un écoulement, étendue au faisceau des crayons et tubes guides de l'assemblage. Ces travaux, incluant la prise en compte du frottement non linéaire entre les crayons et les grilles ont été concrétisés dans une application semi-industrielle construite sur la base du code EUROPLEXUS, nommée EPX/FS-Core [18], déployée au CEA et chez ses partenaires de recherche.

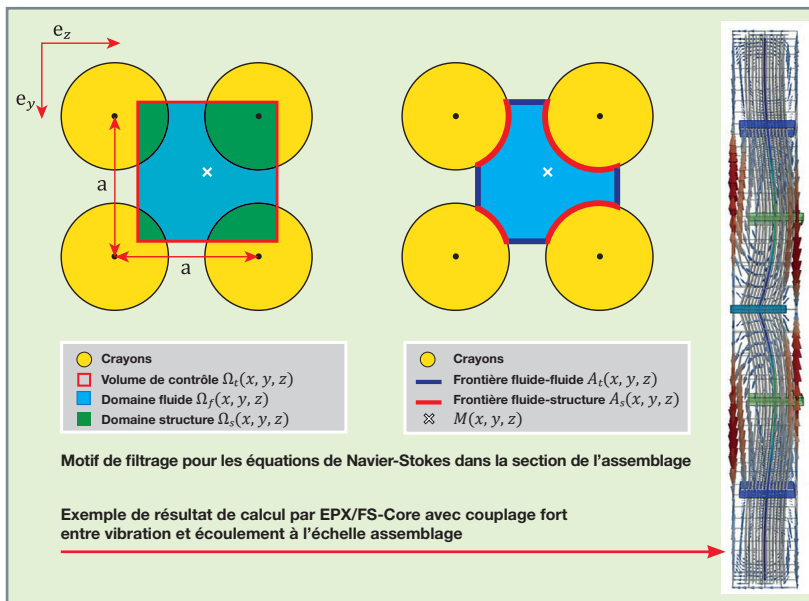


Fig. 65. Modélisation par une approche milieu poreux pour la dynamique de l'assemblage en interaction fluide-structure.



## Simulation numérique de référence en interaction fluide-structure

En parallèle des travaux de modélisation et d'expériences, le CEA, par l'intermédiaire du Laboratoire de Modélisation et de Simulation à l'échelle Système, développe une activité de recherche sur la simulation numérique des écoulements monophasiques et diphasiques, possiblement couplées avec des modèles de structure. Ces simulations permettent notamment de réaliser des études paramétriques et d'accéder à certaines quantités physiques difficilement mesurables expérimentalement. Dans ce qui suit, les concepts associés à ces simulations numériques sont présentés, en commençant par ceux dédiés aux écoulements monophasiques. Ces simulations restent un défi pour les numériques, notamment en raison de leur forte non-linéarité et de leur nature multi-disciplinaire.

Un problème typique d'interaction fluide-structure en écoulement monophasique est représenté sur la figure 66. Le domaine commun est appelé  $\Omega$ , le domaine fluide  $\Omega_f$  et le domaine structurel  $\Omega_s$ . Le couplage est réalisé par des conditions aux limites à l'interface fluide-solide  $\Gamma_{FS}$  reliant les vitesses et les contraintes dans le solide et le fluide. Les conditions suivantes sont imposées sur  $\Gamma_{FS}$  :

$$\mathbf{u}_F = \mathbf{u}_S \quad (1.2)$$

$$\sigma_F \cdot \mathbf{n}_F = \sigma_S \cdot \mathbf{n}_S \quad (1.3)$$

où  $\mathbf{u}_F$ ,  $\mathbf{u}_S$ ,  $\sigma_F$ ,  $\sigma_S$ ,  $\mathbf{n}_F$ ,  $\mathbf{n}_S$  sont respectivement la vitesse, la contrainte et la normale extérieure sortante du fluide (variables indicées par F) et du solide (variables indicées par S). Le domaine commun  $\Omega$  reste inchangé, mais les sous-domaines  $\Omega_f$  et  $\Omega_s$  évoluent avec le temps. C'est l'une des principales difficultés liées à la modélisation des problèmes d'interaction fluide-structure et à la conception de méthodes numériques pour leur résolution.

La stratégie de couplage thermo-hydraulique-mécanique porte sur une approche partitionnée [19] [20] [21] [22] [23], où le système couplé est résolu à chaque pas de temps, sous-système par sous-système, successivement ou itérativement, et des variables sont échangées à l'interface fluide-structure. Cette approche est flexible dans le sens où différents modèles mathématiques, méthodes numériques et techniques de discrétisation adaptés à chaque milieu (fluide et solide) peuvent être utilisés séparément. Les conditions à l'interface sont prises en compte explicitement afin de respecter la cinématique et les conditions aux limites dynamiques. Pour chaque milieu, un code de calcul spécifique est utilisé et la difficulté consiste à faire transiter l'information d'un code à l'autre afin de faire communiquer les deux milieux. Une autre difficulté importante réside dans le traitement de l'interface dont la position et la vitesse ne sont pas connues et évoluent généralement au cours du temps.

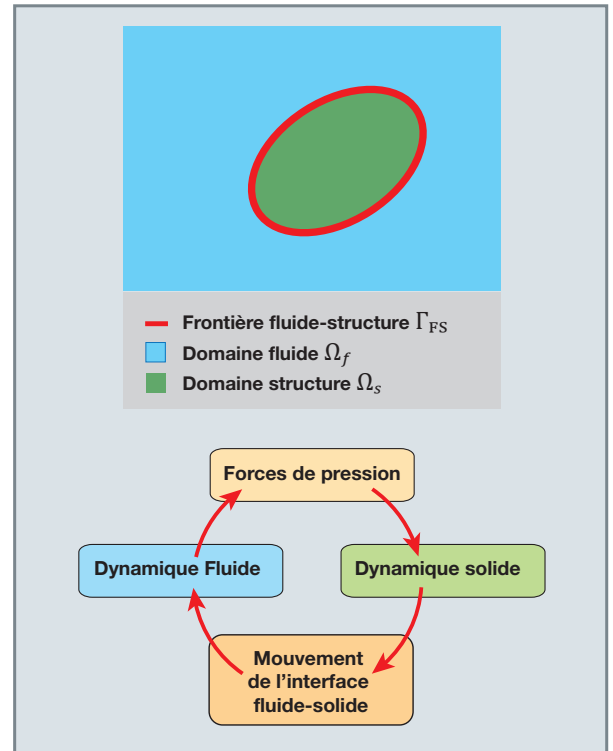


Fig. 66. Haut : interaction fluide-structure ; frontière  $\Gamma_{FS}$  mobile. Bas : cycle d'interaction fluide-structure.

Ainsi, l'approche partitionnée nécessite le suivi de l'interface et des quantités qui y sont attachées, ce qui peut être à la fois délicat et parfois source importante d'erreurs, voire de divergence de la méthode. Le solveur fluide choisi est TRIOCFD [24] [25] et le code structure est EUROPLEXUS [26]. TRIOCFD est un logiciel de simulation dédié à la thermohydraulique monophasique. C'est un code massivement parallèle, qui résout les équations de Navier-Stokes incompressibles ou faiblement compressibles, éventuellement couplées à un modèle de turbulence. Il est exploité pour simuler l'écoulement du fluide caloporteur dans le circuit primaire du réacteur, avec une description très précise de la géométrie des structures solides grâce à l'utilisation de maillages non structurés. À partir des quantités calculées par TRIOCFD (champ de vitesses, température dans le fluide et à la surface des structures solides et densité du fluide), on peut transmettre les quantités d'intérêt :

- À la neutronique, à savoir les champs de vitesse massique et d'enthalpie par assemblage, la concentration (en bore) par assemblage et le champ de pression en sortie « cœur » ; et
- à la mécanique, à savoir les forces fluides exercées sur les assemblages ou crayons combustibles.

Le système solide est traité par le logiciel EUROPLEXUS qui est un code de simulation dédié à l'analyse des phénomènes transitoires rapides impliquant des structures déformables et des fluides. L'algorithme de résolution est non linéaire intégrant les grands déplacements, grandes rotations et des phénomènes de plasticité et d'endommagement.

Le couplage partitionné TRIOCFD-EUROPLEXUS est un couplage de type Dirichlet/Neumann dans lequel les conditions aux limites (1.2)-(1.3) sont assurées de la façon suivante : les équations du fluide sont résolues par rapport aux variables primitives (vitesse, pression) soumises aux conditions aux limites de type Dirichlet (vitesses imposées) tandis que les équations de la structure sont soumises aux conditions aux limites de type Neumann (contraintes normales imposées) sur l'interface.

Afin de suivre l'interface fluide-solide, TRIOCFD s'appuie sur la méthode ALE (*Arbitrary Lagrangian-Eulerian*) [18]. Dans l'approche ALE, l'écoulement du fluide est calculé dans un domaine qui est déformé afin de suivre le mouvement de l'interface fluide-solide. L'approche fournit une description hybride qui n'est pas associée aux particules fluides, ni à la vitesse du solide, mais à un maillage imaginaire mobile qui suit le domaine du fluide. Dans l'approche eulérienne, cette vitesse est nulle, alors qu'elle est égale à la vitesse des particules fluides dans l'approche lagrangienne. Dans la méthode ALE, cette vitesse n'est égale ni à zéro ni à la vitesse des particules fluides, elle varie de façon régulière et arbitraire entre les deux. La méthode est une description lagrangienne dans les zones et directions proches du solide, et eulérienne ailleurs. Cette méthode permet ainsi de simuler

l'IFS impliquant des structures vibrantes, comme cela est le cas pour la configuration expérimentale DIVA dans laquelle un tube flexible est mis en mouvement imposé et soumis à un écoulement monophasique transverse (voir fig. 67).

## Simulation numérique dans le cas d'écoulements diphasiques

Concernant la simulation des écoulements diphasiques qui se développent dans un GV, la problématique de l'IFS implique les mêmes problèmes que ceux décrits pour la simulation monophasique. En particulier, le défi qui anime la recherche scientifique est le couplage entre les codes qui reproduisent la dynamique solide et la dynamique fluide (voir fig. 66), permettant de reproduire et garantir l'interaction continue entre eux.

Le changement fondamental, par rapport au cas monophasique, est évidemment le type d'écoulement qui doit être simulé. Les écoulements multi-phases (ou multi-composants) sont caractérisés par la présence d'interfaces (gaz/liquide) très complexes à modéliser et qui posent de nombreuses difficultés au niveau de la formulation mathématique et physique du problème. Les difficultés rencontrées pour modéliser ces écoulements multi-phases proviennent précisément de la présence de l'interface. Le type d'interface et ainsi les propriétés locales de l'écoulement dépendent du type d'écoulement à considérer. Pour fixer les idées, il est intéressant d'évoquer les types d'écoulements diphasiques connus. Selon la géométrie de l'interface, les écoulements diphasiques gaz-liquide sont classés en plusieurs régimes d'écoulement. Trois groupes principaux peuvent être distingués : les régimes à bulles, les régimes mixtes ou transitoires et les régimes séparés ou stratifiés [27]).

Dans ces régimes, les bulles de gaz peuvent prendre un nombre infini de formes et de tailles différentes.

La forme et la taille d'une bulle influencent la façon dont elle est transportée par le fluide et la façon dont elle interagit avec les autres bulles. Selon leur forme, cinq catégories de bulles sont communément mentionnées : les bulles sphériques, les bulles déformées, les bulles de type Cap, les bulles de Taylor et les bulles Churn [29] [30]. Une représentation de toutes les formes de bulles est visible en figure 68.

La difficulté de simuler l'écoulement diphasique dans un GV réside dans le fait de disposer d'un modèle permettant de prendre en compte simultanément tous les régimes décrits ci-dessus. En effet, dans un GV, on rencontre différents régimes d'écoulements : de l'écoulement à bulles au niveau de l'évaporation du fluide secondaire en partie basse du GV jusqu'au régime dispersé dans la partie haute (chignon) en passant par les régimes intermittents au milieu.

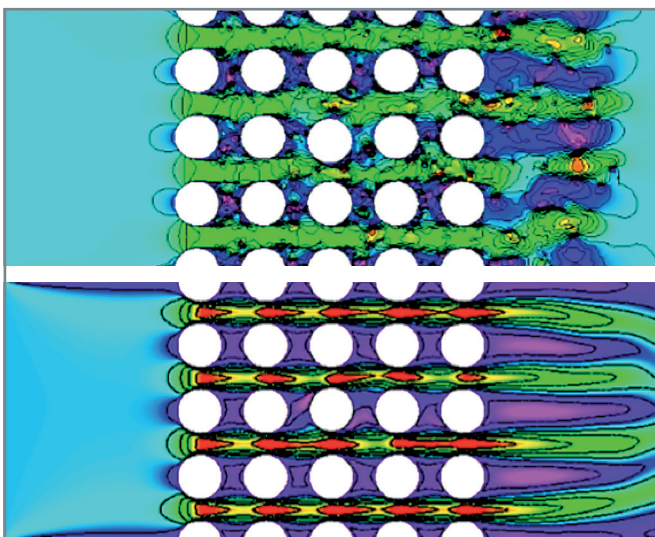


Fig. 67. Simulations numériques de l'écoulement monophasique autour d'un tube central flexible en vibration imposée dans la direction de portance. Configuration en faisceau à pas carré (DIVA). Haut :  $Re = 150$ . Bas :  $Re = 24\,000$ .

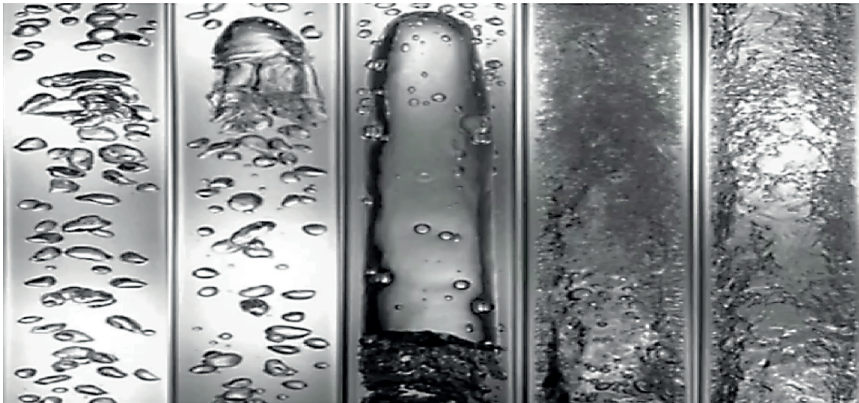


Fig. 68. De gauche à droite : régime à bulle, *cap-bubbly*, *slug*, *churn-turbulent* et annulaire (d'après Ishii-Hibiki [27]).

Pour saisir tous ces régimes avec une approche robuste, il faut développer un modèle diphasique dit « tous régimes ». Dans la littérature, il existe deux grandes familles de modèles « tous régimes ». La première considère l'écoulement diphasique constitué d'une seule phase gazeuse et de la phase liquide. La transition entre les régimes se fait souvent par un mélange algébrique, par le biais de forces interfaciales [31] [32] [33] [34]. La deuxième famille de modèles implique une séparation de la phase gazeuse en une phase dispersée et une phase continue. Cette séparation permet ensuite de modéliser la phase dispersée pour prendre en compte la polydispersion des bulles, c'est-à-dire la gamme de variation de diamètres de bulles qui existe dans une configuration multi-régime [35] [36]. Le Laboratoire STMF/LMSF (CEA) dispose d'un modèle tous régimes développé dans le code de simulation NEPTUNE\_CFD [37] qui prévoit un champ liquide continu et deux champs de gaz [38]. Le premier champ de gaz est un champ dispersé représentant les petites bulles, en revanche le deuxième consiste en un champ de gaz hybride continu/dispersé représentant les grandes bulles et les régions continues de gaz. Ce modèle est basé sur le couplage d'un modèle de transport d'aire interfaciale (modèle IATE) à deux groupes [27] avec le modèle *Large Interface Model* [39].

En supposant seulement deux groupes de bulles, comme proposé dans Ishii et Hibiki [27], les interactions possibles de coalescence et de fragmentation peuvent être regroupées en cinq catégories (voir aussi fig. 70) :

- Coalescence due à la collision aléatoire provoquée par la turbulence liquide ;
- coalescence due à l'entraînement du sillage ;
- rupture due à l'impact des tourbillons turbulents ;

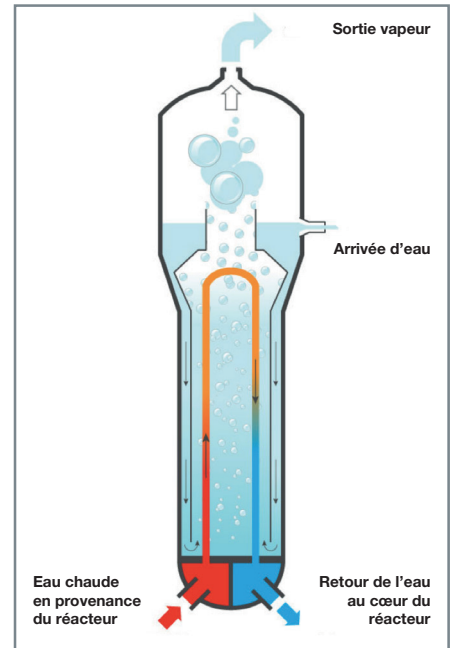


Fig. 69. Schéma simplifié d'un GV [28].

- cisaillement des petites bulles par les grosses bulles type *cap* et *slug* ;
- rupture de grosses bulles en raison des instabilités sur la surface de la bulle.

Afin de reproduire le problème IFS, ces types de modèles doivent subir une double validation nécessaire, d'une part, pour estimer l'aptitude du modèle à reproduire l'hydrodynamique de l'écoulement et les interactions entre les bulles et, d'autre part, pour estimer l'aptitude du modèle à reproduire les bonnes vibrations sur les tubes du générateur. Concernant le premier type de validation, plusieurs configurations

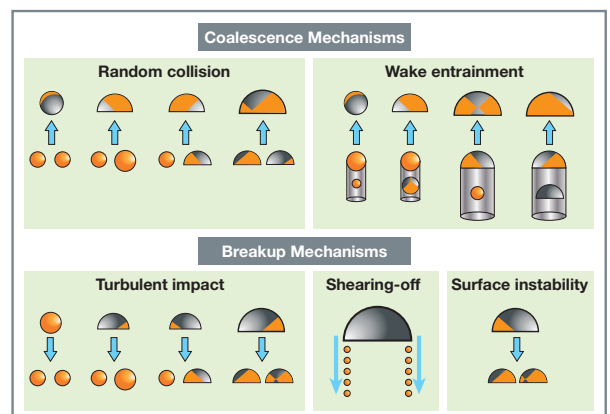


Fig. 70. Illustrations schématiques des mécanismes d'interaction associés au modèle à deux groupes (depuis [39]).

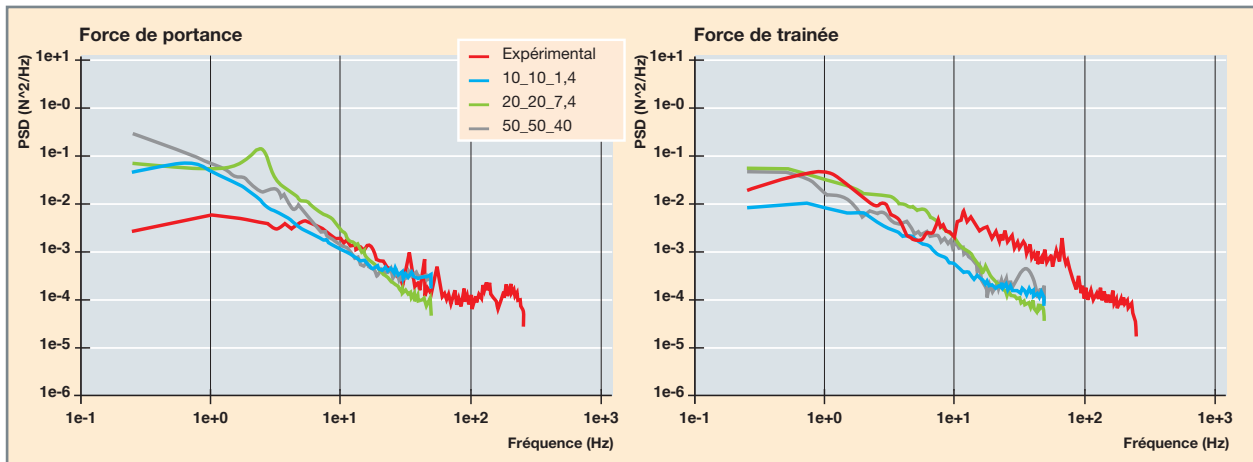


Fig. 71. Comparaison entre les profils des forces de portance (gauche) et des forces de traînée (droite) générées avec le maillage grossier (ligne bleue), le maillage moyen (ligne verte), le maillage fin (ligne grise) et les résultats expérimentaux (ligne rouge).

d'écoulement ascendant ont déjà été reproduites [38], bien que le modèle soit en cours de validation sur d'autres configurations. Concernant le second type de validation, un travail de coopération est en cours entre le Laboratoire DYN et le LMSF afin de pouvoir reproduire les différentes mesures vibratoires déjà acquises lors d'une campagne d'essais réalisés sur la maquette DIVA (voir fig. 70).

Dans la figure 71, nous montrons l'analyse vibratoire de la densité spectrale de puissance des forces de portance (gauche) et des forces de traînée (droite) générées par le modèle tous régimes du CEA (décrit ci-dessus [38]) avec trois maillages différents. Ces courbes ont également été comparées aux valeurs expérimentales, pour essayer d'évaluer la qualité du modèle et la sensibilité au maillage choisi.

## De la recherche aux applications industrielles

Le code de calcul scientifique PANDA est un outil-métier Cast3M pour l'analyse des vibrations de structures élancées soumises à des écoulements fluides. Il est le résultat de la réingénierie de l'outil-métier GERBOISE, dont la première version datait de 1989 avec des objectifs de :

- Simplification d'utilisation et de développement ;
- plus grande modularité lui permettant de traiter une plus grande variété de problèmes *via* divers modules (écoulements transverses et axiaux par exemple).

Le cœur de PANDA est développé par le CEA pour les besoins communs du CEA et Framatome pour l'analyse prédictive des risques vibratoires des tubes de générateur de vapeur des réacteurs à eau sous pression (REP) sous écou-

lement transverse. Certains de ces outils sont très généraux (analyse modale, intégration des équations de mouvement), d'autres sont spécifiques au GV.

Le code de calcul PANDA vise ainsi à :

- Capitaliser le savoir-faire du CEA et de Framatome sur l'analyse des vibrations des tubes de GV ;
- assister l'ingénieur dans les étapes de modélisation, calcul et post-traitement, en mettant à disposition sous une forme simple d'emploi les modèles et méthodologies les plus adaptés au problème.

Les tubes de GV étant des structures très élancées, ils sont modélisés par des éléments finis de type « poutre ». Le problème dynamique en IFS discrétisé s'écrit ainsi :

$$\mathcal{M}_s \ddot{u}(t) + \mathcal{C}_s \dot{u}(t) + \mathcal{K}_s u(t) = \mathcal{F}_{\text{fluide}}(u, \dot{u}, \ddot{u}, t) + \mathcal{F}_{\text{contact}}(\dot{u}, u)$$

où l'indice *s* fait référence aux termes issus de la modélisation de la structure et où les efforts fluides se décomposent en la somme des trois termes :

- $\mathcal{F}_{\text{inertie}}(\ddot{u}) = \mathcal{M}_f \ddot{u}$  : effet de masse ajoutée liée au fluide déplacé ;
- $\mathcal{F}_{\text{turb}}(t)$  : excitation aléatoire liée à la turbulence caractérisée par son spectre ;
- $\mathcal{F}_{\text{fe}}(\dot{u}, u)$  : force fluide-élastique ou de couplage entre le fluide et la structure, responsable de l'instabilité du même nom. Plusieurs modèles permettent de décrire ce phénomène.



On constate que la réponse de la structure est pilotée par les efforts fluides dont la modélisation simplifiée repose sur les éléments de recherche développés plus haut dans ce chapitre.

Les difficultés se cumulent, puisque :

- L'excitation est aléatoire, ce qui nécessite des simulations longues afin d'avoir des statistiques convergées ;
- le couplage fluide-élastique est complexe à identifier et est un domaine de recherche ouvert ;
- les forces de contact liées aux impacts et aux glissements sont fortement non linéaires et conditionnent directement l'usure prédite.

Afin de réduire la taille du système sans en perdre la physique liée aux vibrations, on choisit communément de projeter le système sur la base des modes propres. La forme de l'équation ne change pas, mais sa taille diminue nettement. Typiquement, 100 à 200 modes suffisent à décrire un tube de GV. La figure 72 en reprend quelques-uns.

Les analyses sont de plusieurs types :

- Calcul de la réponse linéaire à la turbulence ;
- calcul de la vitesse critique correspondant au seuil de l'instabilité fluide-élastique ;

- calcul de la réponse générale non linéaire avec tous les termes de l'équation par intégration temporelle. Celle-ci peut être suivie d'une analyse d'usure.

## Développement de méthodes numériques pour l'établissement de courbes de réponse et le suivi de bifurcation

De nouvelles méthodes numériques font également l'objet de travaux de recherche [41] [42] [43] [44] afin de gagner en compréhension sur les systèmes dynamiques non linéaires et lever certaines difficultés inhérentes à l'intégration temporelle.

Les méthodes numériques de continuation de solutions stationnaires (basée par exemple sur l'équilibrage harmonique) permettent de tracer très rapidement la globalité de la courbe de réponse du système (i.e. évolution du régime périodique en fonction d'un paramètre donné, généralement la fréquence). Les coexistences de plusieurs régimes sont ainsi naturellement obtenues.

L'étude de la stabilité permet également de déterminer la présence de bifurcations. Leur étude permet de déterminer la présence d'autres branches solutions (cf. fig 74a) et le changement de régimes dynamiques (périodiques, doublement de période, quasi-périodiques).

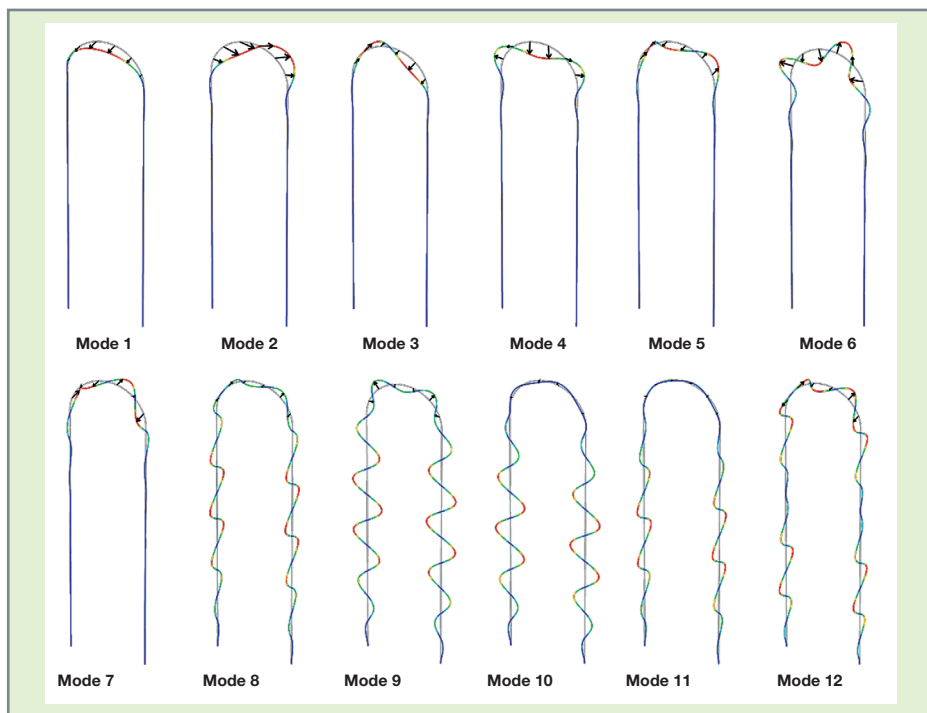


Fig. 72. Quelques déformées modales d'un tube de GV.

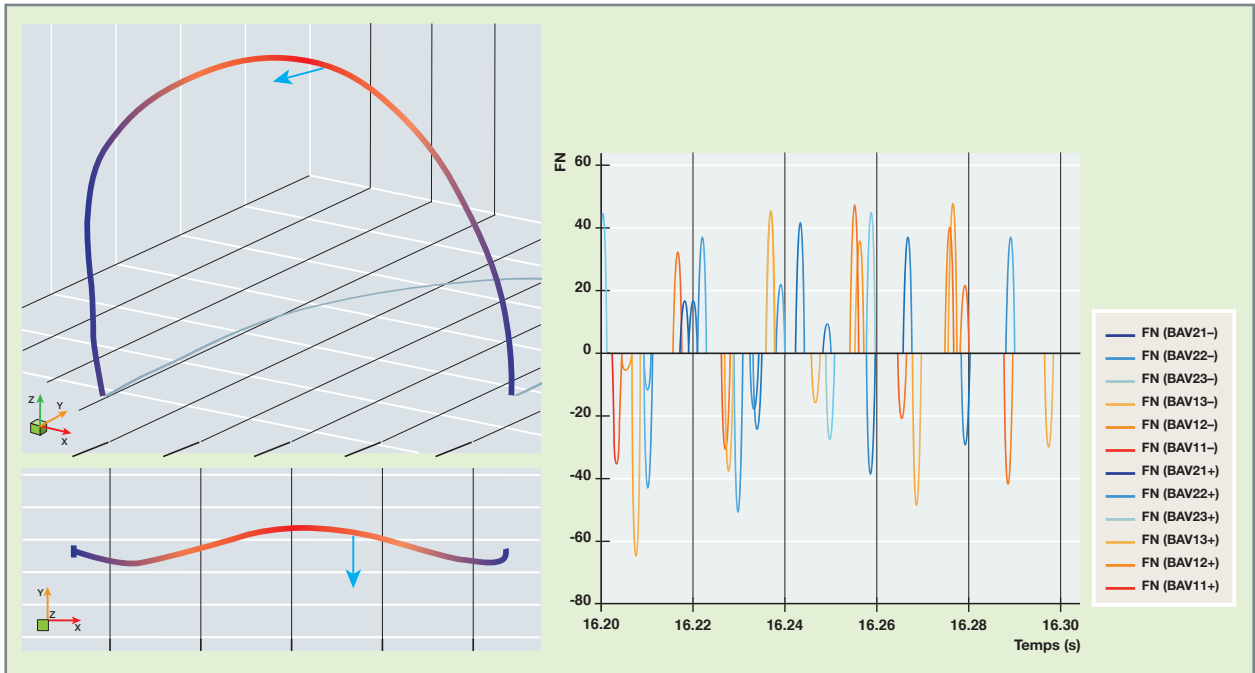


Fig. 73. À gauche : Snapshot du mouvement (amplifié) d'un cintre de GV impactant une barre antivibratoire (BAV).  
 À droite : Évolution temporelle des impacts sur l'ensemble des BAV.

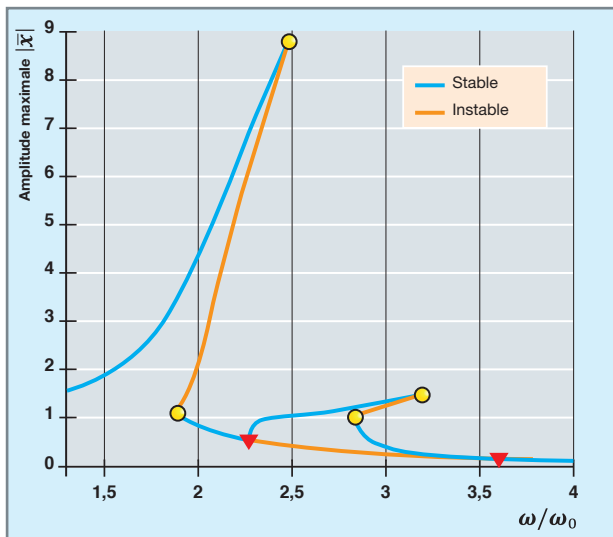


Fig. 74a. Courbe de réponse et branchement depuis un point de bifurcation (*triangledown*).

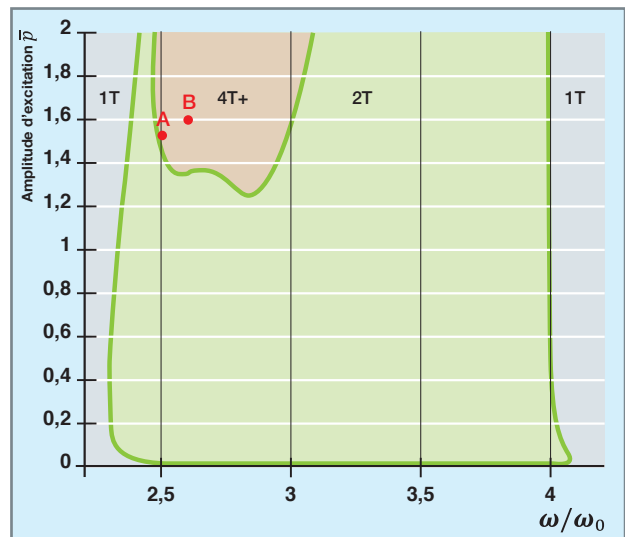


Fig. 74b. Cartographie des régimes en fonction de la fréquence et de l'amplitude d'excitation. 1T : régime périodique de période égale à celle de l'excitation ; 2T : régime de période double ; 4T+ : régimes de période quadruple et supérieure jusqu'au chaos (le point A est 4T-périodique alors que le point B est chaotique).

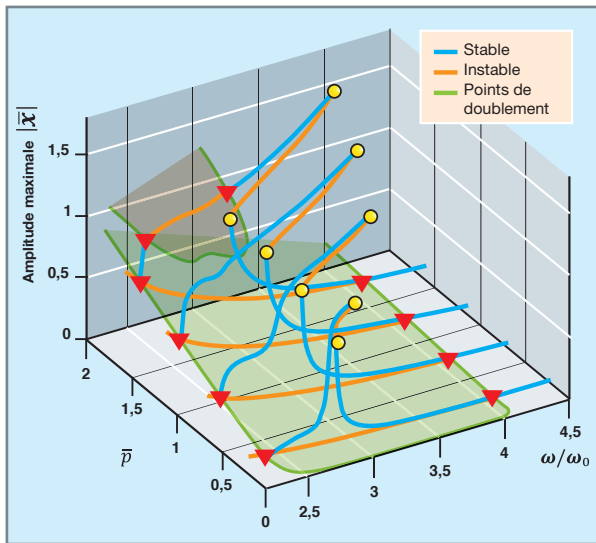


Fig. 75. Vue 3D d'une portion (pour  $\omega/\omega_0 = [2.5 - 4]$ ) des courbes de réponse (bleu : régimes stables, orange : régimes instables) et de 2 points de doublement de période (en vert).

Ces points de bifurcations peuvent à leur tour être suivis dans un espace augmenté d'une dimension (celle associée à un paramètre défini comme l'amplitude de l'excitation (fig. 75), le coefficient de frottement ou la symétrie des jeux). Il en résulte une cartographie des régimes dynamiques en fonction des paramètres considérés (cf. fig. 74b), très utile pour la compréhension et l'amélioration des systèmes existants puisqu'elle identifie les zones de fonctionnement sûr (faible usure) et à risque (usure élevée).

**Romain LAGRANGE, Philippe PITEAU, Xavier DELAUNE,**

**Domenico PANUNZIO, Benoît PRABEL,**

**Maria-Adela PUSCAS, Maria-Giovanna RODIO,**

*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*

**Guillaume RICCIARDI et Vincent FAUCHER,**

*Département de Technologie Nucléaire*

## ► Références

- [1] M. A. PUSCAS and R. LAGRANGE, "Interaction of two cylinders immersed in a viscous fluid. On the effect of moderate Keulegan-Carpenter numbers on the fluid forces", *Eur. J. Mech. B Fluids*, 101, 106-117, 2023.
- [2] R. LAGRANGE, L. LORAND and M. A. PUSCAS, "Forced beam vibrations of coaxial cylinders separated by a fluid gap of arbitrary size. Inviscid theory and numerical assessment of the fluid forces", *J. Fluids Struct.*, 120, 103899, 2023.

[3] R. LAGRANGE and M. A. PUSCAS, "Viscous Theory for the Vibrations of Coaxial Cylinders : Analytical Formulas for the Fluid Forces and the Modal Added Coefficients", *J. Appl. Mech.*, 90(6), 061009, 2023.

[4] R. LAGRANGE, M. A. PUSCAS, P. PITEAU, X. DELAUNE and J. ANTUNES, "Modal added-mass matrix of an elongated flexible cylinder immersed in a narrow annular fluid, considering various boundary conditions. New theoretical results and numerical validation", *J. Fluids Struct.*, 114, 103754, 2022.

[5] R. LAGRANGE and M. A. PUSCAS, "Hydrodynamic interaction between two flexible finite length coaxial cylinders : new theoretical formulation and numerical validation", *J. Appl. Mech.*, 89(8), 081006, 2022.

[6] D. PANUNZIO, M. A. PUSCAS and R. LAGRANGE, "FSI – Vibrations of immersed cylinders. Simulations with the engineering open source code TRIOCFD. Test cases and experimental comparisons", *C. R. Mécanique*, 350, 451-476, 2022.

[7] R. LAGRANGE, Y. FRAIGNEAU. New estimations of the added mass and damping of two cylinders vibrating in a viscous fluid, from theoretical and numerical approaches. *J. Fluids Struct.*, 92, 102818, 2020.

[8] R. LAGRANGE, X. DELAUNE, P. PITEAU, L. BORSOI and J. ANTUNES, "A new analytical approach for modeling the added mass and hydrodynamic interaction of two cylinders subjected to large motions in a potential stagnant fluid", *J. Fluids Struct.*, 77, 102-114, 2018.

[9] H. TANAKA and S. TAKAHARA, "Fluidelastic Vibration of Tube Arrays in Cross-Flow", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 77, pp. 19-37, 1981.

[10] S. CAILLAUD, *Excitation forcée et contrôle actif pour la mesure des forces fluide-élastique*, thèse de doctorat de l'université Paris VI, 1999.

[11] R. LAGRANGE, P. PITEAU, X. DELAUNE and J. ANTUNES, "Fluid-elastic coefficients in single phase cross flow : dimensional analysis, direct and indirect experimental methods", *Proceedings of the ASME, PVP2019*, 93984, 2019.

[12] H.J. CONNORS, "Fluidelastic Vibration of Tube Arrays Excited by Cross-Flow", *Proc. Flow-Induced Vibration in Heat-Exchangers* (Reiff, D.D. Ed), ASME, pp. 42-56, 1970.

[13] R. LAGRANGE, D. PANUNZIO, P. PITEAU, X. DELAUNE and J. ANTUNES, "A new criterion for the instability threshold of a square tube bundle subject to an air-water cross-flow", *J. Fluids Struct.*, 122, 103980, 2023.

[14] D. PANUNZIO, R. LAGRANGE, P. PITEAU, X. DELAUNE and J. ANTUNES, "Experimental investigation of cross-flow fluidelastic instability for rotated triangular tube bundles subjected to single-phase and two-phase transverse flows", 12th International Conference on Fluid-Induced Vibration, July 5-8, 2022, Paris-Saclay, France, 2022.

[15] N. TURANKOK, F. MORENO, S. BANTICHE, F. BAZIN, V. BISCAY, T. LOHEZ, D. PICARD, S. TESTANIERE and L. ROSSI, "Unsteady pressure and velocity measurements in  $5 \times 5$  rods bundle using grids with and without mixing vanes", *Nuclear Engineering and Design*, 364, 110687, 2020

[16] B. FARGES, M.-C. GAUFFRE, S. BENHAMADOUCHE, P. BADEL, V. FAUCHER and G. RICCIARDI, "Advanced benchmark of the flow through a mixing vane grid – Large eddy simulation validation", *Nuclear Engineering and Design*, 381, 111335, 2021.

- [17] G. RICCIARDI, "Fluid-structure interaction modelling of a PWR fuel assembly subjected to axial flow", *Journal of Fluids and Structures*, 62, 156-171, 2016.
- [18] V. FAUCHER, G. RICCIARDI, R. BOCCACCIO, K. CRUZ, T. LOHEZ and S. A. CLÉMENT, "Numerical implementation and validation of a porous approach for fluid-structure interaction applied to pressurized water reactors fuel assemblies under axial water flow and dynamic excitation", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 122(10), 2417-2445, 2021.
- [19] J. DONEA, S. GIULIANI and J.-P. HALLEUX, "An arbitrary Lagrangian-Eulerian finite element method for transient dynamic fluid-structure interactions", *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 33(1), 689-723, 1982.
- [20] J. FALCOVITZ, G. ALFANDARY and G. HANOCH, "A two-dimensional conservation laws scheme for compressible flows with moving boundaries", *J. Comput. Phys.*, 138(1), 83-102, 1997.
- [21] R. B. PEMBER, J. B. BELL, P. COLELLA, W. Y. CRUTCHFIELD and M. L. WELCOME, "An adaptive Cartesian grid method for unsteady compressible flow in irregular regions", *J. Comput. Phys.*, 120(2), 278-304, 1995.
- [22] C. S. PESKIN, "Numerical analysis of blood flow in the heart", *J. Comput. Phys.*, 25(3), 220-252, 1977.
- [23] M. A. PUSCAS, *Conservative coupling method between an inviscid compressible fluid flow and a three-dimensional deformable structure with possible fragmentation*, thèse, université Paris-Est, octobre 2014.
- [24] P. E. ANGELI, U. BIEDER and G. FAUCHET, "Overview of the TRIOCFD code : Main features, V&V procedures and typical applications to nuclear engineering", *Proceedings of 16th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-16)*, Chicago, USA., page 252, 2015.
- [25] P. E. ANGELI, M. A. PUSCAS, G. FAUCHET and A. CARTALADE, "FVCA8 benchmark for the Stokes and Navier-Stokes equations with the TRIOCFD code – benchmark session", *Finite Volumes for Complex Applications VIII – Methods and Theoretical Aspects*, p. 181-202, 2017.
- [26] "EUROPLEXUS, a computer program for finite element simulation of fluid-structure systems under transient dynamic loading-user's manual" (<http://www-epx.cea.fr>).
- [27] M. ISHII and T. HIBIKI, *Thermo-fluid dynamics of two-phase flow*, Springer, 2006.
- [28] [https://www.irs.fr/FR/connaissances/Installations\\_nucleaires/Les-centrales-nucleaires/generateurs-vapeur/Pages/generateurs-de-vapeur.aspx](https://www.irs.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-centrales-nucleaires/generateurs-vapeur/Pages/generateurs-de-vapeur.aspx).
- [29] T. HIBIKI and M. ISHII, "Two-group interfacial area transport equations at bubbly-to-slug flow transition", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 202, 2000, pp. 39-76.
- [30] S. KIM, X. SUN *et al.*, "Interfacial area transport and evaluation of source and sink terms for confined air-water bubbly flow", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 219, 2003, pp. 61-75.
- [31] N. MÉRIGOUX, J. LAVÉVILLE, S. MIMOUNI, M. GUINGO, C. BAUDRY and S. BELLET, "Verification, validation and application of NEPTUNE\_CFD to two-phase pressurized thermal shocks", *Nucl. Eng. Des.*, 312, 74-85, 2017.
- [32] V.H. GADA, M.P. TANDON, J. ELIAS, R. VIKULOV and S. LO, "A large scale interface multi-fluid model for simulating multiphase flows", *Appl. Math. Model.*, 44, 189-204, 2017.
- [33] A. MATHUR, D. DOVIZIO, E.M.A. FREDERIX and E.M.J. KOMEN, "A hybrid dispersed- large interface solver for multi-scale two-phase flow modelling", *Nucl. Eng. Des.*, 344, 69-82, 2019.
- [34] A. DE SANTIS, M. COLOMBO, B.C. HANSON and M. FAIRWEATHER, "A generalized multiphase modelling approach for multiscale flows", *J. of Comp. Phys.*, 436, 110321, 2021.
- [35] S. HÄNSCH, D. LUCAS, E. KREPPER and T. HÖHNE, "A multi-field two-fluid concept for transitions between different scales of interfacial structures", *International Journal of Multiphase Flow*, 47, 171-182, 2012.
- [36] E.M.A. FREDERIX, D. DOVIZIO, A. MATHUR and E.M.J. KOMEN, "All-regime two-phase flow modeling using a novel four-field large interface simulation approach", *International Journal of Multiphase Flow*, 145, 103822, 2021.
- [37] Code de simulation 3D, co-développé par EDF, CEA, IRSN et FRAMATOME.
- [38] E. KUIDJO, *Towards a predictive model to reproduce flow regime transitions in gas-liquid flows with NEPTUNE\_CFD : from a dispersed to a separated regime*, PhD thesis, université d'Aix-Marseille, 2019.
- [39] P. COSTE, "A large interface model for two-phase CFD", *Nucl. Eng. Des.*, 255, 38-50, 2013.
- [40] T. HIBIKI and M. ISHII, "Interfacial area transport equations for gas-liquid flow", *The Journal of Computational Multiphase Flows*, 1(1), 1-22, 2009.
- [41] L. XIE, S. BAGUET, B. PRABEL and R. DUFOUR, "Numerical tracking of limit points for direct parametric analysis in nonlinear rotordynamics", *Journal of Vibration and Acoustics*, 138(2), 2016.
- [42] L. XIE, S. BAGUET, B. PRABEL and R. DUFOUR, "Bifurcation tracking by Harmonic Balance Method for performance tuning of nonlinear dynamical systems", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 88, 445-461, 2017.
- [43] R. ALCORTA, S. BAGUET, B. PRABEL, P. PITEAU and G. JACQUET-RICHARDET, "Period doubling bifurcation analysis and isolated sub-harmonic resonances in an oscillator with asymmetric clearances", *Nonlinear Dynamics*, 1-22, 2019.
- [44] P. BECERRA ZUNIGA, S. BAGUET, B. PRABEL, C. GRENAT and R. DUFOUR, "Experimental and numerical analysis of a tube with clearance-induced impacts", *Third International Nonlinear Dynamics Conference*, 2023.



# L'usure, un phénomène d'endommagement complexe, multi-physique et multi-échelle

## Introduction

L'usure est un phénomène universel qui concerne tous les matériaux y compris les plus durs comme les céramiques. Celui-ci concerne aussi tous les contacts frottants, y compris les assemblages de pièces soumis à des vibrations qui produisent de très petits mouvements relatifs alternatifs entre les deux pièces. Ce phénomène concerne toutes les cinématiques de contact (glissement permanent ou intermittent, impact pur, impact avec glissement, roulement), les contacts lubrifiés et secs [1] [2] [3] [4].

En mécanique des structures, le mouvement relatif entre deux corps solides en contact engendre deux phénomènes indissociables : le frottement, c'est-à-dire la résistance mécanique à ce mouvement relatif, et l'usure, c'est-à-dire une perte de matière des corps solides antagonistes.

L'usure se traduit par l'émission, par les corps solides en contact, de débris qui sont le résultat des interactions géométriques des corps solides entre eux, des conditions de chargement mécaniques et/ou thermohydrauliques qu'ils subissent, des conditions cinématiques des corps qui entrent en contact, du couple des matériaux antagonistes qui les constituent, de l'état de surface des corps solides (rugosité, dureté), de leur procédé de fabrication et de l'environnement (nature et propriété du milieu, température) dans lequel ils évoluent.

Du fait de ces aspects pluridisciplinaires et de la complexité des phénomènes en jeu, l'usure des structures est un endommagement dont la prédiction reste un sujet de recherche scientifique actif. Cela s'explique par la variété des phénomènes observés et leur complexité liée principalement aux aspects multi-physiques (mécanique, physico-chimie, matériaux) et multi-échelles en espace (l'échelle du contact est souvent très petite devant celle de la structure) et en temps (c'est le cas de la dynamique des structures, quand se produisent des impacts entre les corps solides, qui est caractérisée par un temps court, typiquement inférieur à la milliseconde, devant la durée de fonctionnement des systèmes mécaniques concernés, typiquement de l'ordre de plusieurs centaines d'heures).

Quatre principaux types d'usure sont couramment répertoriés :

- **L'usure abrasive** à deux ou trois corps ; on distingue l'usure abrasive à deux corps où des sillons sont formés dans le corps solide le plus « mou », parallèlement à la direction de déplacement, par les aspérités du corps le plus « dur », de l'usure abrasive à trois corps où des particules dures présentes dans l'interface déforment plastiquement les surfaces frottantes en créant des empreintes ;
- **L'usure adhésive** dont les mécanismes se traduisent par des transferts de matières entre les corps solides antagonistes, usure initiée par arrachement dû aux micro-soudures des aspérités et transfert du corps le plus « mou » vers le corps le plus « dur » ;
- **L'usure corrosive**, appelée aussi tribocorrosion, qui intervient lorsque le frottement se produit dans un environnement réactif (atmosphère, lubrifiant...) pour les matériaux en présence (dans ce type de situation, l'usure peut être initiée ou accentuée par la réaction chimique entre l'environnement et les surfaces frottantes) et qui est définie comme un « processus impliquant l'action conjuguée de la corrosion et du frottement entre deux surfaces glissantes en contact » [5] ;
- **L'usure par fatigue** où les contraintes mécaniques répétées générées par le frottement peuvent entraîner la création et la propagation de fissures, selon des processus différents en fonction du type de matériau considéré.

Comprendre le niveau de complexité du phénomène d'usure, arriver à le modéliser puis à le simuler de manière prédictive et efficace sur une structure industrielle est l'un des grands défis actuels de la communauté scientifique. La nature multi-échelle et multi-physique des problématiques d'usure, comme celles qui sont rencontrées en centrales nucléaires, rend incontournable l'utilisation complémentaire de moyens expérimentaux dédiés et d'outils de calculs appropriés.

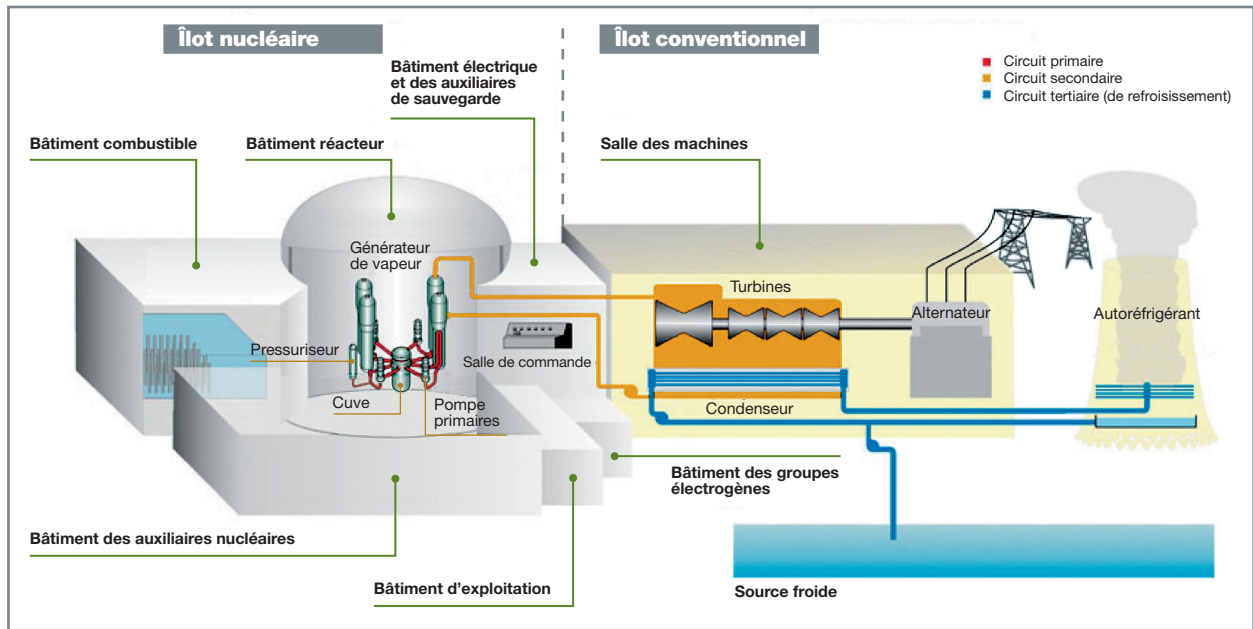


Fig. 76. Au centre de l'îlot nucléaire (partie de gauche) du réacteur REP, se trouve le bâtiment réacteur dans lequel est représenté le circuit primaire principal (CPP) à quatre boucles d'un réacteur 1 300 MWe : les tuyauteries primaires apparaissent en rouge, les quatre générateurs de vapeur et la cuve apparaissent en vert ainsi que le pressuriseur qui permet l'expansion de l'eau due à sa dilatation et la maîtrise de la pression dans le circuit primaire à 155 bars, afin de maintenir sous forme liquide l'eau chauffée à plus de 300 °C, eau constituée d'eau désoxygénée, déshydrogénée, borée et lithiée. Source de l'image : [6].

## Contexte et enjeux industriels

Au sein de l'îlot nucléaire (voir fig. 76) où les conditions d'exploitation des réacteurs à eau pressurisée en situation de fonctionnement normal sont d'une certaine sévérité pour les composants, ces derniers et leurs constituants subissent inexorablement une usure plus ou moins prononcée au fil du temps, si bien que certains des composants peuvent nécessiter soit une modification, permettant d'atténuer le phénomène d'usure, soit un remplacement afin d'assurer une régularité de fonctionnement et une disponibilité optimales des réacteurs. Certains internes de cuve comme les manchettes thermiques et leur adaptateur, les grappes de contrôle et leur guide, les gaines de combustibles, les organes de guidages des internes peuvent être particulièrement affectés par ce phénomène.

Une bonne connaissance du phénomène d'usure que subissent ces composants et leurs constituants peut permettre, d'une part, de contribuer à optimiser la planification des opérations de maintenance et la pertinence de leur mise en œuvre, souvent lourde et coûteuse, et, d'autre part, d'évaluer des évolutions de conception susceptibles de réduire leur usure. C'est la raison pour laquelle EDF travaille depuis 2014 avec ses deux partenaires historiques français, Framatome et le CEA, pour améliorer les connaissances sur ce phénomène.

C'est dans ce contexte que le Service d'Études Mécaniques et Thermiques (SEMT) du CEA Paris-Saclay a été impliqué depuis 2014 dans un programme de recherche ambitieux sur l'usure au sein de l'Institut Tripartite CEA-EDF-Framatome (I3P) visant à progresser sur la compréhension des endommagements liés à l'usure rencontrés sur le parc français et à développer des outils d'investigation efficaces sur les axes expérimental et numérique.

## La démarche de R&D mise en œuvre pour comprendre et prédire le phénomène d'usure

Le CEA collabore avec les industriels du nucléaire en mettant en œuvre ses moyens de R&D dans le domaine de l'usure. La stratégie de R&D qui est déployée repose sur trois étapes successives :

- La première étape consiste à analyser les endommagements, grâce aux moyens d'observation des matériaux irradiés, afin d'essayer de remonter aux causes racines de l'usure : expertises matériaux et analyses des sollicitations font partie des principales actions menées dans ce cadre ;
- ensuite, sur la base de ces analyses, la deuxième étape consiste à réaliser, sur les mêmes matériaux non irradiés, des essais en laboratoires dans les conditions jugées les plus représentatives possibles de ce que les pièces usées

ont vécu en réacteur, puis à comparer les usures obtenues à celles du REX pour juger de la représentativité des essais de laboratoires ;

- enfin, la troisième étape a pour objectif de proposer, sur la base des deux précédentes, des lois ou des modèles d'usure *ad hoc*, de suggérer des scénarios de mécanismes d'usure en cohérence avec les observations, de valider ces scénarios sur la base des modèles ou des lois proposées en cohérence avec les résultats d'essais obtenus en laboratoire.

### Analyse des composants usés en réacteur

La démarche consiste à observer et à analyser les endommagements qui ont été identifiés ou appréhendés sur les composants usés en réacteurs du parc français (voir fig. 77 et fig. 78) dans le but d'être capable de les reproduire lors des essais d'usure en laboratoire.

Pour atteindre cet objectif, des analyses de matériaux irradiés sont menées. Elles se font en laboratoires dits « chauds » disposant de cellules blindées. Les examens de surface sont réalisés grâce à un microscope électronique à balayage (MEB) permettant de faire des vues de surfaces usées à des échelles typiquement entre 10 µm et 500 µm. Dans le cas particulier de l'usure, pour avancer sur la compréhension profonde du phénomène, il est souvent nécessaire de compléter les analyses par des examens au MEB sur des sections de matières découpées par *focused ion beam* (FIB)

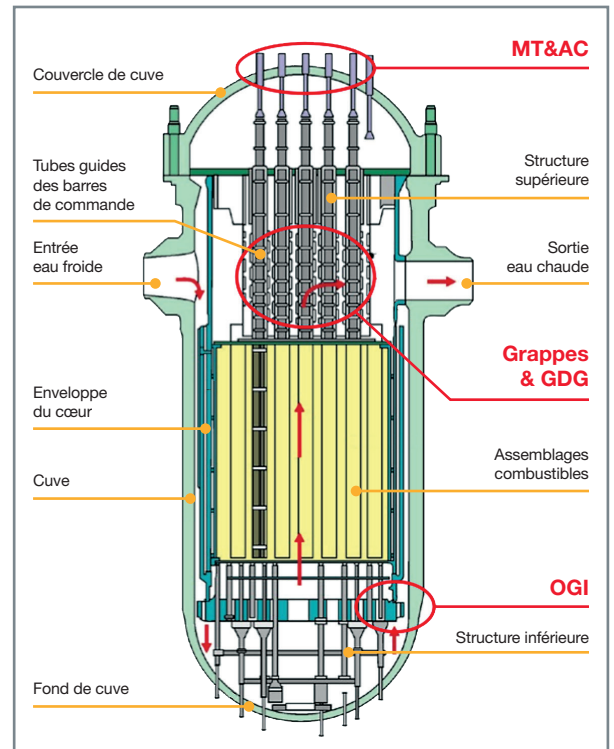


Fig. 77. Schéma de la chaudière d'un réacteur à eau pressurisée au sein de laquelle certains composants, comme les guides de grappes (GDG) en acier inoxydable 304L, les organes de guidage des internes (OGI) de cuve en alliage métallique revêtu de Stellite 6, les manchettes thermiques et leur adaptateur de couvercle (MT&AC) en acier inoxydable 304L, font l'objet d'une attention particulière et d'un suivi périodique de la part de l'exploitant EDF qui souhaite se prémunir d'une éventuelle usure prématurée de ces matériels. Sources : [6] [7].

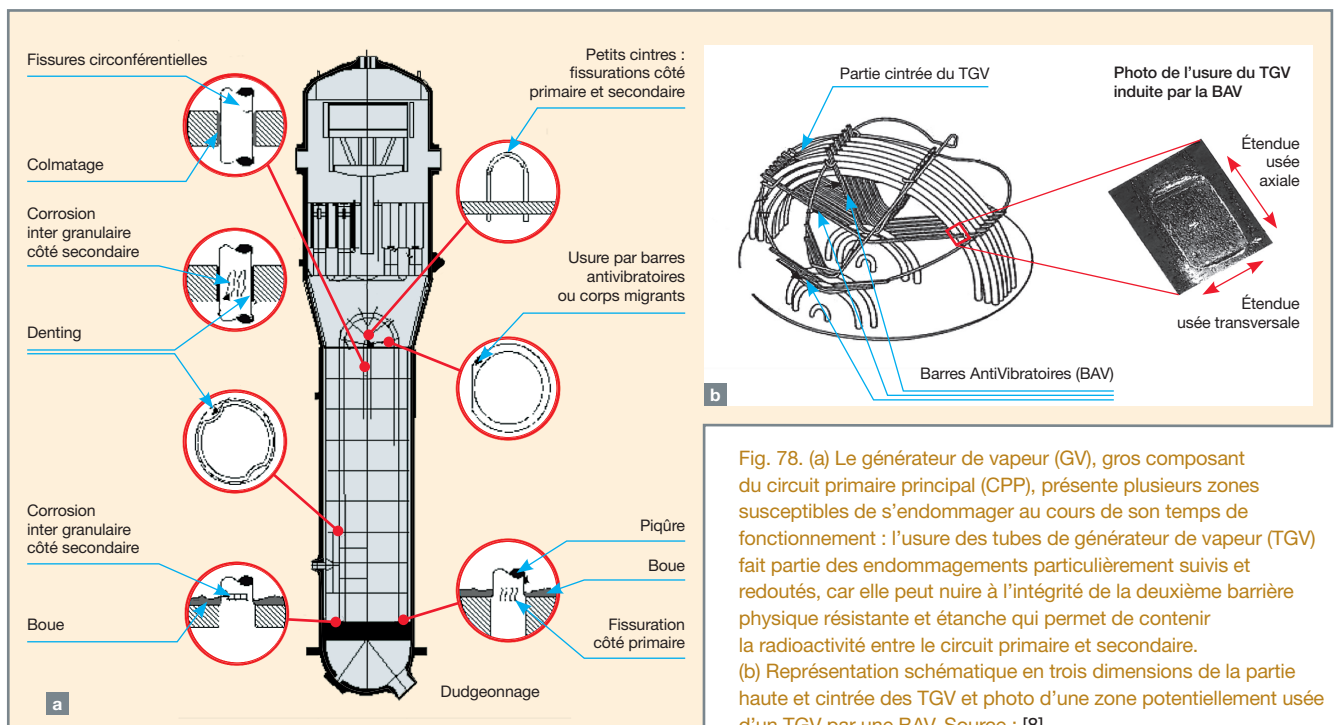


Fig. 78. (a) Le générateur de vapeur (GV), gros composant du circuit primaire principal (CPP), présente plusieurs zones susceptibles de s'endommager au cours de son temps de fonctionnement : l'usure des tubes de générateur de vapeur (TGV) fait partie des endommagements particulièrement suivis et redoutés, car elle peut nuire à l'intégrité de la deuxième barrière physique résistante et étanche qui permet de contenir la radioactivité entre le circuit primaire et secondaire. (b) Représentation schématique en trois dimensions de la partie haute et cintrée des TGV et photo d'une zone potentiellement usée d'un TGV par une BAV. Source : [8].

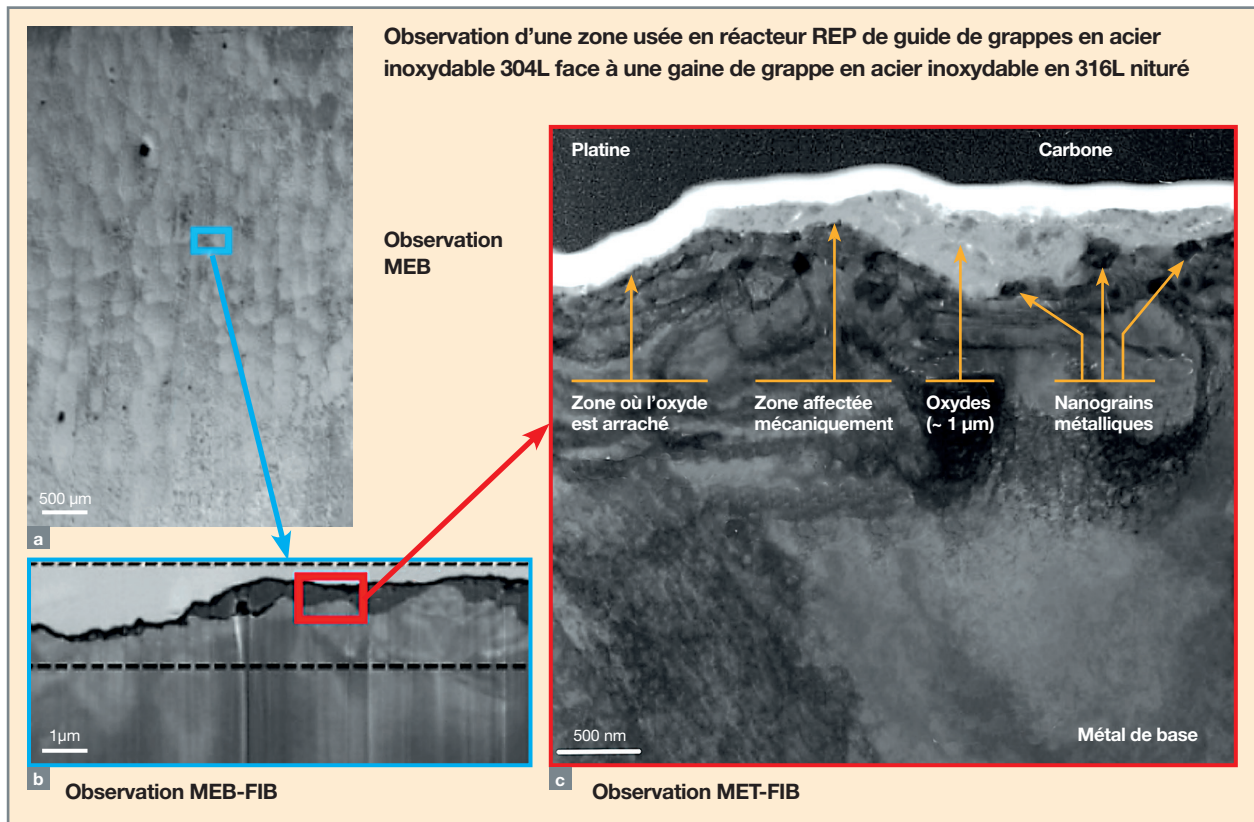


Fig. 79. (a) Observation au MEB d'un faciès (vue de surface) d'une zone usée en réacteur REP de GDG en acier inoxydable 304L constituée de cupules de morphologie circulaire de diamètre compris entre 100  $\mu\text{m}$  et 200  $\mu\text{m}$ . (b) Observation au MEB d'une section (vue en coupe) découpée par FIB : une couche dite « de frottement » d'environ 1  $\mu\text{m}$  est observée, composée majoritairement d'oxydes. (c) Observation au MET d'une lame (vue en coupe) découpée par FIB : sous la couche d'oxyde, une zone mécaniquement affectée d'environ 800 nm est également observée constituée de grains probablement recristallisés à cause du processus d'usure.

permettant de faire des vues en coupe dans l'épaisseur de la matière à des échelles de l'ordre de 1  $\mu\text{m}$  à 20  $\mu\text{m}$ . En outre, pour caractériser plus finement la morphologie, la couche de frottement, éventuellement la couche d'oxydes et la couche écrouie lorsqu'elles existent, les observations au microscope électronique à transmission (MET) de lames découpées par FIB peuvent s'avérer particulièrement instructives à des échelles allant de 300 nm à 500 nm. Dans le cadre de sa collaboration avec le CEA au sein de l'I3P, EDF a réalisé des expertises sur les guides de grappe (GDG) usés en réacteur. Ces travaux ont permis d'acquérir une vision précise des caractéristiques des différentes couches de matériau en zone usée (voir fig. 79).

Sur la base de ces observations des matériaux endommagés par usure en réacteur, les équipes de recherche peuvent alors consolider ou orienter leurs hypothèses sur les sollicitations mécaniques et/ou thermohydrauliques qui sont les données d'entrée nécessaires aux essais de laboratoires et aux calculs scientifiques destinés à comprendre l'origine du phénomène d'usure et à déterminer sa cinétique. En particulier, l'augmentation des sollicitations, qui permet souvent de réduire la durée des essais de laboratoire en accélérant le

processus d'usure générant une perte de matière mesurable en un temps raisonnable, pourra se faire uniquement dans la mesure où les mécanismes d'usure générés lors des essais de laboratoires sont les mêmes que ceux qui ont été identifiés en réacteur sur les mêmes composants.

### Réalisation d'essais d'usure de laboratoire représentatifs du REX

Sur la base des expertises matériaux qui auront pu être effectuées sur les composants usés en réacteur et des résultats de calculs scientifiques, lorsqu'ils existent, qui permettent de consolider les sollicitations mécaniques et/ou thermohydrauliques que subissent les corps solides en contact en situation de fonctionnement, des expériences sont réalisées en laboratoire sur des pièces non irradiées grâce à des machines d'usure spécialisées.

De 2014 à 2017, le CEA a développé, en lien avec certains de ses partenaires académiques, des bancs d'essais dits « analytiques » permettant de réaliser des essais d'usure en environnement air ou aqueux à température ambiante (voir fig. 80 et fig. 81). L'avantage de ce type de bancs d'essais



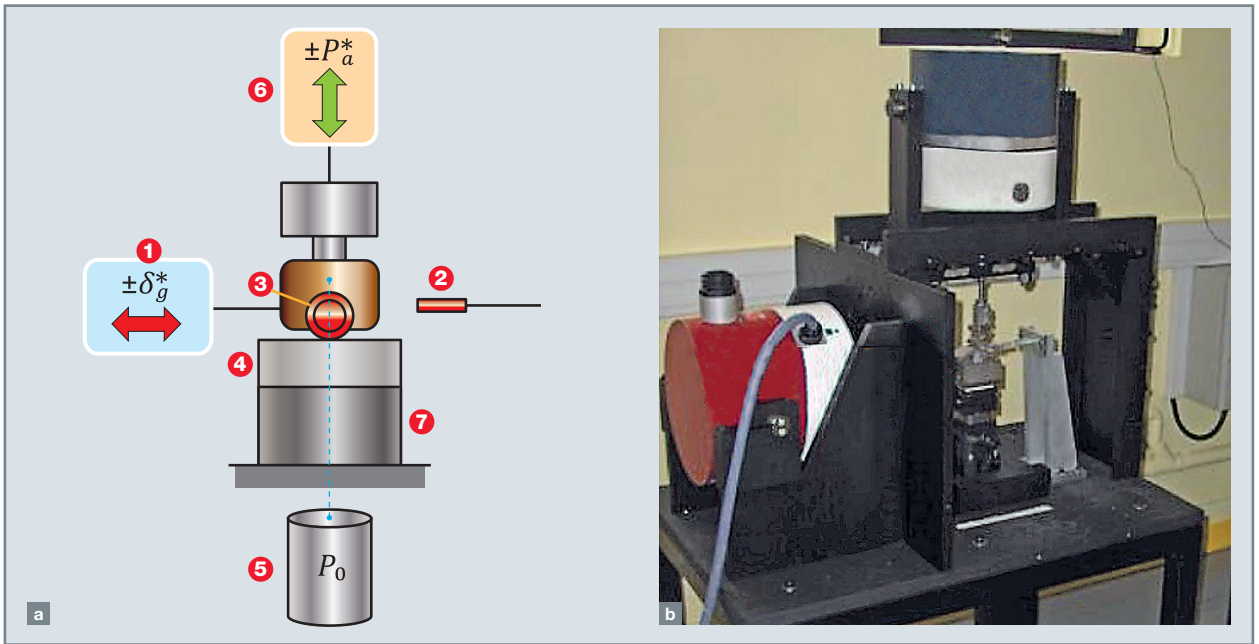


Fig. 80. Banc d'essais de *fretting* sous chargements complexes développé au LTDS dans le cadre de la thèse CEA d'Estelle Marc [10] : (a) Schéma de principe du banc d'essais sous sollicitation de *fretting*, avec l'excitateur électromagnétique (1), le capteur laser (2), l'échantillon tubulaire en 316L nitruré (3), l'échantillon plan en 304L (4), la masse  $P_0$  (5), l'excitateur électromagnétique d'impact (6), le capteur de force piézoélectrique 3D (7). (b) Photographie d'ensemble du banc d'essais de *fretting*.

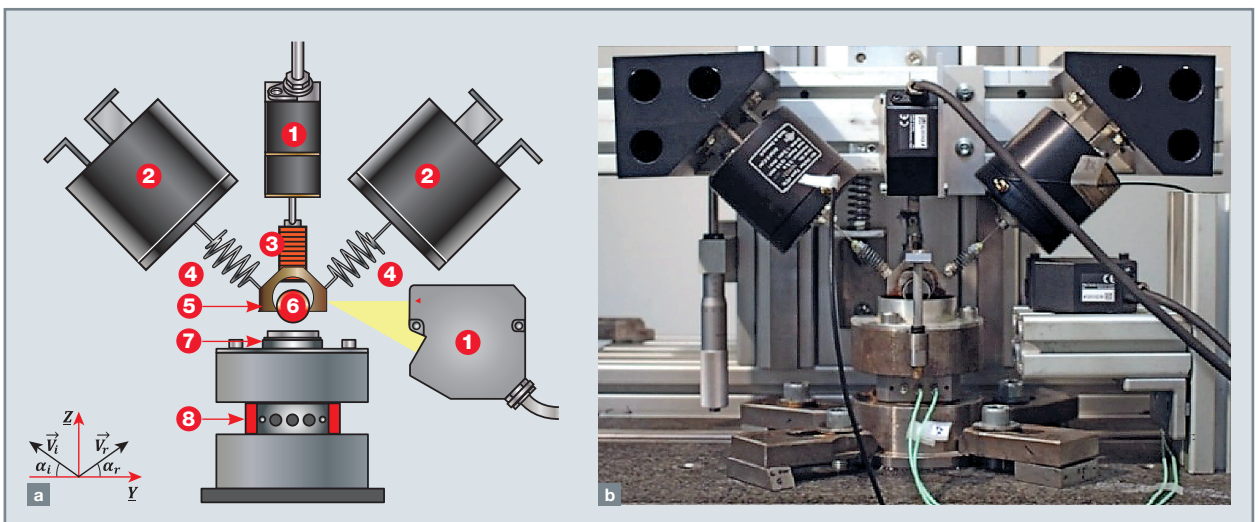


Fig. 81. Banc d'essais d'impact développé au LTDS dans le cadre de la thèse CEA de Thibaut Souillart [11] : (a) Schéma du banc d'essais d'impact (1 : capteurs de déplacement, 2 : pots vibrants, 3 : masse additionnelle, 4 : ressorts de liaison, 5 : porte-échantillon de tube, 6 : échantillon de tube GV, 7 : porte-échantillon de BAV et échantillon de BAV, 8 : capteur de force). (b) Photographie du banc d'essais d'impact.

est leur capacité à réaliser de nombreux essais répétables et reproductibles (reproductibilité), de manière efficace et fiable, et dans des conditions d'instrumentation riche en mesures. L'inconvénient principal de ces dispositifs analytiques est qu'ils ne permettent pas de progresser suffisamment sur la compréhension de l'usure en environnement REP dont les conditions en termes de température et de chimie sont très différentes.

Le CEA dispose au sein de la plateforme RESEDA du SEMT, de machines d'usure spécifiques qui lui permettent d'étudier les corps solides à user en environnement REP : la machine d'essais d'usure par frottement longitudinal FROTTEAU 2, conçue et fabriquée par le CEA (voir fig. 82), et les deux machines d'essais d'usure vibratoire SYRACUSE 1 et SYRACUSE 2, achetées à l'Atomic Energy of Canada Limited (AECL) au début des années 1990 (voir fig. 83). Ces trois tri-

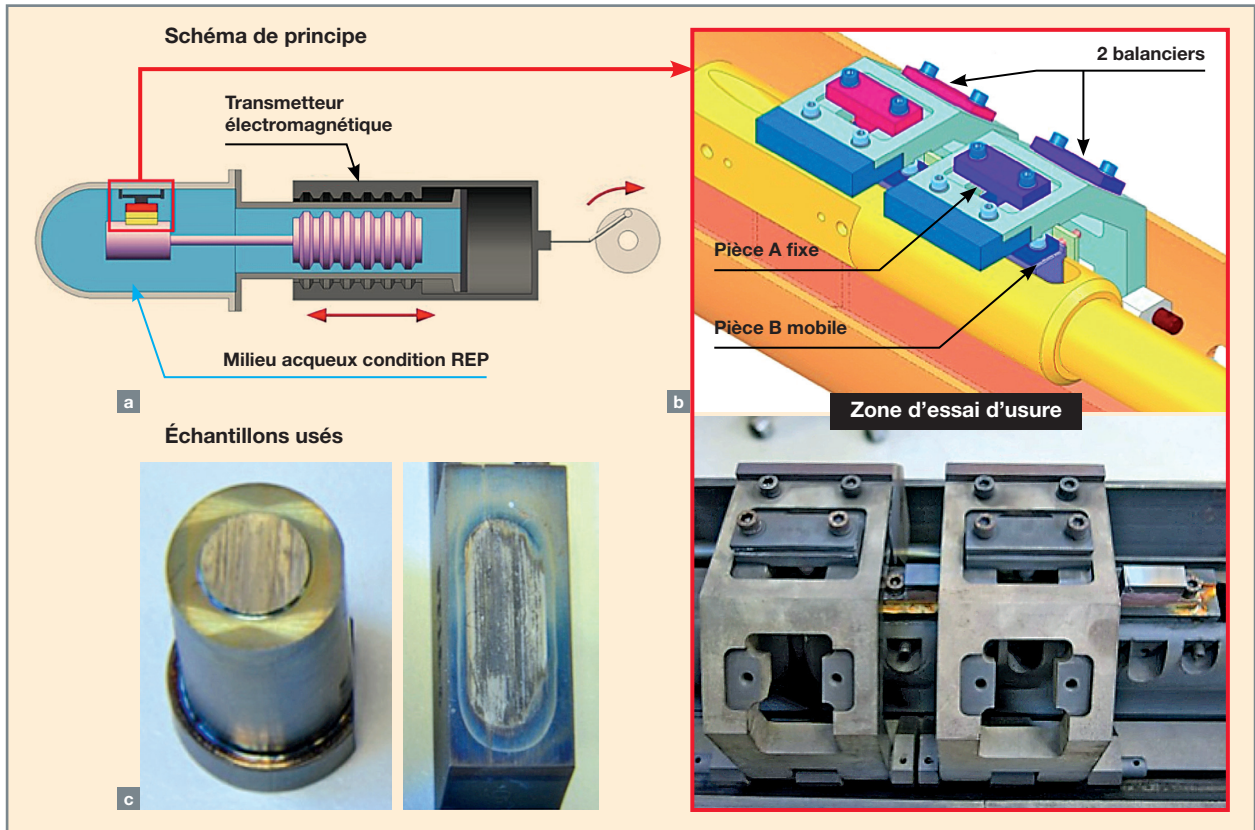


Fig. 82. Banc d'essais d'usure par frottement longitudinal en environnement REP FROTTEAU 2 (320 °C, 150 bars, eau désoxygénée, déminéralisée, borée [1 000 ppm] et lithiée [2 ppm]) de la plateforme RESEDA du CEA-DES/ISAS/DM2S/SEMT/DYN : (a) Schéma de principe de la machine d'essais. (b) Principe de de fonctionnement. (c) Échantillons en Stellite 6 usés après 500 000 cycles de frottement alternatif longitudinal sinusoïdal à 1 Hz sur une longueur glissée cumulée de 13 km [12].

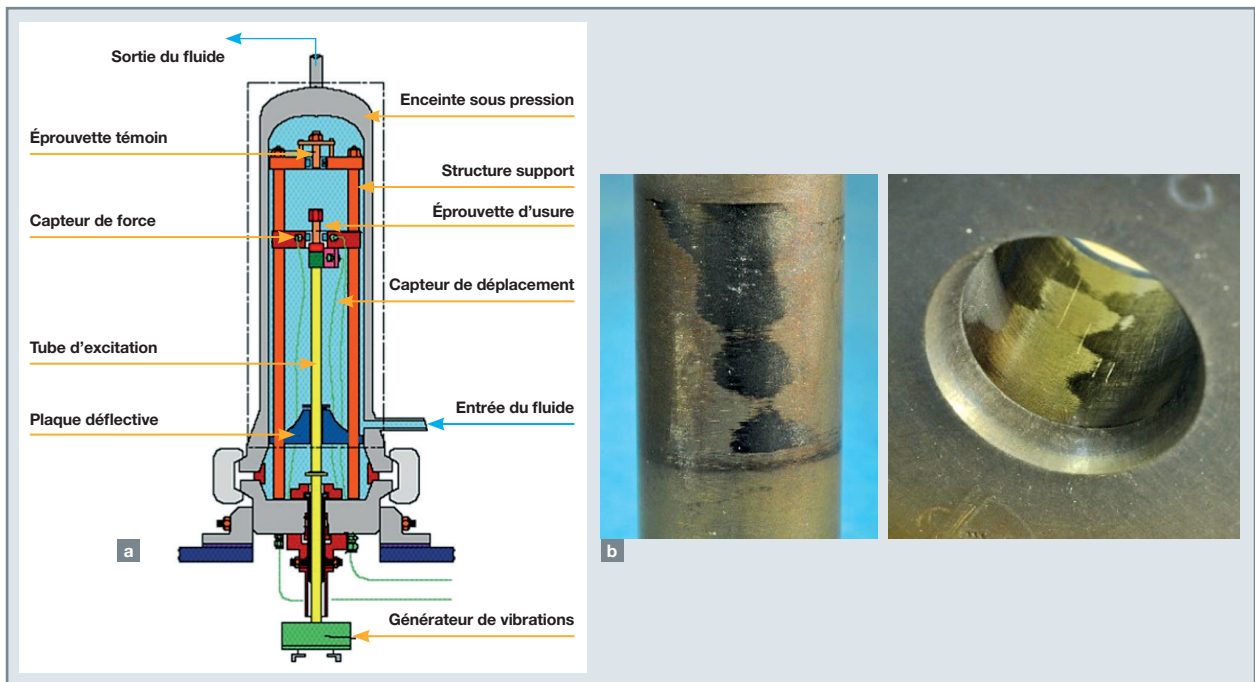


Fig. 83. (a) Schéma de principe des machines d'essais d'usure vibratoire SYRACUSE 1 et 2 implantées au sein de la plateforme RESEDA du CEA-DES/ISAS/DM2S/SEMT. (b) Gaine de grappe en 304L chromé (à gauche) et carte de guidage du GDG en 304L, usées après 2 000 heures d'essai d'usure vibratoire avec impact-glissement pour des niveaux moyens de force normale  $F_n$  de 30 N. Les parties foncées de la photo de gauche et celles en surbrillance de la photo de droite révèlent les zones usées pendant l'essai [13].



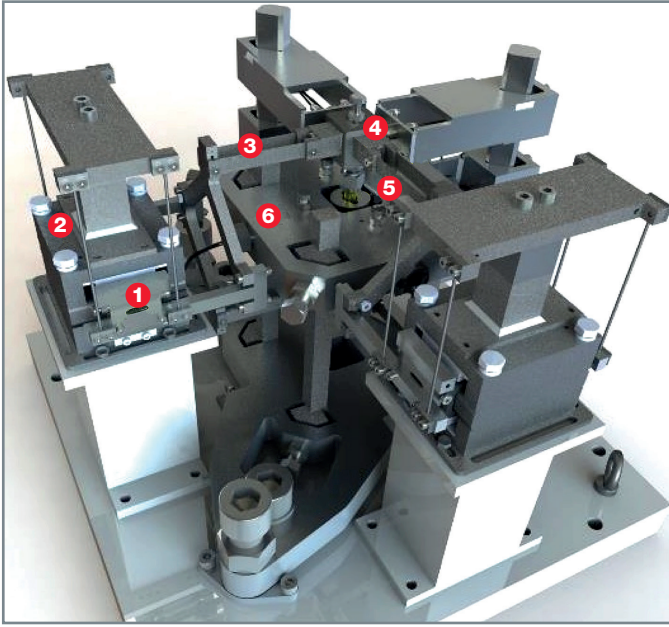


Fig. 84. Internes mécaniques de la machine d'essais d'usure en environnement MUSE conçue et développée par le SEMT du CEA Paris-Saclay : deux actionneurs mettent en mouvement suivant deux axes perpendiculaires un corps solide de type cylindrique (le projectile) dont la trajectoire de l'ordre du millimètre est programmée pour venir impacter et/ou glisser sur le corps solide fixe en vis-à-vis (la cible), avec une précision de l'ordre de quelques micromètres (1 : partie mobile de l'actionneur, 2 : partie fixe de l'actionneur, 3 : lame souple pour la transmission du mouvement de l'actionneur, 4 : partie supérieure des éléments de fixation du projectile, 5 : cible, 6 : partie fixe à laquelle est rattachée la cible).

bomètres sont des machines endurantes avec lesquelles des essais d'usure de longue durée (1 000 heures d'essais ou plus) ont pu être menés à leur terme depuis plus de vingt ans. Cependant, ces machines sont systématiquement la source de difficultés liées à leur vieillissement ou à leur technologie propre.

Le CEA mène donc, depuis 2016, un programme de conception et de développement d'une nouvelle machine d'usure en environnement REP appelée MUSE (moyen d'essais d'usure en environnement REP) qui viendra compléter à terme le parc de bancs d'essais existants. Cette nouvelle génération de machine d'usure [9] a l'ambition d'être tout aussi endurante que ses aînées avec, en outre, des qualités prometteuses en termes de répétabilité d'essais grâce à une plus grande maîtrise des conditions cinématiques et mécaniques (voir fig. 84).

## Utilisation de lois et modèles pour prédire l'usure dans l'industrie nucléaire

Dans ce paragraphe sont présentées deux grandes catégories de lois et modèles utilisés pour prédire l'usure dans l'industrie nucléaire [14] : la première catégorie est relative à la prédiction de l'usure par frottement et la deuxième catégorie concerne l'usure par impacts et glissements. Le paragraphe suivant présente les travaux de recherche qui sont menés par le CEA sur la modélisation et la simulation éléments finis du phénomène d'usure dont l'ambition est d'apporter une aide complémentaire efficace à la connaissance produite par les essais en synergie étroite avec ces derniers.

### Loi d'usure par frottement permanent

La tribologie, science du frottement, de l'usure et de la lubrification, a pris son plein essor lors de la seconde moitié du vingtième siècle. La formalisation de lois simples concernant l'usure est surtout intervenue à compter de 1953, lorsque l'anglais Archard a rédigé un article fondateur ouvrant la voie à une meilleure formalisation d'essais comparatifs d'**usure par frottement permanent** entre des couples de matériaux différents.

Dans [15] et [16], l'auteur formalise une loi à laquelle son nom a été donné correspondant à une étape de compréhension et de modélisation du phénomène d'usure en frottement permanent où le volume usé  $V$  (en  $m^3$ ) s'exprime en fonction d'un coefficient  $K$  (en  $m^3/N.m$  ou  $Pa^{-1}$ ) appelé « coefficient d'Archard », de la force normale  $F_n$  de contact (en N) entre les deux corps solides antagonistes et de la longueur glissée  $L$  (en m) de la manière suivante :

$$V = K \times F_n \times L$$

La **loi d'Archard** ci-dessus est connue comme étant une proposition relative à de l'usure adhésive (usure par arrachement dû aux microsoudures des aspérités et transfert du corps le plus mou vers le corps le plus dur). Cependant, compte tenu du nombre d'essais importants réalisés par l'auteur sur différents couples de matériaux, il est supposé que l'usure abrasive soit également intervenue dans les campagnes d'essais qu'il a pu mener, bien qu'on ne dispose pas de photos des pièces usées à ce jour qui permettraient de conforter cette hypothèse.

Le coefficient d'usure  $K$  d'Archard dépend des conditions expérimentales (vitesse de glissement entre les surfaces, température, environnement, géométrie du contact, effort appliqué), ce qui réduit le caractère prédictif de cette loi. Par ailleurs, le processus physique d'usure sous-jacent à cette loi est très particulier, comme nous venons de le discuter, et le modèle d'Archard n'est pas directement généralisable à d'autres processus d'usure.

Le CEA capitalise une expérience de plus de vingt ans dans le domaine des essais d'usure par frottement permanent en environnement REP, grâce notamment aux campagnes d'essais qui ont pu être réalisées avec la machine d'usure FROTTEAU 2. Ces essais ont conduit typiquement à des coefficients d'Archard de l'ordre de  $10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$  pour des usures très rapides et à des coefficients d'Archard de l'ordre de  $10^{-17} \text{ Pa}^{-1}$  pour les usures les plus faibles. Pour un couple de matériaux A et B, par définition de la loi d'Archard, on obtient deux coefficients d'Archard, un coefficient  $K_{A/B}$  qui exprime le volume usé du matériau A face au matériau B et un coefficient  $K_{B/A}$  qui exprime le volume usé du matériau B face au matériau A.

### Lois d'usure par impacts et glissements

Dans l'industrie nucléaire, des modélisations spécifiques à l'**usure par impacts et glissements** ou « usure vibratoire » (contacts intermittents dus aux jeux fonctionnels entre les pièces) et à certains composants (tubes GV, grappes de commande) sont apparues au fil du temps.

Pour l'usure vibratoire en régime stationnaire, domaine des contacts intermittents avec une force normale  $F_n$  et une vitesse de glissement  $V_t$  qui dépendent du temps, on calcule un terme appelé puissance moyenne d'usure  $P_u$  (en W) introduit par [17] :

$$P_u = \frac{1}{T} \int_0^T F_n(t) \cdot |V_t(t)| \cdot dt$$

Le calcul se fait pour une durée  $T$  suffisamment grande pour établir la stationnarité du résultat.

En pratique,  $T$  est typiquement de quelques secondes, car les mouvements vibratoires ont lieu à des fréquences supérieures à 10 Hz. La force normale  $F_n$  est mathématiquement positive non nulle pendant les phases de contact et elle est nulle pendant les phases intermittentes hors contact qui ne génèrent pas d'usure. La vitesse tangentielle  $V_t$  est en valeur absolue, car le glissement tangential dans un sens ou dans l'autre génère de l'usure. Pour un impact pur sans glissement, la force normale  $F_n$  est positive mais  $V_t = 0$  et l'on

considère qu'il n'y a pas d'usure (ce qui est vrai en pratique jusqu'à un certain seuil de force  $F_n$ ).

Le volume usé  $V$  au bout du temps  $\Delta t$  (en s) est alors calculé, dans l'esprit d'Archard par frottement pur, par la formulation suivante, la plus utilisée en régime de contact intermittent, que l'on peut rebaptiser **loi d'Archard-Frick** :

$$V = K \times P_u \times \Delta t$$

Entre 2015 et 2017, le SEMT a collaboré avec le Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes UMR CNRS 5513 (LTDS), dans le cadre d'un travail de recherche sur l'usure des tubes de GV générée par des impacts répétés contre les supports à jeu qui a abouti à un modèle d'usure reliant, d'une part, le volume usé à la perte d'énergie lors des impacts glissants et, d'autre part, la perte d'énergie avec les conditions cinématiques et mécaniques de l'impact [11]. Le modèle a été validé pour des impacts en air et en eau à température et pression ambiantes. Ce modèle d'usure est considéré comme très abouti, mais se limite au domaine de validité des milieux air et aqueux, de la pression atmosphérique, de la température ambiante et du couple de matériaux tube de générateur de vapeur (TGV) en Inconel 690 (NiCr29Fe)/barre anti-vibratoire (BAV) en acier inoxydable 410s (X6Cr13), et il n'est pas encore suffisamment adapté au cas du glissement pur. Le modèle de [11] nécessite donc d'être éprouvé à l'environnement des réacteurs à eau pressurisée et à d'autres couples de matériaux d'intérêt. Aussi, le CEA continue à collaborer activement avec ses partenaires académiques et industriels pour faire avancer la connaissance dans le domaine de l'usure vibratoire.

Selon les recherches menées par [11], l'usure en eau dépend à la fois de l'angle d'incidence des impacts et de la perte d'énergie. Le volume usé total  $V^-$  s'exprime alors comme la somme des volumes d'usure générés par chaque impact. Le modèle est une fonction analytique des deux paramètres d'incidence, l'angle d'incidence  $\alpha_i$  et l'énergie incidente  $T_i$ , de deux paramètres associés au contact, le coefficient de frottement cinétique  $\mu_k$  et le coefficient de restitution  $e_n$ , et d'un coefficient d'usure qui dépend de l'angle d'incidence  $K_{TL}(\alpha_i)$  :

$$V^- = \sum_{\alpha_i < \alpha_c} K_{TL}(\alpha_i) T_i \sin^2 \alpha_i (1 + e_n) \left[ 1 - e_n + \frac{2\mu_k}{\tan \alpha_i} - \mu_k^2 (1 + e_n) \right] + \sum_{\alpha_i > \alpha_c} K_{TL}(\alpha_i) T_i (1 - e_n^2 \sin^2 \alpha_i)$$

Avec :

- $\alpha_i$  l'angle incident de choc dans le mouvement d'impact/glissement (connu) ;
- $K_{TL}(\alpha_i)$  le coefficient d'usure qui dépend de l'angle d'incidence  $\alpha_i$  (**à déterminer**) ;



- $T_i$  l'énergie cinétique incidente (connue) définie par la formule :

$$T_i = \frac{1}{2} m_t (V_{in}^2 + V_{it}^2),$$

où  $V_{in}$  et  $V_{it}$  sont respectivement les composantes des vitesses incidentes normale et tangentielle,  $m_t$  la masse du projectile ;

- $\mu_k$  le rapport de percussion (dit aussi coefficient de frottement cinétique, connu) ;

- $e_n$  le coefficient de restitution normal (connu) défini par la formule :

$$e_n = \frac{V_{rn}}{V_{in}},$$

où  $V_{rn}$  et  $V_{in}$  sont respectivement les composantes normales des vitesses de rebond et incidente (connues) ;

- $\alpha_c$  l'angle limite de coupure (connu) entre deux réponses dynamiques différentes, proposé à cause de l'effet d'adhérence lors du glissement et défini par :

$$\alpha_c = \tan^{-1} \left( \frac{1}{\mu_k} \frac{1}{1 + e_n} \right)$$

Le modèle nécessite de déterminer un coefficient d'usure  $K_{TL}^c$  qui ne dépend pas de l'angle d'incidence en appliquant l'équation générale du volume usé du modèle puisque [11] montre que :

$$K_{TL}(\alpha_i) = K_{TL}^c (1 - \sin(\alpha_i))$$

De ce fait, un seul essai d'usure réalisé à une incidence quelconque mais connue  $\alpha_i$  serait nécessaire pour déterminer la valeur de  $K_{TL}^c$  pour un couple de matériaux donné.

La figure 85 illustre la comparaison entre le modèle et l'expérience. L'approche est satisfaisante même si une consolidation de ce travail aux conditions REP reste nécessaire. Cette perspective a été envisagée par le CEA, en collaboration avec son partenaire EDF, malgré la lourdeur et les coûts de mise en œuvre de ce type d'essais en environnement REP qui conduiraient de ce fait à un nombre de résultats d'essais limités par rapport à ceux qui ont été produits sur la machine d'usure analytique du LTDS (voir fig. 81).

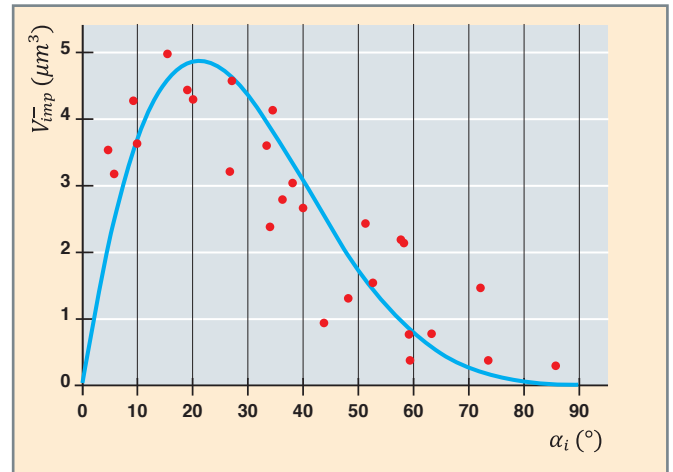


Fig. 85. Volume d'usure  $V_{imp}^-$  par impact en fonction de l'angle d'incidence  $\alpha_i$  pour des essais en eau à énergie incidente  $T_i$  constante.

### Vers une modélisation et une simulation numérique de l'usure des structures

#### Modélisation de l'usure induite par les vibrations à l'échelle de la structure

De nombreux composants des réacteurs présentent des caractéristiques géométriques et matériaux propices aux vibrations et sont très souvent soumis aux excitations liées à l'écoulement fluide. La fatigue et l'usure sont les deux principaux phénomènes de dégradation engendrés par les vibrations des structures. Ils apparaissent respectivement avec l'accumulation de déformations variables au cours du temps et l'accumulation de glissements frottants entre deux surfaces de corps solides en contact.

Pour analyser l'usure des composants nucléaires concernés, il est intéressant de disposer de modèles prédictifs décrivant à la fois la dynamique globale de la structure et l'énergie dissipée liée au phénomène d'usure dans chaque contact. Ce type de modélisation a été proposé dès la fin des années 1980 par [18] dans le cadre des vibrations des structures en interaction avec les fluides. Il repose sur les éléments suivants :

- Les structures considérées étant souvent élancées, une discrétisation à l'aide d'éléments finis de type poutre est utilisée (voir fig. 86) ;
- afin de réduire la taille de la discrétisation spatiale sans perdre la physique du modèle, une base modale est calculée et les équations d'équilibre dynamique y sont projetées ;
- le fluide est représenté par :
  - l'inertie du fluide déplacé qui s'ajoute à la masse de la structure  $M_s$  conduisant au terme  $M_{s+f}$ ,

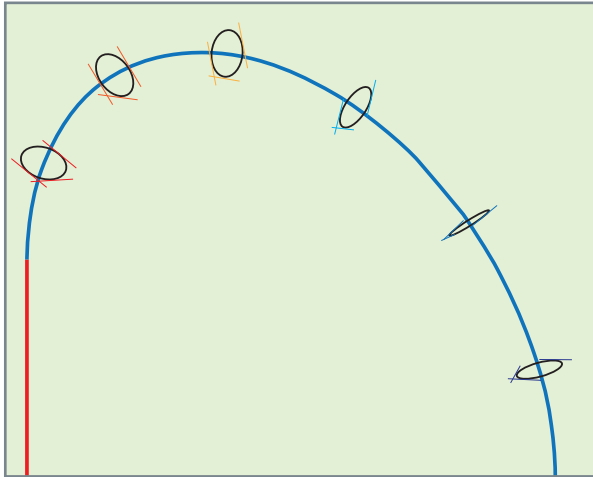


Fig. 86. Modélisation avec le logiciel éléments finis Cast3M d'un cintre de tube de générateur de vapeur (TGV) en éléments finis poutres (seule la fibre moyenne de la poutre est visualisée) ; les cercles représentent les six sections circulaires du TGV dans les différentes zones de contact avec les barres anti-vibratoires (BAV) ou les étriers anti-envol. Les segments de droite sur les cercles permettent de visualiser les contacts analytiques entre les pièces.

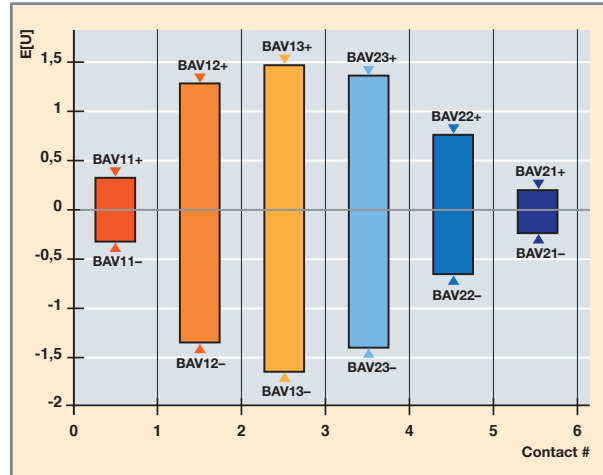


Fig. 87. Puissance d'usure moyenne en ordonnée (ou espérance, en W) pour six sections circulaires d'un tube de générateur de vapeur (TGV), chacune en contact avec deux barres anti-vibratoires (BAV+ et BAV-) selon une modélisation éléments finis poutres PANDA<sup>Cast3M</sup> développée dans le cadre des vibrations des structures en interaction avec les fluides (voir. p. 81). PANDA est un outil de calcul développé par le CEA pour le compte de Framatome.

- l'excitation turbulente aléatoire de spectre mesuré expérimentalement  $f_{\text{turb}}$ , et
- le couplage fluide-élastique traduisant l'interaction entre l'écoulement et le mouvement de la structure  $f_{\text{fe}}$ .

- chaque contact est représenté par une fonction analytique du déplacement d'un point de la poutre  $f_{\text{impact}}$ .

L'équation sur base modale à résoudre est ainsi la suivante :

$$M_{s+f}^* \ddot{q} + C_s^* \dot{q} + K_s^* q = f_{\text{turb}}^*(t) + f_{\text{fe}}^*(q, \dot{q}) + f_{\text{impact}}^*(u, \dot{u})$$

La réponse de la structure est obtenue par intégration temporelle de l'équation précédente en utilisant généralement un schéma explicite qui évite tout problème de convergence, mais qui nécessite un pas de temps très fin, ce dernier étant de toute façon nécessaire pour une bonne représentation de la dynamique des contacts.

*In fine*, l'usure est évaluée en post-traitement à partir des efforts de contact et des glissements relatifs et elle se présente usuellement à l'aide de la puissance d'usure  $P_u$  (voir fig. 87).

#### Modélisation de l'usure à l'échelle du contact

L'objectif de la modélisation fine de l'usure est de développer un outil permettant de représenter le phénomène d'usure par abrasion de manière prédictive. La quantité de matière perdue par chaque solide en contact est évaluée par une loi énergétique liant le volume usé à l'énergie dissipée par frottement :

$$V_{\text{usé}} [m^3] = \alpha [m^3 \cdot J^{-1}] \times E_{\text{dissipée}} [J] \text{ avec } \alpha \text{ coefficient d'usure.}$$

Une confrontation aux résultats expérimentaux réalisés avec les moyens d'essais présentés figure 80 et figure 82 permet de s'assurer de la bonne représentativité du modèle. L'implémentation de ces modèles est faite dans le logiciel Cast3M.

Les simulations se font sur des configurations élémentaires comme celles présentées sur la figure 88 (a) et réalisées à partir d'un modèle éléments finis 2D. Les deux corps sont d'abord mis en contact, puis un déplacement tangentiel alterné est imposé durant un certain nombre de cycles. À chaque cycle est calculée la quantité d'énergie dissipée par frottement, ce dernier est modélisé par la loi de Coulomb, qui permet d'obtenir le volume usé. Cette information est « convertie » en profondeur usée et permet d'actualiser les géométries des surfaces en contact en déplaçant les nœuds du maillage éléments finis (voir fig. 88 (b)). Ces opérations se poursuivent jusqu'à ce que tous les cycles soient simulés. La figure 88 (c) présente une comparaison calcul-2D/essai du profil d'usure sur la configuration cylindre/plan dans un cas où seul le plan s'use. Cette usure, qualifiée d'unilatérale, est observée dans les REP entre les cartes de guidage et les guides de grappe où les cartes de guidage s'usent. La figure 88 (c) montre une bonne corrélation sur les profils d'usure entre résultats numérique et expérimental.

L'approche numérique, bien que moins longue et moins coûteuse que la démarche expérimentale, requiert la connaissance des coefficients de frottement et d'usure qui dépendent, entre autres, du couple de matériaux et des



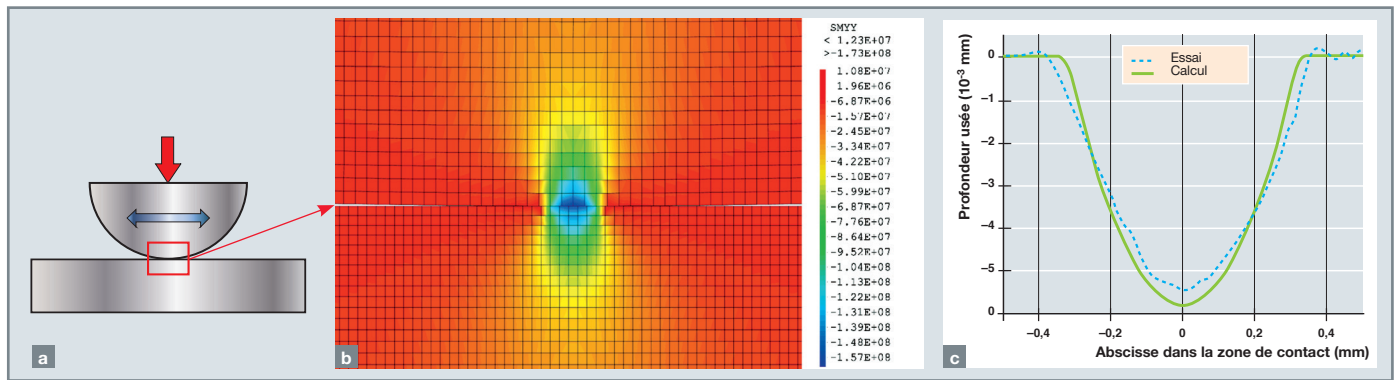


Fig. 88. Représentation schématique d'une configuration élémentaire cylindre/plan (a) et isovalues de la composante  $\sigma_{yy}$  (Pa) du champ de contraintes tracées sur le maillage de cette configuration dans la zone de contact avec des tailles de mailles de l'ordre de quelques micromètres (b) utilisée comme support de la modélisation numérique par éléments finis. Dans cette expérience, réalisée sur le moyen d'essai présenté en figure 80 [10], seule la surface du plan s'use. La comparaison calcul/essai du profil d'usure du plan (c) montre que le modèle d'usure parvient à bien représenter la largeur de la zone usée et la profondeur d'usure.

conditions d'essais. En l'état actuel, le modèle 2D permet de retrouver le profil d'usure mesuré expérimentalement, mais un travail est encore nécessaire pour rendre ces modèles prédictifs et pouvoir modéliser les structures en 3D [19].

## Conclusion

Le Service d'Études Mécaniques et Thermiques (SEMT) du CEA Paris-Saclay travaille depuis de nombreuses années, en collaboration avec ses partenaires industriels et académiques, à la compréhension des endommagements liés à l'usure rencontrés sur le parc français et au développement, dans ce cadre, d'outils d'investigation efficaces sur les axes expérimental et numérique.

La stratégie de recherche qui est proposée par le CEA repose sur l'utilisation de moyens d'observation, de moyens expérimentaux et d'outils de calcul scientifique utilisés en étroite synergie. Cette complémentarité, nécessaire à la compréhension profonde du phénomène d'usure, qui est complexe du fait de ses particularités multi-physiques et multi-échelles, est l'une des clés permettant une exploitation scientifique optimale des moyens. À cet égard, la simulation numérique par éléments finis qui a été développée depuis quelques années au CEA a l'ambition d'être un outil d'aide à la connaissance particulièrement efficace. De plus, la conception et la fabrication de machines d'usure plus fiables, plus précises et plus performantes que les machines actuelles ont pour objectif d'optimiser les temps et les coûts de recherche et de développement (R&D).

**Jean-Luc FAYARD, Matthieu BREUZÉ et Benoît PRABEL,**  
Département de Modélisation des Systèmes et Structures

## ► Références

- [1] J. BLOUET, « Usure », *Techniques de l'ingénieur*, octobre 1978.
- [2] P. KAPSA, « Usure des contacts mécaniques – Manifestations de l'usure », *Techniques de l'ingénieur*, octobre 2001.
- [3] E. FELDER, « Théorie de l'usure – Mesure, caractérisation des contacts et vitesse d'usure », *Techniques de l'ingénieur*, octobre 2015.
- [4] E. FELDER, « Théorie de l'usure – Mécanismes d'usure », *Techniques de l'ingénieur*, mars 2016.
- [5] M. d. DEN, *La corrosion et l'altération des matériaux du nucléaire*, Éditions du Moniteur, pp. 57-59, 2010.
- [6] IRSN (s.d.), « Le parc des réacteurs nucléaires français en exploitation – Introduction », [https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations\\_nucleaires/Les-centrales-nucleaires/reacteurs-nucleaires-France](https://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/Les-centrales-nucleaires/reacteurs-nucleaires-France).
- [7] IRSN, « EDF – REP – Méthodologie et critère d'usure des manchettes thermiques des adaptateurs de couvercle de cuve », Fontenay-aux-Roses, 2018.
- [8] B. ALLOUCH, « Sherlock Project – Investigate to mitigate », in association with MAI, AREVA, EPRI, EDF, Avignon, 15-18 septembre 2014.
- [9] J.-L. FAYARD, « A new generation of wear machines at the CEA », 24<sup>e</sup> conférence internationale Wear of Materials, Banff, Alberta, Canada, 16-20 avril 2023.
- [10] E. MARC, « Analyse de la réponse tribologique d'un contact cylindre/plan soumis à des sollicitations de fretting sous chargement complexe : influence d'une solution lithium-bore », LTDS-ECL, Lyon, 2018.
- [11] T. SOULLIART, « Usure des tubes de GV générée par des impacts répétés contre les supports à jeu », Gif-sur-Yvette, CEA Paris-Saclay, 2017.
- [12] F. RUFFET, « Organes de guidage des internes : essais de frottement longitudinal alternatif Stellite contre Stellite dans la machine FROTTEAU 2 », *Campagne d'essais*, n° 2, 2020.

- [13] M. BELLANGER, *Influence de la longueur glissée sur les essais d'usure entre gaines durcies et cartes de guidage sans encoche*, 2021.
- [14] C. PHALIPPOU, *Lois et modèles d'usure dans l'industrie nucléaire*, note technique, 2020.
- [15] J. ARCHARD, "Contact and rubbing of flat surfaces", *Journal of Applied Physics*, 24(8), 981-988, 1953.
- [16] J. ARCHARD, "The wear of metals under unlubricated conditions", *Proc. Royal Society of London, Series A*(236), 397-410, 1956.
- [17] T. FRICK, « Overview on the development and implementation of the methodologies to compute vibration and wear of steam generator tubes », *Proceedings of the ASME Symposium on Flow-Induced Vibrations*, 3 (Vibrations in Heat Exchangers), 149-161, 1984.
- [18] J. ANTUNES, "Coulomb friction modelling in numerical simulations of vibration and wear work rate of multispans tube bundles", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 4, Issues 3, May 1990, pp. 287-304, 1990.
- [19] Q. CARADEC, "Finite element simulation of high cycle fretting wear using an implicit adaptive cycle jump", *Wear*, Vol. 522, 204703, 2023.



# Mécanique de l'élément combustible sous irradiation

## Introduction

Les crayons combustibles des réacteurs à eau pressurisée (voir figure 59, p. 87), contiennent la matière fissile sous forme de pastilles d'oxydes d'uranium ( $UO_2$ ) ou d'oxydes mixtes d'uranium-plutonium (MOX). L'enveloppe externe du crayon (gaine en alliage de zirconium) constituant la première barrière de confinement de cette matière radioactive, il convient de s'assurer de son intégrité à l'aide d'analyses mécaniques. Ces dernières nécessitent, en plus de la gaine, une modélisation multi-physique du comportement de la colonne combustible avec notamment des aspects mécaniques non linéaires. Comme les propriétés mécaniques de la gaine et du combustible évoluent avec la température et sous l'effet de l'irradiation, ces évolutions doivent être prises en compte dans la simulation du comportement en réacteur des crayons combustibles.

Pour la colonne combustible en début d'irradiation, les efforts imposés sont, d'une part, axialement, le poids de la colonne, la compression du ressort (diminuant avec l'irradiation) ainsi que la pression interne et, d'autre part, radialement, la pression interne du crayon (jeu ouvert). Les pastilles combustibles elles-mêmes sont soumises à des dilatations différentielles internes d'origine thermique qui résultent également de l'irradiation. Pour la gaine en début de vie, c'est la différence entre la pression interne du crayon et la pression du caloporteur qui conduit à sa compression diamétrale. À ce chargement initial s'ajoutent les sollicitations associées aux dilatations différentielles entre la pastille et la gaine, sollicitations qui n'apparaissent que lorsque le jeu initial entre le combustible et la gaine se ferme pour conduire à un contact pastille-gaine établi. Ainsi, à jeu fermé, le gonflement de la pastille induit par la température et l'irradiation est le moteur de l'interaction pastille-gaine (IPG), ce qui conduit à une réaction radiale et axiale de la gaine sur la pastille (la pression de contact). Par ailleurs, en situations accidentelles hypothétiques (APRP par exemple), l'effet de la pression interne et de l'environnement vapeur peut conduire à un ballonnement voire à l'éclatement de la gaine, ainsi qu'à une oxydation plus ou moins poussée, dont il faut vérifier les conséquences sur la limite d'intégrité de la gaine – y compris à l'issue du transitoire accidentel – (pour démontrer la refroidissabilité des assemblages combustibles à court, moyen et long termes...). Pour modéliser et simuler l'ensemble de ces phénomènes modélisant le comportement sous irradiation

de l'élément combustible REP en situation de fonctionnement normale, incidentelle, accidentelle mais également en situation de stockage, un outil de calcul scientifique spécifique a donc été développé au CEA. C'est le code combustible de performance ALCYONE de la plateforme PLÉIADES [1], logiciel qui s'appuie sur le solveur Cast3M pour la résolution des problèmes de thermique et de mécanique, résolutions intégrées dans un schéma de couplage multi-physique et multi-échelle contenant de nombreux autres modèles physiques qui sont détaillés dans ce chapitre.

## La simulation combustible (PLÉIADES/ALCYONE), multi-échelle et multi-physique

### Représentation à deux échelles du crayon combustible

Pour modéliser la structure élancée que constitue le crayon combustible (environ 4 mètres de hauteur pour un diamètre environ 400 fois plus petit), un découpage en tranches axiales du crayon est adopté. Chaque tranche représente une partie de l'empilement des pastilles et le tronçon de gaine en regard. Le fait que toutes les pastilles constituant cette tranche sont identiques avant irradiation et sont soumises aux mêmes conditions d'irradiation permet de considérer une seule pastille située au milieu de la tranche axiale. Chacune des tranches peut être modélisée indépendamment avec pour les calculs les plus rapides des champs solutions (température, déplacement...) axisymétriques (1D). Chaque tranche axiale composant le crayon peut également être modélisée en 2D (plan transverse à l'axe du crayon) afin de représenter des effets de localisation des contraintes dans la gaine face aux fissures affectant le combustible [2]. Une modélisation 3D est également possible afin de représenter au plus près l'IPG (interaction pastille-gaine) [3]. Un maillage adapté à la modélisation 1D, 2D ou 3D retenue est réalisé (voir des exemples de ces maillages en figure 89). À noter qu'à l'échelle de la tranche, un algorithme récursif est aussi mis à disposition pour calculer des variables d'état à l'échelle de la microstructure (méthode des éléments finis carrés [4]).

## Un problème multi-physique

Comme indiqué dans l'introduction, la modélisation combustible est un problème multi-physique, l'évolution avec l'irradiation du jeu pastille-gaine en étant l'illustration la plus manifeste : à une cote axiale donnée du crayon, la largeur de ce jeu pilote le gradient de température affectant la pastille, lequel pilote le champ de déplacement dans la pastille et donc ce même jeu. Ainsi, le calcul du jeu pastille-gaine nécessite une analyse conjuguant analyses mécanique et thermique. Si dans le calcul de ce jeu, on ne tient pas compte des évolutions dimensionnelles du combustible sous l'effet de l'irradiation (son gonflement évoqué plus haut, mais aussi sa densification en tout début de vie), on ne pourra pas estimer correctement les déformations diamétrales du gainage en fin d'irradiation. Or, le gonflement induit par l'irradiation dépend en partie des contraintes affectant le combustible... donc il ne peut y avoir de calcul du jeu pastille-gaine sans un calcul couplé thermique-mécanique-physique de l'irradiation. Enfin, le relâchement des produits de fission gazeux dans le volume interne du crayon tend à augmenter la pression interne dans le crayon et à diminuer la conductivité du jeu pastille-gaine. Pour connaître l'état du jeu à une cote axiale donnée, il faut donc résoudre ce problème couplé sur toute la hauteur du crayon combustible.

Le schéma de résolution multi-physique fourni par l'architecture PLÉIADES est schématisé en figure 89. À chaque pas de temps du calcul sont résolus des problèmes multi-physiques couplés à la fois à l'échelle du crayon (échelle globale) et à l'échelle de chacune des tranches le constituant (échelle locale). Ces problèmes couplés sont résolus par une méthode du point fixe (de type Gauss-Seidel par bloc) dans laquelle chaque modèle est appelé de façon séquentielle à l'intérieur d'une boucle de convergence. Des algorithmes d'accélération [5] sont mis en œuvre pour accélérer la convergence de la résolution itérative du système couplé. Le pas de temps peut être donné *a priori* ou adapté durant le calcul selon des critères mathématiques et physiques prédéfinis.

À l'échelle du crayon, le couplage porte sur la pression interne et sur la thermohydraulique. À l'échelle d'une tranche, plusieurs modèles physiques doivent être couplés. Une présentation synthétique de ces modèles est proposée dans la section suivante, mais le lecteur intéressé par une description plus détaillée pourra lire la contribution [1] récente à ce sujet.

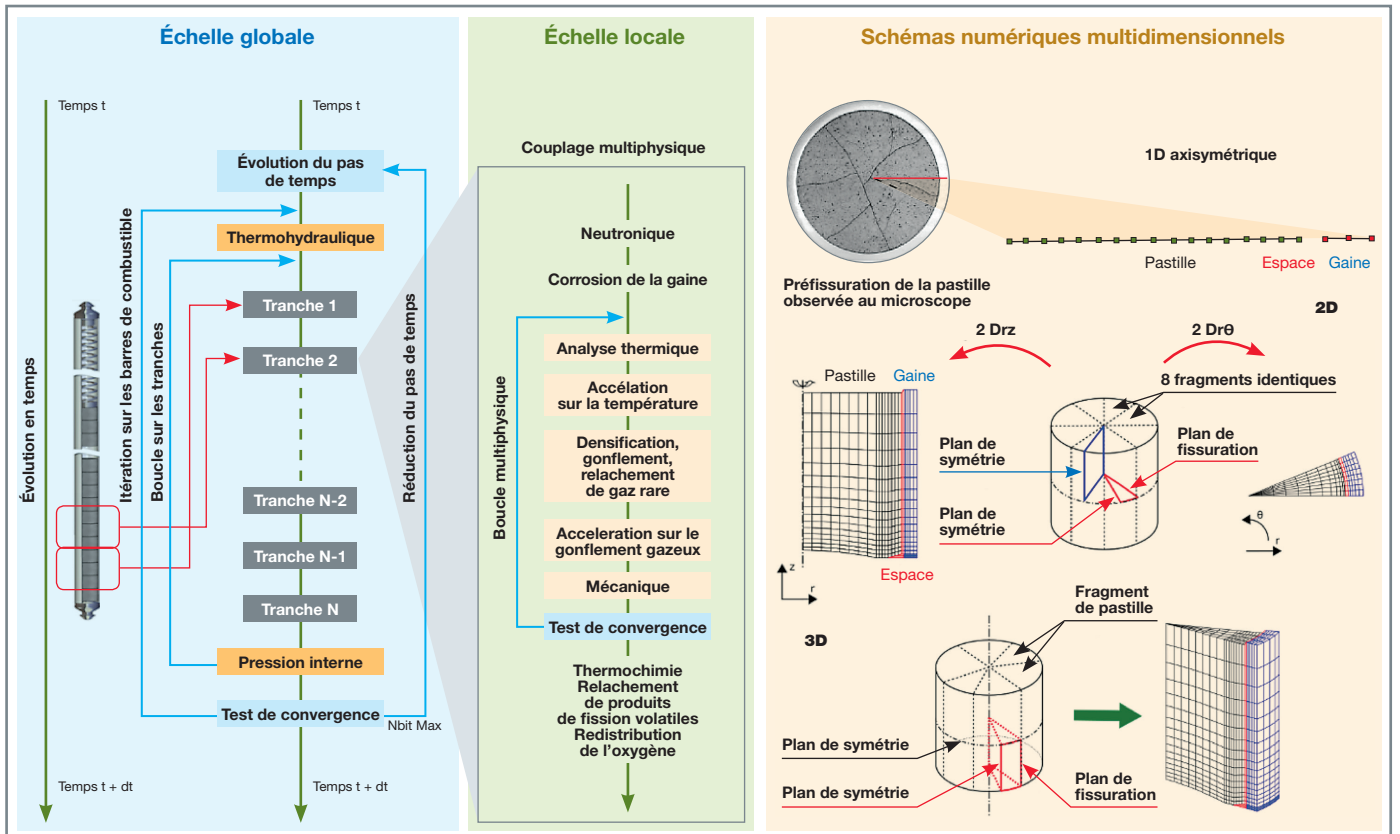


Fig. 89. Schéma de couplage multi-physique ALCYONE/PLÉIADES.

## Les modèles physiques au cœur de la simulation combustible

### Produits de fission, vecteur isotopique

Le combustible est le siège de réactions nucléaires (avec par exemple dans l' $\text{UO}_2$  la fission de l'isotope 235 de l'uranium et des chaînes de réactions liées à la transmutation de l'uranium 238), ce qui conduit à une évolution de sa composition isotopique et plus généralement à l'apparition dans la maille cristalline des produits de ces réactions nucléaires. Ces évolutions sont actualisées à chaque instant et à chaque point de discrétisation du combustible à l'aide du modèle neutronique PRODHEL de la plateforme PLÉIADES qui est détaillé dans [6]. Connaissant la puissance linéique imposée à la cote axiale considérée, PRODHEL estime en chaque point de la tranche considérée la densité de puissance thermique dégagée ainsi que les produits de la réaction nucléaire. Les produits de fission gazeux, xénon et krypton pour l'essentiel, sont ainsi inventoriés à chaque instant et en chacun des points de discrétisation de la colonne combustible.

### Modélisation des produits de fission gazeux (évolution de la microstructure sous irradiation)

Les produits gazeux de la réaction de fission nucléaire induisent des évolutions chimique et physique (composition, microstructure) des combustibles soumis aux différentes conditions de fonctionnement ou de stockage définies ci-dessus. Une fois produits, ces gaz peu solubles dans la maille cristalline sont susceptibles d'entraîner la formation de bulles au sein desquelles ils se regroupent. Selon les conditions de température, liées à la position radiale dans la pastille combustible, ces bulles vont migrer, croître ou même coalescer dans les grains et également sur les joints de grain. Même en irradiation de base et pour un combustible de dioxyde d'uranium, un relâchement continu de quelques pourcents de ces produits de fission gazeux dans le volume interne du crayon est constaté. À noter que, pour les combustibles MOX également utilisés dans les REP français, la contribution de l'hélium doit également être prise en compte (ce point ne sera pas détaillé ici).

La simulation du comportement de ces produits de fission gazeux s'appuie sur des modèles spécifiques de la plateforme PLÉIADES, MARGARET [7] et CARACAS [8], avec une représentation « grain moyen » de la microstructure polycristalline de l'oxyde. Le modèle sous-jacent nécessite la définition de variables d'état – la densité de bulles, leur taille, la concentration en produit de fission gazeux dans ces bulles et dans le solide –, variables d'état définies en moyenne dans le volume des grains (intra-granulaires) et à leurs surfaces (inter-granulaires). La simulation permet ainsi de prédire convenablement l'inventaire gazeux à l'issue de l'irradiation, notamment la « zone de précipitation » mise en évidence

par les examens de combustibles irradiés et correspondant à une densité de bulles élevée au centre de la pastille.

La restructuration du combustible observée à fort taux de combustion en périphérie de pastille pour le dioxyde d'uranium correspond à une forte diminution de la taille de grains (près d'un facteur 50 !) et une forte augmentation de la fraction volumique de bulles qui contiennent la quasi-totalité de l'inventaire des gaz de fission présents avant la restructuration. Les données expérimentales à ce sujet sont fournies par les examens post-irradiatoires, des mesures « *in situ* » en irradiation jusqu'à de forts taux de combustion ou encore des expérimentations menées sur combustibles irradiés (voir par exemple [9]).

### Analyse thermochimique, relâchement de produits de fission corrosifs

La chimie des produits de fission volatils (FP), tels que le césium, l'iode et le tellure, est une question importante au regard des ruptures par IPG de la gaine combustible par corrosion sous contrainte assistée par l'iode (I-SCC) en situations incidentelles [10]. Pour estimer la quantité de produits de fission corrosifs disponibles en peau interne de la gaine en situation de forte IPG, le modèle de thermochimie de la plateforme PLÉIADES, basé sur le code OPENALPHAD (OC) [11], est associé à PRODHEL pour les produits des réactions nucléaires et à MARGARET pour le comportement des produits de fission gazeux. Pour bien représenter les équilibres chimiques en chaque point du combustible, la thermodiffusion de l'oxygène est également modélisée [12]. Sous l'effet du gradient thermique entre le centre et la périphérie de la pastille, l'oxygène présent dans l'oxyde est susceptible de se redistribuer, ce qui peut conduire à un relâchement non négligeable de césium, ce dernier étant susceptible de réagir avec l'iode dans le volume libre du combustible, conduisant ainsi à diminuer la quantité des espèces corrosives [13]. On peut ainsi déterminer à chaque instant l'inventaire en produits de fission corrosifs, leurs interactions chimiques et leurs migrations/relâchement.

### Modélisation thermique

La distribution de température à travers l'élément combustible est calculée grâce à l'équation de la chaleur :

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) + p_v \quad (1),$$

où  $T$  est la température,  $\rho$  la densité,  $c_p$  la capacité calorifique,  $\lambda$  la conductivité thermique et  $p_v$  la densité volumique de puissance thermique dégagée au point considéré. À jeu pastille-gaine ouvert, le flux de chaleur à travers le jeu pastille-gaine est déduit de la relation suivante :

$$\Phi = h \cdot (T_g - T_p) \quad (2),$$

où  $h$  désigne le coefficient d'échange équivalent du jeu,  $T_g$  la température en face interne de la gaine et  $T_p$  la température en face externe combustible. Le coefficient d'échange équivalent  $h$  dépend de l'épaisseur du jeu pastille-gaine, de sa température, de la composition gazeuse dans le volume libre et de la rugosité de l'interface pastille-gaine.

### Spécificités de la modélisation mécanique du crayon combustible

Sous l'effet des sollicitations thermomécaniques décrites ci-dessus, des contraintes internes accompagnées de déformations inélastiques apparaissent dans l'élément combustible. Pour la gaine, tant que le jeu pastille-gaine est ouvert, cela se manifeste par une réduction de diamètre par fluage, fluage activé par le différentiel de pression et l'irradiation. En tout début de vie, les dilatations thermiques différentielles entre le centre et la périphérie de la pastille conduisent à des contraintes de traction en périphérie qui ne sont pas soutenables pour la céramique fragile, ce qui explique sa fissuration macroscopique radiale et axiale (voir fig. 89). En complément de ce mécanisme de redistribution instable des contraintes, le fluage induit par l'irradiation permet de relaxer en partie les contraintes dans le combustible en régime nominal. De façon générale, l'élément combustible doit être vu comme une structure dans laquelle coexistent des déformations irréversibles ductiles et fragiles. En ce sens, il appartient à la famille des structures à comportement quasi fragile, comme le béton des enceintes de confinement par exemple (voir p. 143).

#### Modélisation de la fissuration du combustible

La fissuration du combustible doit absolument être prise en compte pour bien évaluer les contraintes d'origine thermique et la relocalisation des fragments de pastille. Cette fissuration est représentée de deux façons différentes dans l'analyse par éléments finis. Lorsque la tranche axiale considérée est modélisée en 2D ou en 3D, la modélisation géométrique des fragments est possible avec des conditions aux limites appropriées. On peut ainsi représenter les fissures primaires apparaissant dès le début de l'irradiation sous l'effet du gradient thermique. D'autre part, un modèle d'endommagement volumique [14] est également possible, quelle que soit la représentation géométrique 1D, 2D ou 3D adoptée pour la tranche considérée, afin de décrire l'apparition et la propagation de fissures dans la céramique au cours de son irradiation. À noter que la décohérence inter-granulaire observée dans certaines situations de fonctionnement est également prise en compte dans la modélisation MARGARET/CARACAS afin de représenter l'accélération du relâchement observé dans ces situations.

#### Fissuration, plasticité, contact unilatéral... un problème fortement non linéaire

L'état mécanique de l'élément combustible est calculé à l'aide des équations d'équilibre et des conditions aux limites rappelées en page 27.

Avec l'hypothèse de partition des déformations, la loi de Hooke pour la pastille et la gaine respecte la forme générale :

$$\underline{\sigma} = \underline{C} : (\underline{\epsilon}(u) - \underline{\epsilon}^{in}) \tag{3}$$

Dans notre cas, la vitesse de déformation inélastique prend la forme particulière suivante :

$$\dot{\underline{\epsilon}}^{in} = \dot{\underline{\epsilon}}^{th} + \dot{\underline{\epsilon}}^{ir} + \dot{\underline{\epsilon}}^{plast} + \dot{\underline{\epsilon}}^{creep} + \dot{\underline{\epsilon}}^{crack} \tag{4},$$

où  $\dot{\underline{\epsilon}}^{th}$  désigne la vitesse de dilatation thermique,  $\dot{\underline{\epsilon}}^{ir}$  la vitesse de déformation induite par l'irradiation,  $\dot{\underline{\epsilon}}^{plast}$  la vitesse de déformation plastique,  $\dot{\underline{\epsilon}}^{creep}$  la vitesse de déformation de fluage et  $\dot{\underline{\epsilon}}^{crack}$  la vitesse de déformation inélastique induite par la propagation de la fissuration. Certaines de ces déformations dépendant elle-même de l'état de contrainte, la relation (3) constitue un système différentiel non linéaire qui est en pratique implémenté et résolu *via* MFRONT [15] (voir encart p. 31). Si on prend, par exemple, le cas de la description 3D d'une des tranches constituant le crayon, la relation (4) permet de représenter les déformations inélastiques suivantes :

- Dilatation thermique isotrope dans la pastille, anisotrope dans la gaine ;
- contraction isotrope induite par la densification et la compressibilité élastique de la pastille ;
- gonflement isotrope induit par les produits de fission dans la pastille ;
- croissance axiale d'irradiation de la gaine ;
- déformation de fluage de la pastille avec trois contributions principales : fluage athermique induit par l'irradiation, fluage thermique induit par la diffusion de lacunes et fluage thermique induit par le mouvement de dislocations ;
- déformation de fissuration dans la pastille (voir paragraphe précédent) ;
- déformation de fluage thermique anisotrope dans la gaine et incluant l'effet de l'irradiation ;
- déformation plastique anisotrope de la gaine sous forte vitesse de déformation.



Le contact potentiel entre la pastille et la gaine est modélisé par une condition de contact frottant unilatéral. À l'équilibre mécanique et pour tous les nœuds du maillage de la pastille et de la gaine en vis-à-vis, on peut ainsi déterminer l'épaisseur du jeu (à jeu ouvert) ou la pression de contact (à jeu fermé). À jeu ouvert, nous avons expliqué plus haut que l'échange de chaleur est calculé avec l'équation (2).

## Validation intégrale

La validation intégrale du code ALCYONE s'appuie sur des programmes expérimentaux d'irradiation avec le suivi de crayons en réacteur de puissance pour le régime nominal et des essais en réacteurs expérimentaux pour les conditions incidentelles et accidentelles. Certaines données sont directement issues des mesures en ligne dont un grand nombre

provient d'examens post-irradiatoires réalisés pour l'essentiel par le CEA. Les résultats de ces examens, ainsi que les données décrivant les conditions dans lesquelles ces crayons ont été irradiés, sont capitalisés dans la base de données expérimentales de validation CRACO.

Deux exemples de comparaisons calculs/expériences sont donnés sur la figure 90-haut (calculs réalisés avec le schéma 1D ALCYONE). Les examens ont été effectués dans une installation spécifique du CEA pouvant accueillir des crayons irradiés de plus de 4 mètres (le LECA-STAR, CEA CADARACHE). La première figure concerne la fraction de gaz relâchée dans le volume interne de différents crayons à l'issue de leur irradiation de base. Connaissant la composition du gaz de remplissage du crayon avant irradiation, le gaz relâché est mesuré par perçage du crayon irradié. La fraction relâchée est alors calculée connaissant les conditions d'irradiation du crayon (ce qui permet à ALCYONE de calculer l'inventaire du gaz créé par l'irradiation) dans le cas de crayons  $UO_2$  ou MOX. La figure 90-bas concerne les variations de diamètre des crayons à l'issue de leur irradiation. Sont distinguées sur cette figure différentes nuances de matériau de gainage. Les variations de diamètre résultent du comportement mécanique sous irradiation du matériau de gainage, mais également des variations dimensionnelles de la colonne combustible, comme expliqué plus haut. Les simulations reproduisent bien les données expérimentales pour une large gamme de conditions d'irradiation.

Des tendances similaires sont également obtenues sur l'allongement de la colonne combustible et du crayon à l'issue de l'irradiation (voir fig. 91).

La simulation de ces grandeurs intégrales par des calculs axisymétriques 1D est également complétée par des simulations ALCYONE 3D en incluant des examens complémentaires. Comme expliqué dans l'encart « Interaction pastille-gaine, formation des plis primaires » ci-après, les plis observés en fin d'irradiation sur les gaines aux inter-pastilles sont les « stigmates » de l'IPG. Comme l'illustre la figure 92 suivante, la hauteur de ces plis primaires mesurée à l'issue de l'irradiation fait également l'objet de comparaisons entre simulations et expériences. La bonne corrélation obtenue permet de s'assurer que les principaux phénomènes en compétition lors de l'IPG sont bien représentés par la simulation.

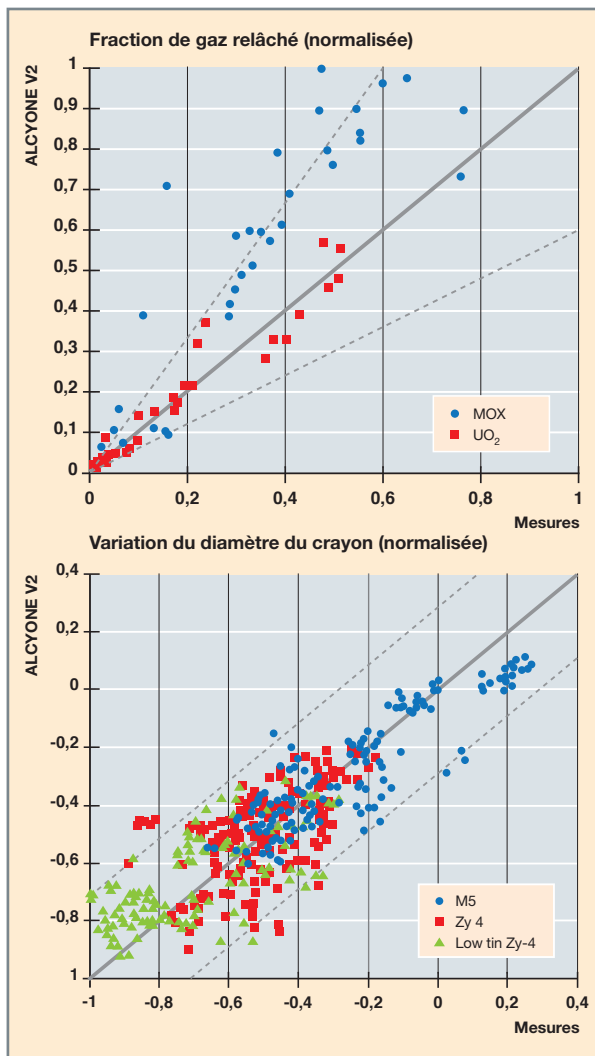


Fig. 90. Fraction de gaz relâché (haut) et variation de diamètre du crayon (bas) en fin d'irradiation de base, comparaisons entre les prédictions de la version 2.0 d'ALCYONE et la mesure.

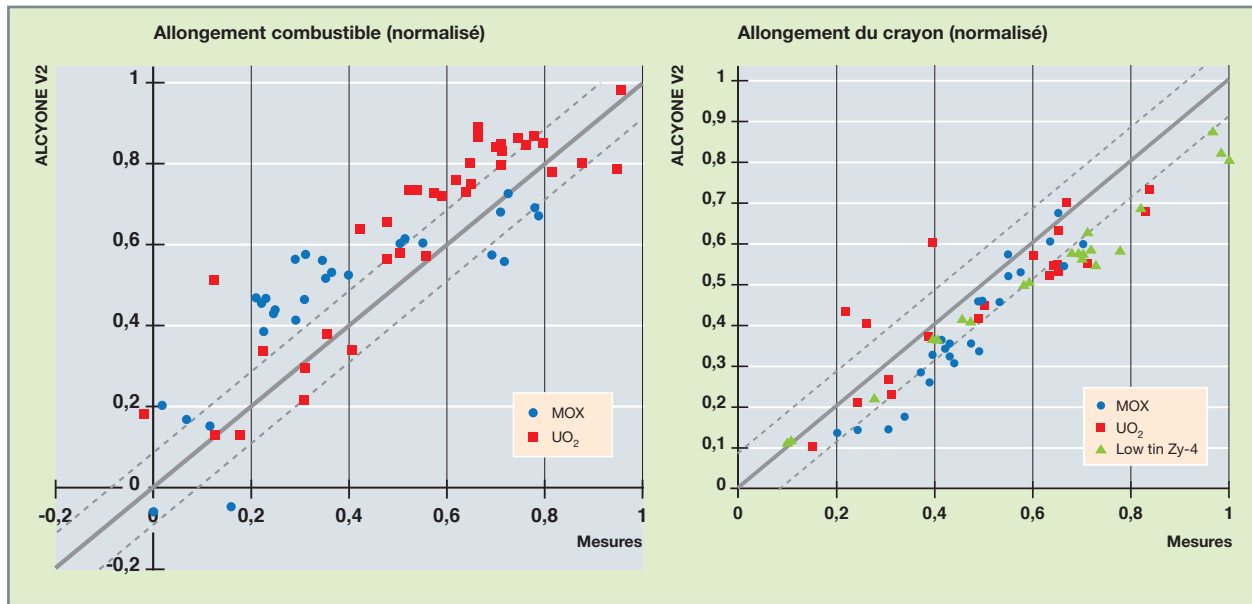


Fig. 91. Allongement combustible (gauche) et crayon à l'issue de l'irradiation de base, comparaisons entre les prédictions de la version 2.0 d'ALCYONE et la mesure.

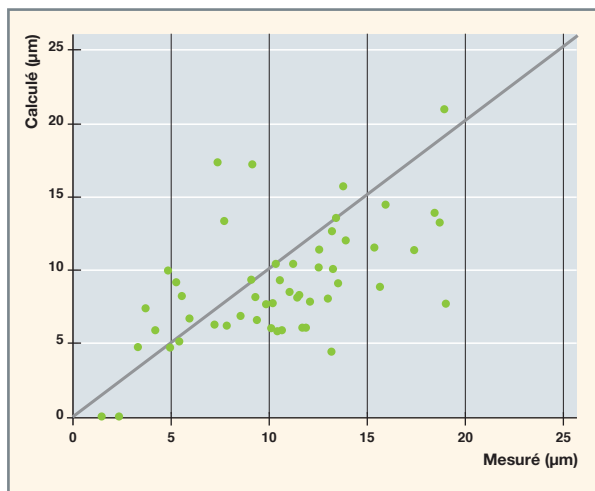


Fig. 92. Hauteur des plis primaires (déformation de la gaine localisée aux inter-pastilles) à l'issue de l'irradiation de base, comparaisons entre les prédictions de la version 2.0 d'ALCYONE et la mesure.

## Conclusions

La mécanique de l'élément combustible est un ingrédient indispensable de sa modélisation multi-physique puisque, une fois couplée avec les différents modèles physiques décrits plus haut, elle permet d'estimer les évolutions dimensionnelles de l'élément combustible (évolution des diamètres, élongation axiale) qui peuvent être comparées à des examens post-irradiation.

L'évaluation des contraintes affectant l'élément combustible en régime nominal est, par ailleurs, un prérequis pour juger

dans des situations incidentelles, voire accidentelles, de la tenue de la mécanique de la gaine, mais aussi de la colonne combustible (risque de dispersion en cas de brèche du gainage). L'analyse des situations accidentelles de type APRP conduit à développer de nouvelles modélisations adaptées à la représentation de milieux granulaires (méthode des éléments discrets). Les études expérimentales et numériques des matériaux de gainage en condition APRP font l'objet d'un encart spécifique (voir encart « Études expérimentales et numériques des matériaux de gainage en condition APRP », p. 118).

Capable de simuler le comportement de l'élément combustible dans diverses situations de fonctionnement, ALCYONE permet de « challenger » par la simulation des propositions de crayons combustibles innovants. Ces simulations en soutien à l'innovation nécessitent des développements en mécanique comme la détermination de lois de comportements des solutions alternatives proposées (combustibles de type céramique-métal-cermet) ou encore la modélisation de la couche de revêtement en périphérie externe de la gaine (gainages revêtues de chrome).

ALCYONE est également intégrée dans la plateforme CORPUS-SALOME [16] comme composant d'un couplage multi-discipline avec les codes métiers de neutronique et de thermohydraulique pour simuler le comportement du cœur du réacteur à l'aide de modèles à l'état de l'art des connaissances dans toutes ces disciplines.

Enfin, pour l'élément combustible de quatrième génération (filiale RNR-Na) ou celui du futur réacteur RJH, l'analyse mécanique s'inscrit également dans une modélisation multi-physique capitalisée avec les applications GERMINAL et

## Interaction pastille-gaine (IPG), formation des plis primaires

Durant la première montée en puissance, la différence de température entre le centre et la périphérie des pastilles conduit à une fragmentation du combustible et à la mise en diabolo des fragments. Cela conduit à une réduction du jeu dans les plans inter-pastilles (voir fig. 93a). Durant l'irradiation, les dimensions de l'élément combustible vont varier sous l'effet de deux phénomènes différents mais concomitants :

- Gonflement des pastilles après une densification initiale ;
- fluage en compression de la gaine sous l'effet de la pression de l'eau du circuit primaire.

La compétition entre ces deux variations dimensionnelles conduit à une fermeture progressive du jeu pastille-gaine avec principalement deux types d'interaction pastille-gaine :

- Interaction faible : le jeu est partiellement fermé au niveau des inter-pastilles ;

- interaction forte : le jeu est entièrement fermé, ce qui conduit à une augmentation significative de la pression de contact entre la pastille et la gaine (voir fig. 93b).

Durant cette interaction mécanique, la forme en diabolo des pastilles s'imprime sur la gaine, car, comme expliqué en introduction de cet encart, cette dernière, ductile, flue sous l'effet de la pression du circuit primaire. De plus, la réduction de diamètre du gainage tend à réduire l'amplitude de la forme en diabolo des pastilles qui fluent également sous l'effet de l'irradiation. Cette analyse montre que la hauteur finale des plis primaires à l'issue de l'irradiation de base résulte de la compétition entre le fluage de la gaine et des pastilles. À noter également que le développement de la restructuration à fort taux de combustion en périphérie de la pastille avec un gonflement gazeux marqué peut également réduire la déformation diamétrale du gainage à l'issue de l'irradiation de base.

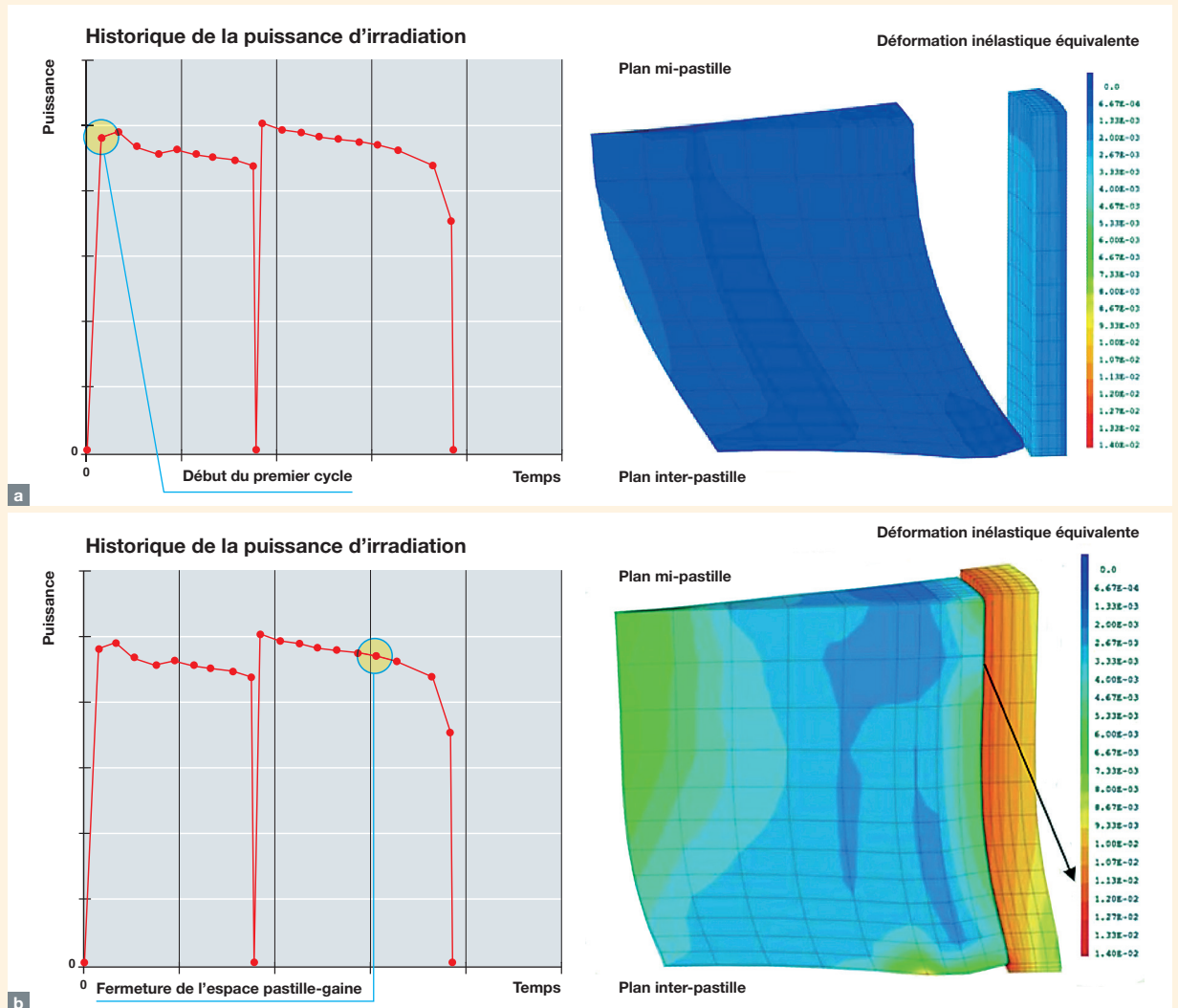


Fig. 93. Fermeture du jeu pastille-gaine et formation des plis lors de l'irradiation de base d'un crayon combustible. (a) Mise en diabolo de la pastille à la fin de la première montée en puissance. (b) Fermeture complète du jeu pastille-gaine à la fin du second cycle d'irradiation (les déformations sont amplifiées).

La connaissance du comportement des matériaux de gainage en conditions d'accident de type perte de réfrigérant primaire (APRP) est entre autres nécessaire au « dimensionnement » des systèmes de refroidissement d'urgence des réacteurs nucléaires [17]. Il s'agit en particulier de garantir à tout instant du transitoire et post-transitoire le maintien d'une géométrie des assemblages combustible « refroidissable » en tout point. En effet, au cours des transitoires APRP, la gaine subit un chauffage rapide induit par la puissance résiduelle des pastilles d'uranium combiné à la perte du réfrigérant primaire. En parallèle, la pression interne du gaz d'hélium (et des gaz de fission progressivement relâchés) augmente avec la température pouvant provoquer le ballonnement, voir l'éclatement localisé des crayons. Il s'agit alors de s'assurer que le ballonnement des gaines n'est pas trop important pour éviter un « bouchage » des canaux de refroidissement inter-crayons et, pour des niveaux élevés de combustion, une relocalisation trop importante du combustible dans les zones ballonnées (qui apporterait alors un surcroît d'échauffement local...). Après l'atteinte d'un premier pic de température, les gaines continuent de chauffer plus lentement, le temps que les systèmes de refroidissement d'urgence aient pu jouer leur rôle. L'évaporation de l'eau du circuit primaire sous forme de vapeur provoque une oxydation accélérée des matériaux de gainage à haute température (température maximale « réglementaire » : 1 204 °C). Afin d'éviter la fragmentation des gaines, les matériaux de gainage du combustible doivent aussi répondre à des exigences physico-chimiques (oxydation et/ou hydratation limitées à un certain niveau), pour pouvoir garantir leur résistance lors de la trempe finale – sous un certain chargement

mécanique axial – et une certaine ductilité « post-trempe » pour garantir la refroidissabilité à plus long terme (par exemple, en cas de répliques de séisme ou lors d'opérations de manutention post-accidentelles...).

La CEA étudie expérimentalement de tels trajets thermiques et mécaniques *via* plusieurs approches. Le dispositif expérimental historique EDGAR [18] (voir fig. 94) permet par exemple d'appliquer différents trajets de température et de pression (interne) sur des tronçons de gainage de 490 mm, tout en mesurant en continu la déformation (fluage) circonférentielle de la gaine, allant en général jusqu'à l'éclatement.

Ces données expérimentales sont ensuite exploitées pour l'identification de lois de fluage thermomécaniques faisant intervenir une dépendance métallurgique [19] (pour tenir compte des changements de phases allotropiques de l'alliage de zirconium intervenant typiquement entre 800 et 1 000 °C). Les modèles de fluage et critères de ruptures sont implémentés sous MFRONT [20] et peuvent être utilisés pour des calculs de structure avec notamment le code combustible de performance PLÉIADES/ALCYONE [21]. Ces simulations bénéficient également d'une base de comparaison expérimentale complémentaire, grâce aux résultats des essais instrumentés sur de courts crayons combustible irradiés et pressurisés qui sont réalisés sur le dispositif CEA VINON-LOCA [22]. Dans le futur, des données supplémentaires sur crayons irradiés en situation APRP pourront également être obtenues à l'aide du dispositif expérimental CEA LORELEI du réacteur RJH [23].

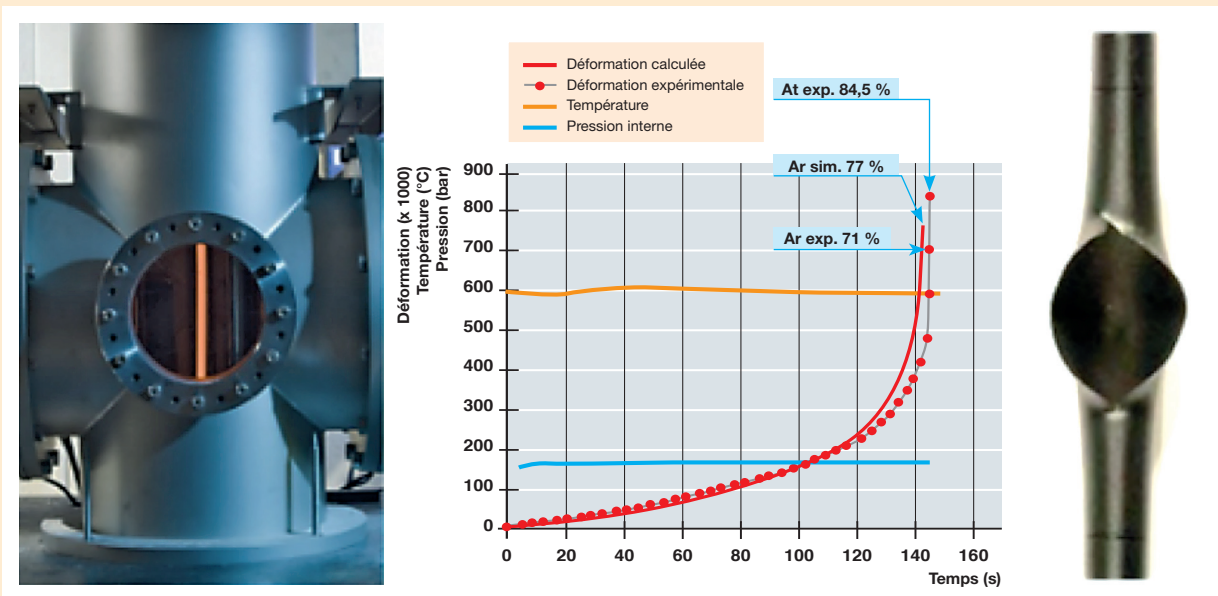


Fig. 94. Dispositif EDGAR avec une gaine (son aspect rouge est lié à sa température élevée) chauffée et pressurisée sous ambiance vapeur. Un exemple de résultat expérimental obtenu et de loi de fluage thermique-métallurgique-mécanique identifiée. Une gaine post-ballonnement et éclatement est illustrée à droite.



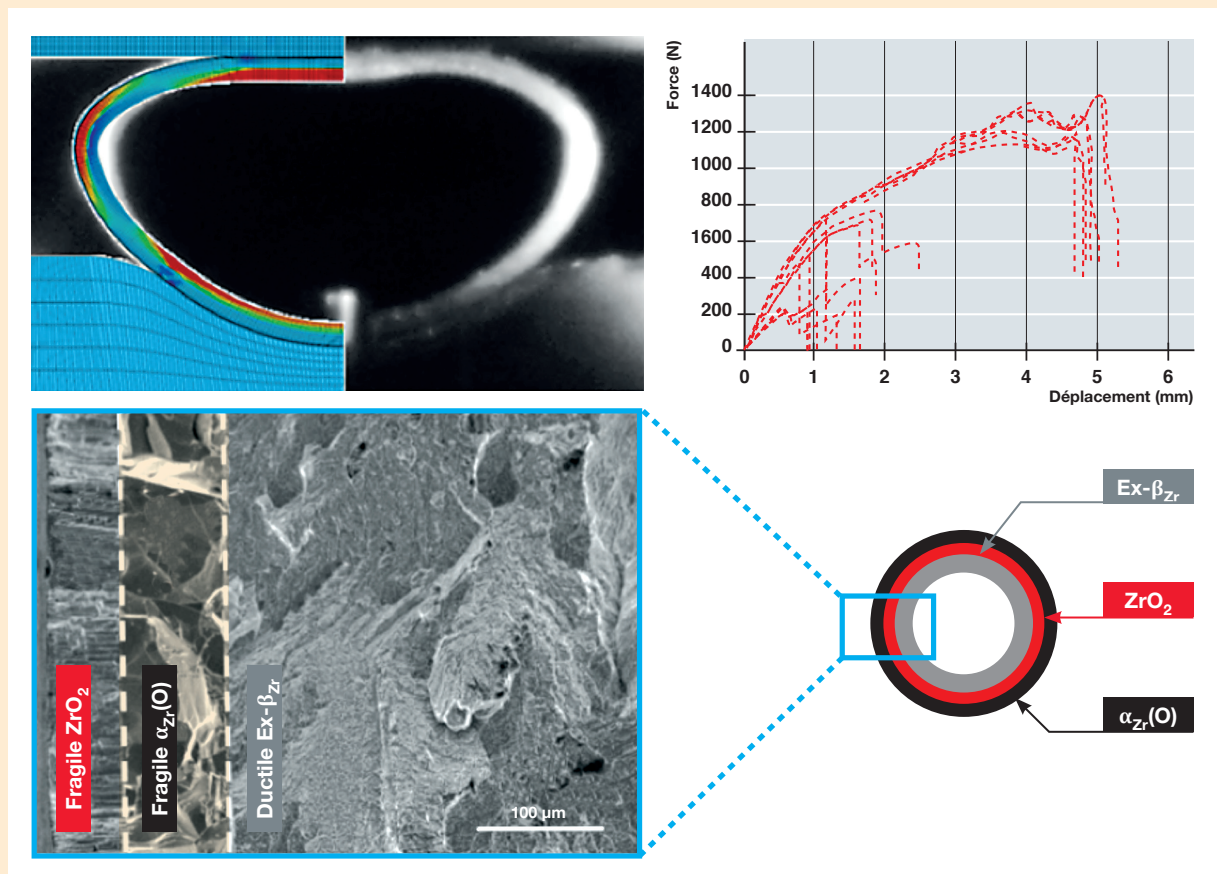


Fig. 95. La comparaison entre une simulation éléments finis d'un essai de compression d'anneau (« post-oxydation-HT-trempe ») filmé aide à l'interprétation des résultats. La chute de charge en fonction du déplacement de la traverse est utilisée comme indicateur de la « ductilité résiduelle » du tronçon post-trempe. Des corrélations entre la distribution des différentes phases dans l'épaisseur du tube, leurs modes de rupture respectifs (zones ductiles vs. fragiles) et la réponse mécanique globale sont développées.

Le comportement du matériau de gainage au cours de la seconde phase d'un APRP est étudié de longue date sous environnement vapeur et à différentes températures à l'aide de différents dispositifs développés au CEA (exemples : DEZIROX, I2TOX, CINOG) [24] [25]. Des lois d'oxydation sont alors déterminées, qui permettent de décrire le comportement des gaines sous atmosphère corrosive à haute température. Ces modèles sont également intégrés (*via* MFRONT notamment) et utilisés dans des calculs ALCYONE.

Le comportement des échantillons lors de l'oxydation et lors de la trempe est en général caractérisé *post mortem*, mais aussi au moyen d'expériences *in situ* (diffraction de RX). Conventionnellement, le comportement mécanique post-trempe est étudié, quant à lui, sur un dispositif de compression d'anneau. Les modes locaux de rupture ductiles/fragiles peuvent alors être reliés à la teneur en oxygène et/ou en hydrogène et aux épaisseurs des différentes couches métallurgiques et d'oxyde formées (*i.e.*, zone plus ou moins ductile [ex- $\beta_{Zr}$ ], et

couche fragiles [ $ZrO_2$  et  $\alpha_{Zr}(O)$ ]). Des simulations numériques éléments finis (Cast3M [26]) peuvent être employées pour aider à mieux interpréter ces expériences, car il s'agit de décrire la structure « composite » des gaines, oxydées à haute température puis trempées, constituée de différentes couches aux propriétés mécaniques bien distinctes [27].

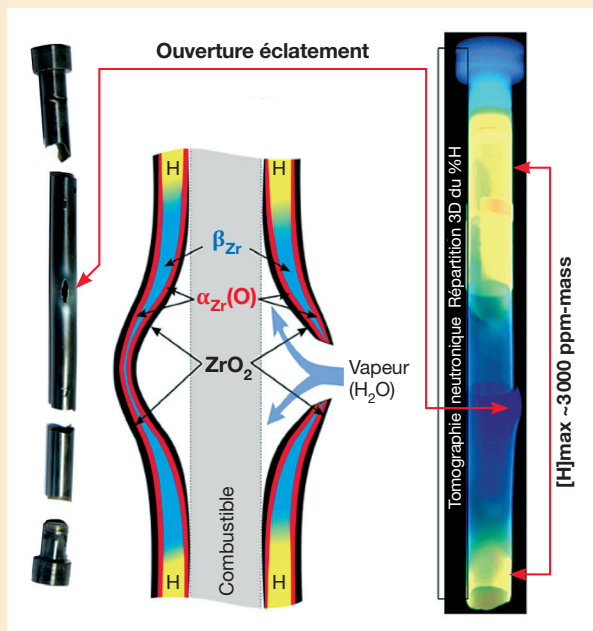
Le phénomène particulier de fragilisation localisée de la gaine post-éclatement, par oxydation interne et prise massive locale d'hydrogène (*i.e.* hydruration secondaire), est quantifié à différentes échelles à l'aide d'outils comme la microsonde nucléaire ( $\mu$ ERDA) et la tomographie neutronique [28] sur des gaines ayant subi une première phase d'éclatement (essai EDGAR), puis une oxydation subséquente sous vapeur à haute température, puis une trempe.

Des études sur des matériaux « modèles », chargés de manière homogène en oxygène et/ou hydrogène, sont également menées [29] [30] [31] [32] [33]. Il s'agit alors de déterminer des

lois de comportement thermomécaniques qui dépendent de la température, de la teneur en oxygène et/ou en hydrogène. Ces lois visent à être implantées dans des calculs éléments finis pour décrire le comportement de la gaine post-APRP, en tenant compte des gradients de microstructures et des propriétés mécaniques caractéristiques.

Ces approches sont dorénavant étendues pour décrire le comportement des gaines de combustible innovantes revêtues de chrome (en tant que concept *enhanced-accident-tolerant-fuel*) [34] [35]. En effet, celles-ci présentent des améliorations, mais aussi des spécificités de leur comportement thermomécanique en APRP et post-APRP qu'il vaut mieux comprendre pour pouvoir *in fine* les modéliser et à terme les capitaliser dans un outil tel qu'ALCYONE.

Fig. 96. Gaine ayant subi un éclatement puis un maintien sous atmosphère vapeur à haute température. L'hydruration secondaire, schématisée au centre, est ici caractérisée de manière non destructive par tomographie neutronique (distribution 3D de la concentration en hydrogène).



MAIA de la plateforme PLÉIADES. Le schéma multi-physique global/local décrit précédemment est similaire à celui mis en œuvre pour les aiguilles RNR-Na (GERMINAL). L'ensemble des applications PLÉIADES s'appuie sur le solveur Cast3M pour la résolution des problèmes thermiques et mécaniques par la méthode des éléments finis, alors que les autres modèles physico-chimiques sont résolus avec des solveurs dédiés ayant pour objet une représentation de plus en plus détaillée de l'élément combustible allant jusqu'à l'échelle de ses matériaux constitutifs.

Par ailleurs des travaux visant à utiliser au maximum les capacités de la parallélisation de la résolution sont en cours. Une résolution éléments finis « HPC » représente, à ce titre, une forte attente pour la plateforme PLÉIADES.

**Renaud MASSON, Bruno MICHEL,**  
**Isabelle RAMIÈRE, Clément INTROÏNI,**  
*Département d'Études des Combustibles*  
**Ali CHARBAL et Jean-Christophe BRACHET,**  
*Département de Recherche sur les Matériaux*  
*et la Physico-chimie pour les énergies bas carbone*

#### ► Références

- [1] B. MICHEL *et al.*, "Two fuel performance codes of the PLÉIADES platform : ALCYONE and GERMINAL", *Nuclear Power Plant Design and Analysis Codes*, Woodhead Publishing, pp. 207-233, 2021.
- [2] J. SERCOMBE, R. MASSON and T. HELFER, "Stress concentration during pellet cladding interaction : Comparison of closed-form solutions with 2D  $(r, \theta)$  finite element simulations", *Nuclear Engineering and Design*, n° 260, pp. 175-187, 2013.
- [3] B. MICHEL, J. SERCOMBE, C. NONON, F. MICHEL and V. MARELLE, "Simulation of Pellet-Cladding Interaction with the PLÉIADES Fuel Performance Software Environment", *Nuclear Technology*, n° 182, pp. 124-137, 2013.
- [4] I. RAMIÈRE, R. MASSON, B. MICHEL et S. BERNAUD, « Un schéma de calcul multi-échelles de type éléments finis au carré pour la simulation de combustibles nucléaires hétérogènes », 13<sup>e</sup> colloque national en calcul des structures, mai 2017.
- [5] I. RAMIÈRE and Th. HELFER, "Iterative residual-based vector methods to accelerate fixed point iterations", *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 70, Issue 9, pp. 2210-2226, November 2015.
- [6] F. LEMOINE, D. BERNARD and E. FÉDÉRICI, "Validation Assessment of Neutron Calculations for Radial and Azimuthal Distributions of Actinides and Fission Products in PWR Rods," presented at 2011 Water Reactor Fuel Performance Mtg., Chengdu, China, September 11-14, 2011.
- [7] L. NOIROT, "MARGARET : A comprehensive code for the description of fission gas behavior", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 241, n° 6, pp. 2099-2118, June 2011.

- [8] G. JOMARD *et al.*, “CARACAS : An industrial model for description of fission gas behavior in LWR-UO<sub>2</sub> fuel”, Proc. Of Water Reactor Fuel Performance Meeting/TopFuel Conference, Sendai, Japan, 2014.
- [9] J. NOIROT, Y. PONTILLON, S. YAGNIK and J. A. TURNBULL, “Post-irradiation examinations and high-temperature tests on undoped large-grain UO<sub>2</sub> discs”, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 462, pp. 77-84, July 2015.
- [10] M.H. PIRO, D. SUNDERLAND, S. LIVINGSTONE, J. SERCOMBE, W. REVIE, A. QUASTEL, K. TERRANI and C. JUDGE, “A review of pellet-clad interaction behavior in zirconium alloy fuel cladding”, *Reference Module In Materials Science And Materials Engineering*, Elsevier, 2017.
- [11] B. SUNDMAN, U. R. KATTNER, M. PALUMBO and S. G. FRIES, “Open-Calphad – a free thermodynamic software”, *Integrating Materials and Manufacturing Innovation* 4 (1).
- [12] P. KONARSKI *et al.*, “3D Simulation of power ramps with ALCYONE including fuel thermochemistry and oxygen thermodiffusion”, *J. Nucl. Mater.*, 519, pp. 104-120, 2019.
- [13] J. SERCOMBE, C. RIGLET-MARTIAL and B. BAURENS, “Simulations of power ramps with alcyone including fission products chemistry and oxygen thermo-diffusion”, *Pellet-Clad Interaction (PCI) in Water-Cooled Reactors*, <https://www.oecdnea.org/nsd/docs/2018/csni-r2018-9.pdf>, 2016.
- [14] B. MICHEL, “A new numerical methodology for simulation of unstable crack growth in time independent brittle materials”, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 188, pp. 126-150, February 2018.
- [15] T. HELFER, “Introducing the open-source MFRONT code generator : Application to mechanical behaviors and material knowledge management within the PLÉIADES fuel element modelling platform”, *Computers & Mathematics with Applications*, Vol. 70, n° 5, pp. 994-1023, 2015.
- [16] J.-C. LE PALLEC, K. MER-NKONGA and N. CROUZET, “Neutronics/Fuel Thermomechanics coupling in the framework of a REA (Rod Ejection Accident) Transient Scenario Calculation”, PHYSOR 2016, Conference : *Unifying Theory and Experiments in the 21<sup>st</sup> Century*, Sun Valley, Idaho, USA, 2016.
- [17] D. PARAT et J.-C. BRACHET, « Le combustible, lors d’un accident de perte de réfrigérant primaire (APRP) », monographie *Les combustibles nucléaires*, p. 59-61, 2008.
- [18] T. FORGERON, J.-C. BRACHET *et al.*, “Experiment and modelling of advanced fuel rod behaviour under LOCA conditions :  $\alpha \leftrightarrow \beta$  phase transformation kinetics and EDGAR methodology”, *12<sup>th</sup> Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry*, Toronto, 1998, ASTM STP 1354, p. 256-278, 2000.
- [19] R. BORROSSI, *Transformations de phases et comportement mécanique à haute température d’un alliage de zirconium (M5<sub>Framatome</sub>) : effets de l’historique de température*, thèse de doctorat de l’université PSL, 2021.
- [20] <https://tfel.sourceforge.net>.
- [21] B. MICHEL, I. RAMIÈRE, I. VIALLARD, C. INTROINI, M. LAINET, N. CHAUVIN, V. MARELLE, A. BOULORE, T. HELFER, R. MASSON, J. SERCOMBE, J.-C. DUMAS, L. NOIROT and S. BERNAUD, “Chapter 9 – Two fuel performance codes of the PLÉIADES platform : ALCYONE and GERMINAL”, *Woodhead Publishing Series in Energy, Nuclear Power Plant Design and Analysis Codes*, Woodhead Publishing, pp. 207-233, 2021.
- [22] B. BIARD, C. COLIN, S. BERNARD, V. MARTY, G. VOLLE *et al.*, “The VINON-LOCA test facility : exploring the LOCA phenomenology through an out-of-pile thermal sequence on irradiated pressurized fuel rod”, *EPJ Web of Conferences*, 253, pp. 06002, [ff10.1051/epjconf/202125306002ff](https://doi.org/10.1051/epjconf/202125306002ff), 2021.
- [23] <https://jhreactor.com/lorelei>
- [24] L. PORTIER, T. BREDEL *et al.*, “Influence of long service exposures on the thermal-mechanical behavior of Zy4 and M5<sup>®</sup> alloys in LOCA conditions”, 14<sup>th</sup> Int. Symp. on Zr in the Nucl. Ind., Stockholm, 2004, *Journal of ASTM Int.*, February 2005, Vol. 2, n° 2, ID JAI12468.
- [25] M. LE SAUX *et al.*, “Influence of Steam Pressure on the High Temperature Oxidation and Post-Cooling Mechanical Properties of Zircaloy-4 and M5 Cladding (LOCA Conditions)”, *Zirconium in the Nuclear Industry : 17<sup>th</sup> International Symposium*, ASTM-STP 1543, 2014.
- [26] <http://www-cast3m.cea.fr>
- [27] A. CABRERA SALCEDO, *Modélisation du comportement mécanique « post-trempe », après oxydation à haute température, des gaines de combustible des réacteurs à eau pressurisée*, thèse de doctorat, École nationale supérieure des mines de Paris, 2012.
- [28] J.-C. BRACHET, D. HAMON *et al.*, “Study of secondary hydriding at high temperature in zirconium based nuclear fuel cladding tubes by coupling information from neutron radiography/tomography, electron probe micro analysis, micro elastic recoil detection analysis and laser induced breakdown spectroscopy microprobe”, *J. Nucl. Mater.*, 488, pp. 267-286, 2017.
- [29] A. STERN, J.-C. BRACHET, V. MAILLOT, D. HAMON, F. BARCELO, S. POISSONNET, A. PINEAU, J.-P. MARDON and A. LESBROS, “Investigations of the microstructure and mechanical properties of prior-Beta-Zr structure as function of the oxygen content in two zirconium alloys”, ASTM 15<sup>th</sup> International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry, June 24-28, 2007, Sunriver, Oregon, USA, *Journal of ASTM International*, Vol. 5, n° 4, Paper ID JAI101119, [www.astm.org](http://www.astm.org), 2008.
- [30] I. TURQUE, R. CHOSSON, M. LE SAUX, J.-C. BRACHET, V. VANDENBERGHE, J. CRÉPIN and A.-F. GOURGUES-LORENZON, “Mechanical behavior at high temperature of highly oxygen- or hydrogen-enriched  $\alpha$  and (prior-)  $\beta$  phases of zirconium alloys”, to be published in *Zirconium in the Nuclear Industry : 18<sup>th</sup> International Symposium*, STP 1597, [www.astm.org](http://www.astm.org).
- [31] T. LE HONG, J.-C. BRACHET, J. CRÉPIN and M. LE SAUX, “Combined effects of temperature and of high hydrogen and oxygen contents on the mechanical behavior of a zirconium alloy upon cooling from the  $\beta$ Zr phase temperature range”, *Journal of Nuclear Materials*, 554, 153069, 2021.
- [32] J.-C. BRACHET, L. PORTIER, T. FORGERON, J. HIVROZ, D. HAMON, T. GUILBERT, T. BREDEL, P. YVON, J.-P. MARDON and P. JACQUES, “Influence of hydrogen content on the  $\alpha \leftrightarrow \beta$  phase transformation temperatures and on the thermal-mechanical behavior of Zy-4, M4 (ZrSnFeV) and M5TM (ZrNbO) alloys during the first phase of LOCA transient”, *Zirconium in the Nuclear Industry : 13th. Int. Symposium*, June 10-14, 2001, Annecy, France, ASTM STP 1423, G. D. MOAN and P. RUDLING, Eds., *American Society for Testing and Materials*, West Conshohocken, PA, 673-701, 2002.

[33] J.-C. BRACHET, V. MAILLOT, L. PORTIER, D. GILBON, A. LESBROS, N. WAECKEL, J.-P. MARDON, “Hydrogen Content, Pre Oxidation and Cooling Scenario Influences on Post-Quench Mechanical Properties of Zy-4 and M5 Alloys in LOCA Conditions – Relationship with the Post-Quench Microstructure”, ASTM 15<sup>th</sup> International Symposium on Zirconium in the Nuclear Industry, June 24-28, 2007, Sunriver, Oregon, USA, *Journal of ASTM International*, Vol. 5, n° 4, Paper ID JAI101116, [www.astm.org](http://www.astm.org), 2008.

[34] J.-C. BRACHET, I. IDARRAGA-TRUJILLO, M. LE FLEM, M. LE SAUX, V. VANDENBERGHE, S. URVOY, E. ROUESNE, T. GUILBERT, C. TOFFOLON-MASCLET, M. TUPIN, C. PHALIPPOU, F. LOMELLO, F. SCHUSTER, A. BILLARD, G. VELISA, C. DUCROS and F. SANCHETTE, “Early studies on Cr-Coated Zircaloy-4 as enhanced accident tolerant nuclear fuel claddings for light water reactors”, *Journal of Nuclear Materials*, 517, pp. 268-285, 2019.

[35] J.-C. BRACHET, E. ROUESNE, J. RIBIS, T. GUILBERT, S. URVOY, G. NONY, C. TOFFOLON-MASCLET, M. LE SAUX, N. CHAABANE, H. PALANCHER, A. DAVID, J. BISCHOFF, J. AUGEREAU and E. POUILLIER, “High temperature steam oxidation of chromium-coated zirconium-based alloys : Kinetics and process”, *Corrosion Science*, 167, 108537, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108537>, 2020.



## Fatigue des zones de mélange

Ce chapitre aborde la problématique de la fatigue dans les zones de mélange en abordant le cas des circuits tels que le circuit primaire où se mélangent des fluides chauds et froids lors du fonctionnement du réacteur. À partir d'un incident déclencheur, des actions de R&D ont été mises en œuvre afin de mieux appréhender le phénomène de fatigue thermique dans les zones de mélange. Un focus sur deux aspects permettra d'illustrer la complexité des phénomènes à prendre en compte et notamment l'aspect chargement multi-dimensionnel ainsi que la présence d'un environnement agressif en contact avec les composants.

### Un événement déclencheur : l'incident sur le circuit RRA de CIVAUX

Les conditions de fonctionnement des installations industrielles soumettent les matériaux de structure à une grande variété de sollicitations d'origine mécanique et thermique. Ces sollicitations peuvent être induites par des gradients thermiques importants variant au cours du temps dans une section du composant. Ces chargements ont bien souvent un caractère cyclique. De nombreux composants de circuits de réacteurs nucléaires (en France, mais également dans le monde) sont soumis de façon soit potentielle, soit avérée, à de la fatigue thermique pouvant impacter leur durée de vie. Ainsi, un endommagement de fatigue thermique a d'abord été observé dans des tuyauteries de la filière des réacteurs à neutrons rapides (RNR), puis dans certains composants des réacteurs à eau pressurisée (REP), comme les boucles RRA (circuit de refroidissement à l'arrêt du réacteur) et les circuits RIS (circuit d'injection de sécurité). Certains de ces endommagements ont été à l'origine d'incidents (fuites).

Ainsi, la survenue d'une fuite sur le circuit RRA d'une unité de CIVAUX en 1998, due à la présence d'une fissure traversante localisée à l'extrados d'un coude directement en sortie de té de mélange a entraîné la mise à l'arrêt de l'unité de production. Dans ce circuit, la circulation des fluides à température différente ( $\Delta T_{\max}$  de 160 °C), sous pression (36 bar) et avec un débit important (550 m<sup>3</sup>/h) se fait sous un régime turbulent qui va amener à déclencher des mécanismes physiques pouvant dégrader la structure en la soumettant à de fortes et fréquentes variations de température [1].

Il convient de noter que ce RRA fonctionnait alors dans une configuration très particulière avec notamment un temps cumulé d'utilisation sous forte variation de température bien plus important qu'initialement dimensionné.

À la suite de cet incident, l'analyse qui a suivi a fait rapidement apparaître que la fissuration était liée à la fatigue thermique, seul chargement imposé à la ligne de tuyauterie. Ce phénomène de fatigue thermique était déjà connu, mais considéré comme secondaire pour les réacteurs de type REP. Un endommagement aussi important constituait donc une véritable surprise pour cette ligne de tuyauterie, soulevant ainsi de nouvelles questions de fond :

- Pourquoi une fissuration traversante ? Les exemples du même type pour la fatigue thermique sont très rares et principalement liés aux réacteurs à neutrons rapides fonctionnant à des températures plus hautes et constitués de tuyauteries minces.
- Comment la fissuration peut être aussi rapide ? La fuite a été détectée après 1 500 heures de fonctionnement seulement !

Un premier élément de justification résidait dans l'état de surface peu soigné (contraintes résiduelles d'usinage et rugosité) et dans la présence d'un cordon de soudure non arasé dans la zone incriminée. Rapidement, il a été identifié que le problème était beaucoup plus complexe. En effet, si l'état de surface est un paramètre qui peut influencer l'amorçage en fatigue, il n'intervient en aucun cas dans la phase de propagation d'une fissure à travers la paroi d'un composant. De plus, les expertises réalisées sur d'autres circuits RRA déposés après cet incident ont montré deux types d'endommagement : une fissuration profonde, souvent au niveau des cordons de soudure (singularité géométrique et métallurgique) et une fissuration nettement moins profonde au niveau des parties courantes (zones exemptes de singularités), qui apparaît sous la forme d'une fissuration multiple [1]. À nouveau, cette différence de comportement entre lignes de tuyauterie est mal expliquée.

Dans le cadre de la résolution de ce problème, le CEA a été sollicité pour apporter son soutien aux industriels. De par sa nature pluridisciplinaire, un vaste projet associant thermohy-

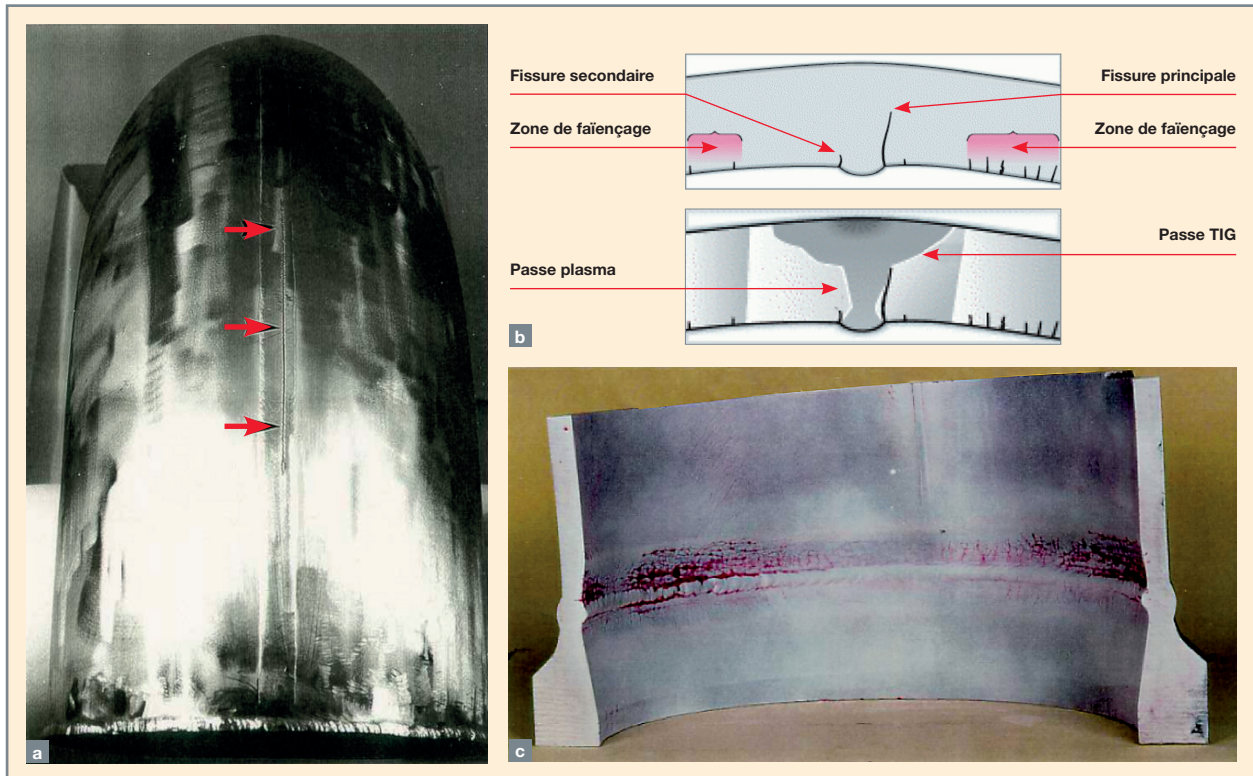


Fig. 97. Tronçon du RRA n° 1 endommagé du réacteur CIVAUX 1. (a) Indication à l'extrados du coude de la fissure débouchante longitudinale. (b) Coupe dans l'épaisseur révélant la présence d'une fissure principale en pied de cordon de soudure et réseaux de fissures dans les zones courantes, c) ressuage en paroi interne au niveau de la jonction té-coude (présence d'une fissure circumférentielle sur 280° et ayant propagé jusqu'à 80 % de l'épaisseur.

drauliciens, mécaniciens et métallurgistes a été mis en place. Cette approche multi-disciplinaire s'est ainsi avérée indispensable pour correctement appréhender la fatigue thermique à grand nombre de cycles :

- **La thermohydraulique**, qui est à l'origine de la sollicitation ;
- **la thermique**, qui permet de caractériser l'échange d'énergie entre la paroi (ce que voit la structure) et le fluide en mouvement, ainsi que l'évolution de la température dans la structure ;
- **la mécanique des structures**, qui permet de déterminer la réponse de la structure en tenant compte des particularités de la géométrie et des propriétés matériaux ;
- **la mécanique des matériaux**, qui permet de caractériser la réponse du matériau à des sollicitations thermomécaniques à l'échelle de l'élément de volume.

Cette approche s'appuie sur deux piliers :

- Des analyses théoriques et numériques qui peuvent apporter des éléments de réponse à cette problématique ;

- des analyses expérimentales s'appuyant sur la mise en place d'essais de fatigue afin de reproduire l'apparition et la propagation de fissures en laboratoire.

Il est opportun de rappeler que l'initiation des fissures et le faïençage thermique (dommage de surface) sont des phénomènes connus qui sont liés aux fluctuations de températures. Ceux-ci apparaissent lorsque la différence de température entre les fluides chaud et froid dans le té de mélange est conséquente (jusqu'à 160 °C dans le cas de CIVAUX), le régime d'écoulement est turbulent et met du temps à s'établir. Dans ce type de configuration, on observe des dommages en « peau d'éléphant ». Ce type de dommage est donc bien compris et expliqué.

Concernant l'étude de la propagation des fissures, il était admis, avant l'incident de CIVAUX, que le faïençage thermique ne conduirait qu'à des fissurations de faible profondeur (la propagation s'arrête après 1 à 2 mm). Les observations sur CIVAUX ont amené à fonder notre réflexion sur la détermination des chargements thermiques endommageants au sens de la structure, c'est-à-dire pouvant conduire à des propagations profondes.

## Mise en évidence de la fatigue thermique : les essais de fatigue thermique

Dans le cas particulier d'une zone de mélange entre fluides froid et chaud, la grande difficulté est liée à la complexité de la sollicitation : le chargement est quasi aléatoire, à grand nombre de cycles, à déformation imposée, biaxial, en présence de gradients importants, éventuellement en présence d'une contrainte moyenne, d'un effet de l'environnement... Tous ces facteurs font que la fatigue thermique est très loin de l'essai uniaxial de référence et qu'il est très difficile de réaliser des essais représentatifs en laboratoire. En pratique, seule une installation comme FATHER [2] permet d'approcher la configuration réelle, mais à des coûts très importants. Par conséquent, la réalisation d'essais simples et représentatifs étant impossible, la démarche proposée consiste à diviser le problème et aborder les différents paramètres séparément à l'aide d'essais sur maquettes analytiques. Par exemple, une des spécificités du chargement thermique est d'imposer un chargement équi-biaxial en surface avec un gradient dans l'épaisseur. L'influence du milieu en contact avec l'éprouvette apporte aussi son lot de questions. Cependant, la problématique de la fatigue thermique n'est pas inhérente à l'industrie nucléaire, on retrouve cette problématique dans diverses industries (ferroviaire [3], automobile [4] ou aéronautique [5]).

Le principal enseignement que l'on peut tirer des différentes approches expérimentales mises en œuvre dans ces domaines est qu'il est nécessaire de mettre en place des essais intermédiaires qui assurent le passage d'un essai de fatigue uniaxiale de laboratoire à une éprouvette dans des conditions réelles de sollicitations et de géométrie. Ces essais intermédiaires doivent répondre à des contraintes qui les rendent fortement dépendants du domaine d'application. Ainsi, dans le domaine d'études sur les composants de centrales REP, les amplitudes de températures (niveaux des amplitudes, historiques, fréquence de variations), les matériaux employés (acier inoxydables austénitiques 304L et 316), le chargement mécanique (pression importante) et les exigences vis-à-vis des démonstrations de sûreté imposent le développement d'essais de fatigue thermique spécifiques.

Afin d'analyser les spécificités du chargement thermique (déformation biaxiale imposée), on réalise très souvent des essais de chocs thermiques cycliques, plus ou moins rapides, car c'est le seul moyen d'atteindre les amplitudes de température  $\Delta T$  recherchées. L'effet aggravant de la présence d'un chargement thermique est mis clairement en évidence par des expériences de fatigue thermique menées soit en environnement eau (FAT3D, SPLASH), soit en environnement sodium (FAENA). Une des difficultés de l'interprétation de ces essais de fatigue vient de la nécessité d'es-

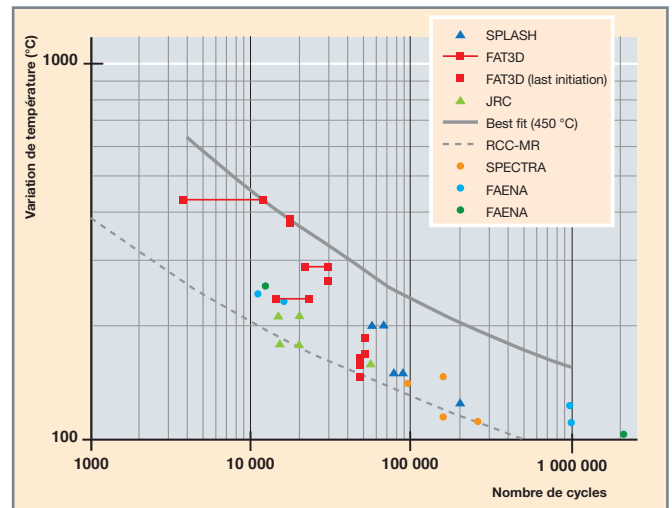


Fig.98. Points de fatigue issus des expériences de fatigue thermique en fonction de la variation de température mesurée.

timer correctement les déformations à partir des mesures de températures [6] [7].

Une méthode de comparaison des résultats expérimentaux en minimisant les interprétations peut être effectuée. Celle-ci consiste à prendre comme référence les variations de température. Ce type d'interprétation permet de qualifier les différents essais entre eux pour montrer s'il existe un effet aggravant, à savoir une diminution de la durée de vie comparativement à la durée de vie obtenue sur des éprouvettes de fatigue uniaxiale. Sur la figure 98, toutes les données expérimentales disponibles sont représentées. Ainsi, les variations expérimentales de température qui ont conduit à une fissuration observable sont rassemblées pour chacune des cinq expériences (SPLASH, FAT3D et FAENA). La courbe de fatigue du matériau considéré (acier inoxydable austénitique), issue de nombreux essais uniaxiaux à 450 °C, est aussi représentée en fonction de la variation de température (courbe dite *best fit* sur le graphique suivant). Celle-ci est à prendre avec précaution et doit être considérée principalement comme un repère.

Une remarque importante concernant les résultats exposés porte sur le regroupement des points de fatigue pour les expériences en environnement sodium et en environnement eau. En effet, les points issus des expériences FAENA peuvent se regrouper avec les points issus des expériences SPLASH, FAT3D. Il apparaît possible de définir une courbe qui représenterait les points obtenus.

**Moyens d'essais de fatigue sous chargement équi-biaxial purement mécanique avec et sans conditions REP (P = 300 bars et T = 300 °C) : FABIME2e**

Afin d'étudier la différence entre la fatigue uniaxiale isotherme et thermique, un bilan a été présenté avec de nombreux essais de fatigue thermique. Parmi ceux-ci, des essais ont été mis en œuvre au CEA tels que SPLASH ou FAT3D [6] [7], et les résultats expérimentaux obtenus ont clairement montré que, pour un niveau de déformation donné ( $\Delta\varepsilon$ ), le nombre de cycles à l'amorçage est significativement plus faible en fatigue thermique (équi-biaxial) qu'en fatigue isotherme uniaxiale.

Une telle différence ne provient pas d'un effet thermique, comme le montre une comparaison entre les données uniaxiales, provenant soit d'essais de fatigue thermomécaniques, soit d'essais de fatigue isotherme olygocyclique ou à petit nombre de cycles (chargements importants). Un effet aggravant du chargement multi-axial sur la durée de vie en fatigue est observé dans de nombreux cas [8] [9] [10] [11]. Une question se pose : la biaxialité des contraintes en peau interne rend-elle plus nocive la sollicitation thermique en comparaison à une sollicitation uniaxiale. L'approche conventionnelle en  $\Delta\varepsilon_{eq}$  calée sur éprouvettes de traction ne permet alors pas de prédire correctement la résistance du matériau.

Les courbes de fatigue utilisées pour la conception sont établies à partir d'essais uniaxiaux et des coefficients de transfert [12]. Devant le faible nombre de résultats expérimentaux de fatigue équi-biaxiale oligocyclique, ainsi que de fatigue équi-biaxiale à grand nombre de cycles disponibles [13] [14], il est difficile de pleinement valider et consolider les critères de fatigue et les courbes de fatigue associées dans ces conditions de chargement [15] [16].

Afin d'obtenir des données expérimentales dans des conditions plus représentatives de celles rencontrées dans les composants, le développement de dispositifs expérimentaux dédiés sur la plateforme expérimentale du SEMT RESEDA a permis de réaliser des campagnes d'essais de fatigue équi-biaxiale sur un acier inoxydable austénitique. Des moyens expérimentaux dédiés permettant d'imposer un chargement mécanique équi-biaxial ont été mis en place : fatigue biaxiale mécanique (FABIME) et son évolution vers la prise en compte de l'effet d'environnement REP.

Ceci est issu d'une idée originale d'essai de fatigue en flexion sphérique sur des disques développé par Ives *et al.* [17], il y a 50 ans, puis par Shewchuk *et al.* [18]. Le principe de ces essais était de solliciter une éprouvette en forme de disque à un différentiel de pression entre chaque face, la pression étant appliquée *via* de l'air sous pression. L'objectif de ce moyen d'essai est de pouvoir dissocier les effets aggravants dus à la multi-axialité et ceux dus à la présence de contrainte moyenne ou d'un chargement résiduel. Pour ce faire, l'éprouvette doit subir un chargement alterné, c'est-à-dire en compression puis en tension, afin de pouvoir comparer les données de fatigue obtenues en conditions équi-biaxées avec celles obtenues en fatigue uniaxiale. Le principe de l'essai FABIME2e consiste à appliquer, sur une éprouvette circulaire, une pression sur chaque face alternativement. Ce chargement engendrera une flexion « sphérique » avec un rapport de charge variable allant d'une valeur de - 1 (flexion alternée) à 0 (flexion répétée). On définit le rapport de charge comme étant le ratio entre le chargement minimum par rapport au chargement maximum. Sur la figure 99, le principe du chargement équi-biaxial comparativement au chargement uniaxial imposé au niveau de l'éprouvette FABIME2e est présenté.

L'éprouvette FABIME2e est en acier inoxydable austénitique (316L ou 304L-CLI) avec une géométrie optimisée ; l'épaisseur est de 8 mm au niveau de la partie de serrage avec un raffinement au centre (épaisseur centrale de 2 mm), le diamètre total est égal 170 mm (cf. fig. 100).

L'environnement peut également avoir une influence sur le comportement à la fatigue. D'une manière générale, l'eau circulant dans le circuit primaire des réacteurs à eau légère LWR sert à la fois de modérateur et de caloporteur. La température du circuit primaire des REP varie entre 286 °C et 330 °C avec

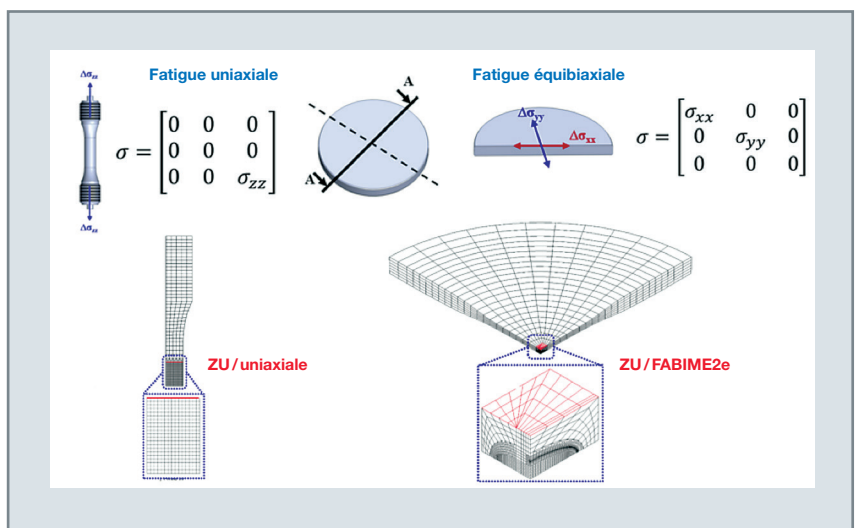


Fig. 99. Principe et schéma technique des nouveaux moyens d'essai de fatigue sphérique : FABIME2e.



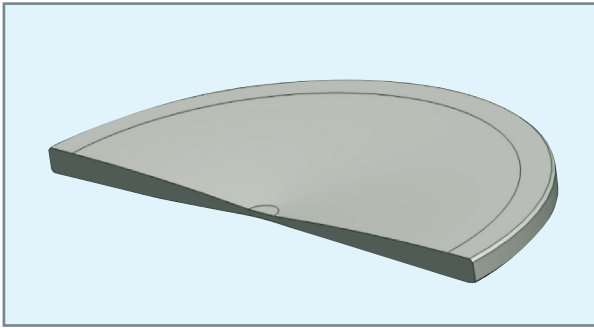


Fig. 100. Vue en coupe d'une éprouvette FABIME2.

une pression d'environ 150 bars. La température maximale des REB est de 288 °C avec une pression de 70 à 80 bars. L'eau des réacteurs à eau légère est déminéralisée avec une faible teneur en oxygène dissout et un pH optimum légèrement alcalin. Dans le cas des réacteurs REP, de l'acide borique est ajouté, car il possède une section de capture des neutrons importante. De la lithine est également ajoutée pour conserver un milieu légèrement alcalin. De l'hydrogène est dissous pour éliminer les espèces oxydantes produites par la radiolyse de l'eau. Dans le cas des réacteurs REB, l'acide borique n'est pas utilisé et la teneur en oxygène dissout est plus importante. Le document NUREG/CR-6909 [19] rassemble des données expérimentales obtenues par des laboratoires de recherche américains ou japonais.

Notons que l'impact d'un milieu aqueux sur la durée de vie en fatigue avait fait l'objet de nombreuses présentations à la troisième Conférence internationale sur la fatigue des composants nucléaires qui s'est tenue à Séville en 2004 [21] [22] [23] [24] [25]. À l'époque, la principale préoccupation portait sur la compréhension des phénomènes de fatigue thermique des zones de mélange en général, de l'incident du circuit RRA de CIVAUX 1 en particulier, ainsi que sur la mise en place de mesures correctives pour pallier ce type d'endommagement.

Toutefois, récemment, l'intérêt pour l'étude des effets aggravants de la fatigue sous environnement corrosif (REP) a été relancé avec la volonté de prolonger la durée de vie des centrales au-delà de leur durée de vie initiale de 40 ans. À titre d'exemple de l'effet aggravant de l'environnement, des résultats expérimentaux tirés des travaux de L. De Baglion [20] donnent des réductions de durée de vie de l'ordre de **3 à 5** (en fonction de la vitesse de déformation) pour deux niveaux de déformations.

Sans entrer dans le détail, on peut évoquer les principaux facteurs identifiés ayant une influence sur la tenue en fatigue, comme :

- Le taux d'oxygène dissous ;

- la vitesse de déformation, la réduction de la durée de vie est très importante lorsque la vitesse de déformation diminue ;
- la température à partir de 150 °C ;
- l'amplitude de déformation ;
- l'état de surface.

C'est dans ce cadre que des actions ont été entreprises (et sont toujours en cours) dans l'Institut Tripartite CEA-EDF-Framatome portant sur la prédiction de l'amorçage par fatigue et dont les objectifs principaux sont, d'une part, d'alimenter la connaissance sur les mécanismes de dégradation *via* des approches de plus en plus fines et, d'autre part, de produire des méthodes d'ingénieurs pour valider ou améliorer les règles de conception en intégrant si nécessaire les facteurs aggravants. Un programme global a été conjointement établi entre EDF, Framatome et le CEA pour la réalisation des essais de fatigue sous environnement. Cela permet d'aborder beaucoup plus largement cette problématique. Ainsi, Framatome réalise principalement des essais uniaxiaux de fatigue sur éprouvettes cylindriques pleines sous autoclave, EDF réalise des essais avec des éprouvettes cylindriques creuses avec circulation de l'environnement à l'intérieur. Le CEA est quant à lui positionné sur la réalisation d'essais sur semi-structures sous environnement avec le dispositif FABIME2e.

Les résultats des essais de fatigue équi-biaxiale sous environnement sur un acier austénitique inoxydable 304CLI obtenus ont aussi été reversés dans les projets européens INCEFA+ (2015-2020) puis INCEFA-Scale (2020-2025).

L'objectif de ces moyens d'essai est de dissocier les effets aggravants dus à la multi-axialité de la présence de contrainte moyenne et de l'effet de l'environnement REP (milieu primaire hydrogéné à 150 bars et 300 °C). Pour ce faire, l'éprouvette doit subir un chargement alterné avec un rapport de charge R négatif afin de pouvoir comparer les données de fatigue obtenues :

- En conditions équi-biaxées avec environnement ;
- en fatigue uniaxiale en environnement.

Le principe de l'essai FABIME2 est repris ici. L'éprouvette circulaire peut être ramenée à une membrane séparant deux chambres qui seront alternativement mises en surpression (pression initiale de 150 bars jusqu'à 250 bars).

Des capteurs de pression, de température et de mesures de déplacement du point central de l'éprouvette (flèche *via* des capteurs LVDT) retournent les grandeurs caractéristiques qui permettent un pilotage des essais de fatigue.

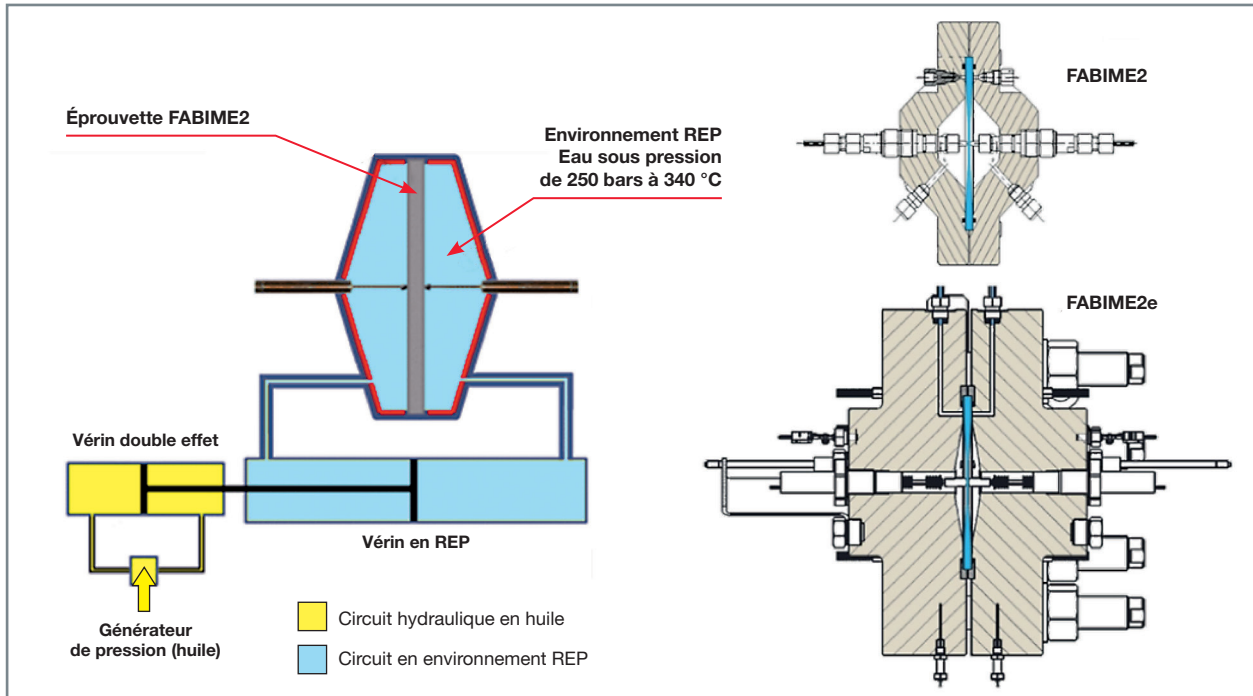


Fig. 101. Schéma de principe des moyens d'essai de fatigue en environnement et comparaison des deux cellules d'essai de fatigue.

Les conditions expérimentales maximales sont une pression de 350 bars et une température de 400 °C.

Les principaux composants de ce nouveau dispositif (voir fig. 102) sont :

- Une cellule d'essai composée de deux demi-coquilles englobant l'éprouvette ;
- un système de fixation efficace des deux demi-coquilles ;
- un système d'étanchéité compatible avec les conditions du milieu REP ;
- un circuit fermé contenant le milieu REP ;
- un vérin à double effet qui permet d'appliquer les sollicitations mécaniques à l'éprouvette ;
- un système de chauffe précis et reproductible ;
- un système permettant de mesurer et d'ajuster (si besoin) la teneur en hydrogène dissous ;
- une instrumentation complète pour les températures, déplacements (flèche, vérin) et pression.

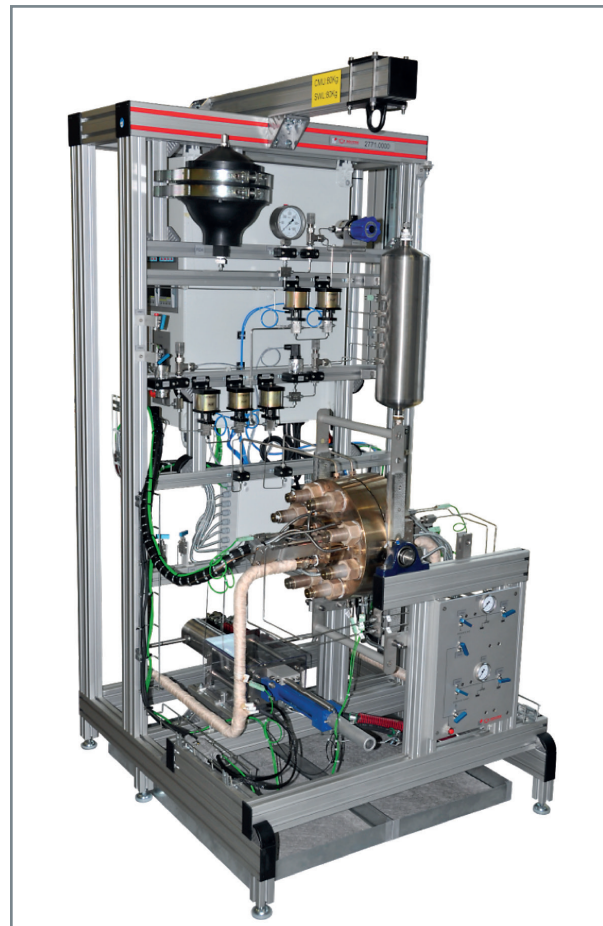


Fig. 102. Vue du nouveau dispositif d'essai de flexion sphérique sous environnement FABIME2e.

## Les essais de fatigue équi-biaxiale avec et sans conditions REP (P = 300 bars et T = 300 °C)

Un grand nombre d'essais de fatigue ont été réalisés sur deux types d'aciers austénitiques inoxydables (316L et 304CL) composant un grand nombre de tuyauterie du circuit primaire. La première configuration d'essais (température ambiante et pression entre 30 et 350 bars) avait pour objectif de valider le protocole expérimental, ainsi que d'évaluer la précision de la méthode de détection d'amorçage d'une fissure de 5 mm. La seconde configuration s'est axée sur la réalisation d'essais de fatigue à température ambiante et avec une pression initiale de 300 bars. Finalement, la troisième série d'essais a été conduite avec des conditions REP, à une température de 300 °C et une pression initiale de 300 bars.

Pour chaque essai, les évolutions temporelles des grandeurs suivantes (flèche au centre de l'éprouvette, pressions dans la cellule d'essai, pression dans le vérin hydraulique, températures) sont acquises pour des analyses post-essai.

À partir de ces grandeurs, la différence de pression entre les deux demi-chambres de la cellule d'essai est déterminée afin d'estimer l'amorçage d'une fissure *via* la modification de la complaisance de l'éprouvette :

$$\Delta P_1 = P_{1MAX} - P_{1min} \text{ et } \Delta P_2 = P_{2MAX} - P_{2min}$$

Sur la figure 103, les évolutions cycliques du différentiel de pression pour quatre essais sont représentées. Les essais réalisés à température ambiante (30 °C, 743B-C pour une flèche de 2,8 mm et 743B-L pour une flèche de 2,8 mm) sont comparés aux essais réalisés à une température de 300 °C

(743-B pour une flèche de 2,8 mm et 743-B-A pour une flèche de 2,2 mm). Ainsi, on retrouve que, pour un même niveau de flèche imposée, le niveau de pression est plus important à température ambiante. Cela peut s'expliquer par la différence du comportement élasto-plastique entre 30 °C et 300 °C. La durée de vie est grandement réduite à même niveau de chargement en flèche imposée entre les deux températures (30 °C et 300 °C).

Les réseaux de fissures obtenus avec les essais de fatigue équi-biaxiale sous environnement REP et à température ambiante (30 °C) sont représentés sur les figures suivantes (cf. fig. 104 et fig. 105). La différence de morphologie du réseau de fissures est clairement illustrée. On retrouve bien les observations effectuées dans la littérature [19] [20]. En fait, la réduction de la durée de vie en milieu eau est, pour la part la plus importante, imputable à un effet de l'environnement sur la croissance des fissures « microstructurellement courtes »<sup>7</sup>, soit de taille inférieure ou égale à 150-250 µm dans le cas des aciers inoxydables austénitiques. En milieu REP, comme sous air, et quelle que soit la vitesse de déformation, les sites d'amorçage sont de nature identique (bandes de glissement persistantes, joints de macles ou joints de grains) et l'amorçage transgranulaire est privilégié. Il en est de même pour la phase de propagation qui est toujours du type Stade II transgranulaire [20].

En fait, par rapport au milieu air, le milieu eau primaire REP agit essentiellement sur la cinétique et non sur la nature de l'endommagement lui-même.

À l'aide du modèle numérique d'interprétation implémenté dans le logiciel de calculs par éléments finis Cast3M, le tenseur des déformations est déterminé à chaque instant du cycle dans la zone centrale de l'éprouvette. À partir de cette

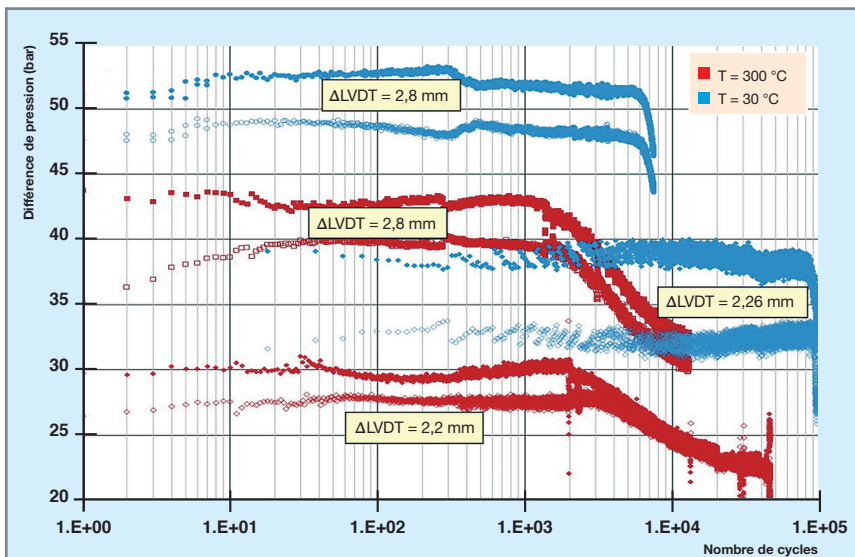


Fig. 103. Évolution cyclique des différentiels de pression dans chaque chambre de la cellule d'essai pour quatre essais (essais à température ambiante 30 °C [points bleus], essais à température de 300 °C [points rouges]).

7. Les fissures « microstructurellement courtes » (MSC) ont une taille inférieure à celle du grain ou égale à quelques grains. Leur vitesse est donc extrêmement tributaire des barrières microstructurales et se propagent par cisaillement, soit le long des plans de glissement orientés à 45° de l'axe de chargement.



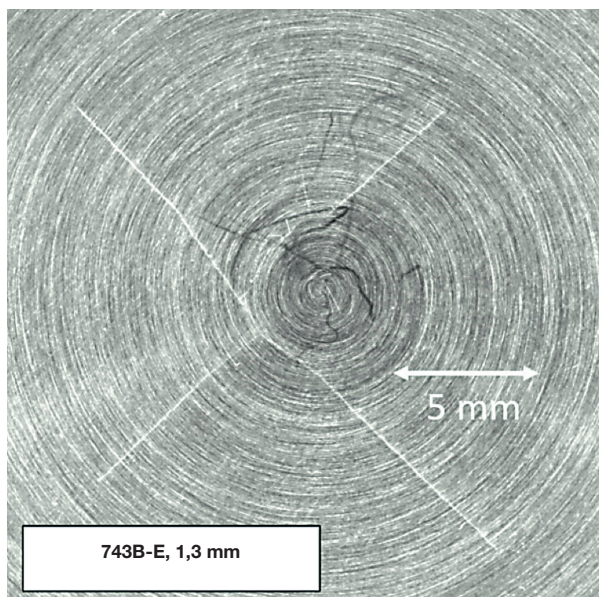


Fig. 104. Réseau de fissures observé après un test de fatigue équi-biaxiale sous une pression de 300 bars pour une température de 30 °C.

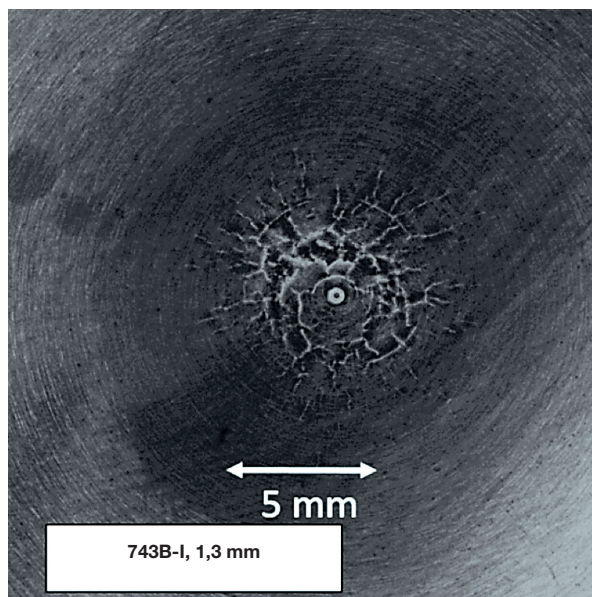


Fig. 105. Réseau de fissures observé après un test de fatigue équi-biaxiale sous conditions REP (pression de 300 bars pour une température de 300 °C).

interprétation numérique, les données expérimentales obtenues avec le dispositif FABIME2e sont comparées avec celles obtenues avec les essais uniaxiaux. Les variations de la déformation équivalente de von Mises déterminées ainsi obtenues sont représentées sur la figure 106.

En réponse à la question « le chargement équi-biaxial a-t-il un effet sur la durée de vie ? », il est montré, dans le cas d'un chargement proportionnel et en phase, et en l'absence de chargement moyen, que le chargement équi-biaxial est sans effet sur la durée de vie.

Cependant, les essais de fatigue équi-biaxiale sous conditions REP illustrent la réduction significative du nombre de cycles à l'amorçage, de manière similaire aux essais uniaxiaux de fatigue sous environnement [19] [20]. L'effet aggravant de l'environnement est clairement montré et illustré.

Les points expérimentaux obtenus sur deux types d'acier austénitique inoxydable (316L et 304CLI) avec le dispositif d'essai de fatigue équi-biaxiale sous environnement FABIME2e sont illustrés sur la figure 107. Pour un même

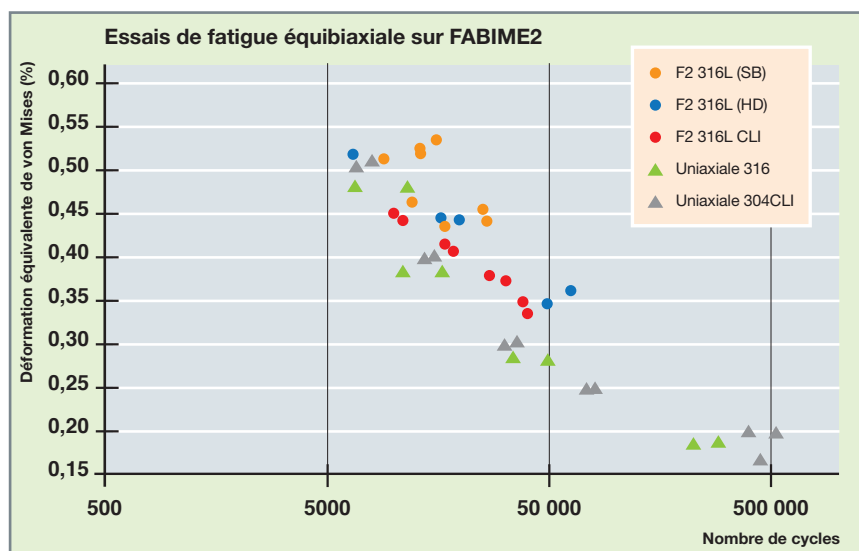


Fig. 106. Durée de vie expérimentale de deux aciers austénitiques inoxydables (316L et 304CLI) obtenue avec les dispositifs de fatigue équi-biaxiale (FABIME2e), comparée aux données de fatigue uniaxiale.



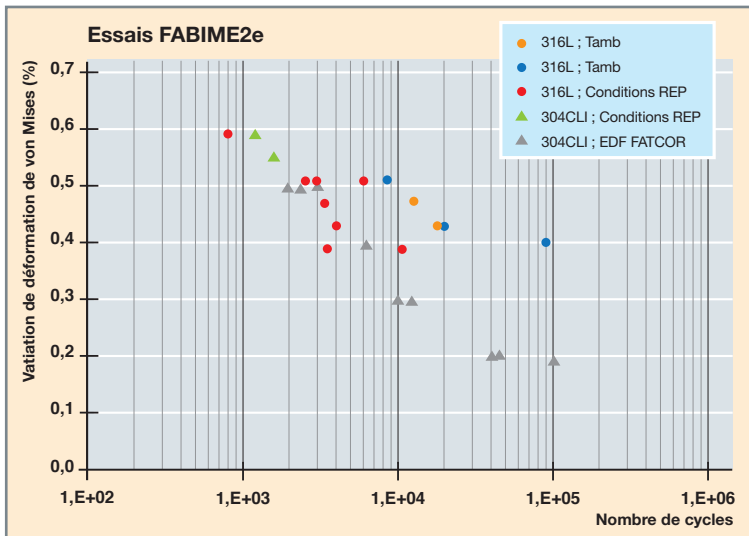


Fig. 107. Durée de vie expérimentale de deux aciers austénitiques inoxydables (316L et 304CL) obtenue avec les dispositifs de fatigue équi-biaxiale (FABIME2e), comparée aux données de fatigue uniaxiale sous environnement obtenues par EDF.

niveau de flèche imposée, une réduction du nombre de cycles à l'amorçage de l'ordre d'un facteur 3 à 5 (différence entre les points bleus et rouges – conditions REP) est observée. Par exemple, pour les essais avec une variation de flèche imposée de 2,8 mm, le nombre de cycles pour amorcer une fissure de 5 mm en surface sans effet d'environnement est de 8 500 cycles, alors qu'il est entre 2 500 et 6 000 cycles avec des conditions REP. Ce même type de résultat est aussi retrouvé pour des essais avec une variation de flèche de 2,4 mm (de 18 500 cycles à 4 000 cycles en conditions REP).

## Conclusion

L'extension de la durée de fonctionnement des centrales électronucléaires du parc français existantes est un enjeu industriel de grande importance pour EDF, Framatome et le CEA. En regard des exigences de l'autorité de sûreté nucléaire, un inventaire complet des divers effets en lien avec la sûreté de l'exploitation à long terme a ainsi été effectué. Dans le cadre de la fatigue thermique, une méthodologie, s'appuyant sur l'expérimentation et la simulation, a été mise en place pour évaluer l'influence de l'équibiaxialité du chargement et des conditions d'environnement et ainsi gagner en représentativité par rapport aux pratiques usuelles (fatigue sous chargement uniaxial). Au-delà de la hiérarchisation des effets observés, discutée dans ce chapitre, les résultats devront permettre d'actualiser les règles de codification concernant les courbes de fatigue portant sur des aciers représentatifs du parc nucléaire français.

**Cédric GOURDIN,**

Département de Modélisation des Systèmes et Structures

**Grégory PEREZ et Ludovic VINCENT,**

Département de Recherche sur les Matériaux

et la Physico-chimie pour les énergies bas carbone

## ► Références

- [1] C. FAIDY *et al.*, "Thermal fatigue in French RNR systems", *Int. Conf. on Fatigue of Reactor Components*, Vapa, California, 2000.
- [2] J.M. STEPHAN, C. GOURDIN *et al.*, "Fatigue evaluation in mixing zones: comparison of different criteria of fatigue", ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, Chicago, USA, 2008.
- [3] S. PANIER, P. DUFRÉNOY and D. WEICHERT, "An experimental investigation of hot spots in railway disc brakes", *Wear*, Vol. 256, Issue 7-8, pp. 764-773, 2004.
- [4] F. SZMYTKA, M. SALEM, F. RÉZAI-ARIA and A. OUDIN, "Thermal fatigue analysis of automotive Diesel piston : Experimental procedure and numerical protocol", *International Journal of Fatigue*, Vol. 73, 2015.
- [5] Y. KOSTOCHKIN, "Effect of thermal fatigue on the failure of turbine blades", *Metal Science and Heat Treatment*, 305-307, 1962.
- [6] A. FISSOLO, S. AMAIBLE, O. ANCELET *et al.*, "Crack Initiation under thermal fatigue: an overview of CEA experience. Part I : Thermal fatigue appears to be more damaging than uniaxial isothermal fatigue", *Int. Journal of Fatigue*, 31(3), pp. 587-600, 2009.
- [7] A. FISSOLO, C. GOURDIN, O. ANCELET *et al.*, "Crack Initiation under thermal fatigue: an overview of CEA experience. Part II: Application of various criteria to biaxial thermal fatigue tests and a first proposal to improve the estimation of the thermal fatigue damage", *Int. Journal of Fatigue*, 31(7), pp. 1197-1210, 2009.
- [8] D.F. LEFEBVRE, "Hydrostatic Pressure effect on Life Prediction in Biaxial Low-cycle fatigue", *Biaxial and Multiaxial Fatigue*, EGF 3, 1989.
- [9] T. ITOH, M. SAKANE *et al.*, "A design procedure for assessing low cycle fatigue life under proportional and non-proportional loading", *Int. Journal of Fatigue*, 28, 2006.
- [10] M.W. PARSONS and K.J. PASCOE, "Development of a biaxial fatigue testing rig", *Journal of Strain Analysis*, 10, n° 1, pp. 1-3, 1975.
- [11] H. SHIMADA, K. SHIMIZU, M. OBATA, K. CHIKUGO and M. CHIBA, "A new biaxial testing machine for the flat specimen and a fundamental study on the shape of the specimen", *Technology Reports*, Tohoku Univ., 42, n° 2, pp. 351-369, 1976.

- [12] T. MÉTAIS, S. COURTIN, P. GENETTE, L. DE BAGLION, C. GOURDIN and J.-C. LE ROUX, "Status of the french methodology proposal for environmentally assisted fatigue assessment", ASME PVP2014-28408, ASME 2014 Pressure Vessels and Piping Conference, California, USA.
- [13] A. MAKINDE, L. THIBODEAU and K.W. NEALE, "Development of an apparatus for biaxial testing using cruciform specimens", *Exp Mech*, 32, 1992.
- [14] A. HANNON and P. TIERNAN, "A review of planar biaxial tensile test systems for sheet metal", *J Mater Process Technol*, 198, 2008.
- [15] M. PONCELET *et al.*, "Biaxial High cycle fatigue of a type 304L stainless steel: Cyclic strains and crack initiation detection by digital image correlation", *European journal of mechanics A/Solids*, 29, 810-825, 2010.
- [16] J. RUPIL, *Multi-fissuration en fatigue uniaxiale et biaxiale de l'acier inoxydable 304L*, thèse de doctorat de l'École normale supérieure de Cachan, septembre 2012.
- [17] K.D. IVES, L.F. KOOISTRA and J.T. TUCKER, "Equibiaxial low-cycle fatigue properties of typical pressure-vessel steels", *J Basic Eng Trans ASME Ser D*, 88, 1966.
- [18] J. SHEWCHUK, S.Y. ZAMRIK, J. MARIN, "Low-cycle fatigue of 7075-T651 aluminum alloy in biaxial bending", *Exp Mech*, 8, 1968.
- [19] O.K. CHOPRA and W.J. SHACK, "Effect of LWR Coolant Environments on the Fatigue Life of Reactor Materials, final Report", Argonne National Laboratory, NUREG/CR-6909, ANL-06/08, US Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research, Washington, DC 20555-0001, February 2007.
- [20] L. DE BAGLION, *Comportement et endommagement en fatigue oligocyclique d'un acier inoxydable austénitique 304L en fonction de l'environnement (vide, air, eau primaire REP) à 300 °C*, thèse de doctorat de l'École nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique, Poitiers, 2011.
- [21] H. CHO, B.K. KIM, I.S. KIM, D.Y. JUN and S.C. BEYON, "Environment effects on Fatigue Life of Type 316 Stainless Steel in High Temperature Water", Presented at OCDE-NEA 3<sup>rd</sup> International Conference on Fatigue of Reactor Components, Seville, Spain, October 6, 2004.
- [22] M. HIGUCHI, "Development of Evaluation Method of Fatigue Damage on Operating Plant Components in Considering Environmental Effect of LWR Coolant", Presented at OCDE-NEA 3<sup>rd</sup> International Conference on Fatigue of Reactor Components, OCDENEA/CSNI/R(2004)21, Seville, Spain, October 6, 2004.
- [23] R. KILLIAN, J. HICKLING and R. NICKELL, "Environmental Fatigue of Austenitic Stainless Steel Pipe Bends in Simulated PWR Primary Water", Presented at OCDE-NEA 3<sup>rd</sup> International Conference on Fatigue of Reactor Components, OCDENEA/CSNI/R(2004)21, Seville, Spain, October 6, 2004.
- [24] T. NAKAMURA, "Current Status of Development on Codes for Fatigue Evaluation in JSME", Presented at OCDE-NEA 3<sup>rd</sup> International Conference on Fatigue of Reactor Components, OCDENEA/CSNI/R(2004)21, Seville, Spain, October 6, 2004.
- [25] H.D. SOLOMON, C. AMZALLAG, R.E. DE LAIR and A.J. VALLEE, "Strain Controlled Fatigue of Type 304 Stainless Steel in Air and PWR Water", Presented at 3<sup>rd</sup> International Conference on Fatigue of Reactor Components, Seville, Spain, October 6, 2004.

# L'étude de la rupture – l'exemple de l'Effet WPS (*warm pre-stress*) ou préchargement à chaud

## Contexte

L'intégrité des cuves de réacteurs REP doit être justifiée tout au long de leur exploitation, en condition de fonctionnement normal, incidentel ou accidentel (choc froid pressurisé), en particulier vis-à-vis du risque de rupture brutale. Cette justification s'appuie sur une approche mécanique conservatrice codifiée dans le RCC-M et le RSE-M, codes édités par l'Association française pour les règles de conception, de construction et de surveillance en exploitation des matériels des chaudières électro-nucléaires (AFCEN).

Le principe de cette démonstration d'intégrité est de vérifier l'absence de risque d'amorçage d'un défaut (postulé) dans toutes les conditions de chargement (normales, incidentelles et accidentelles) en tenant compte de l'état du matériau (irradiation...). Deux grandeurs caractéristiques sont donc considérées :

- Le facteur d'intensité de contrainte ( $K_{cp}$  ou  $K_J$ ) caractérisant le chargement vu par le défaut. Il est dépendant de la géométrie du défaut et des conditions de chargement (transitoire considéré) ;
- la ténacité du matériau ( $K_{Ic}$ ) caractérisant sa résistance à la rupture brutale et égale au facteur d'intensité de contrainte

au moment de la rupture du matériau. Elle dépend de l'état du matériau.

L'objectif est de démontrer, qu'à tout instant du transitoire considéré, le facteur d'intensité de contrainte ( $K_{cp}$  ou  $K_J$ ) reste inférieur à la ténacité  $K_{Ic}$  du matériau, dans le but de dégager des marges selon le principe illustré sur la figure 108 (a). La figure 108 (b) montre le cas concret d'une brèche (PBP, petite brèche primaire 3 pouces) soumise à un transitoire représentatif d'une cuve 900 MWe. Sur cette figure, la marge de résistance à la rupture brutale est évaluée par la plus faible distance verticale entre le chargement et la courbe de ténacité.

Pour justifier et conforter une extension de la durée de fonctionnement des REP, l'intégration d'avancées techniques et scientifiques récentes disponibles (neutronique, matériaux, thermohydraulique et mécanique) devrait permettre de réduire le conservatisme de la démarche actuelle du dossier. C'est en particulier le cas dans le domaine mécanique avec la possible prise en compte du phénomène de préchargement à chaud (WPS pour *warm pre-stress*) dans l'évaluation des marges de résistance des cuves.

La résistance d'un matériau à la rupture fragile est caractérisée par sa ténacité  $K_{Ic}$  habituellement mesurée sur éprou-

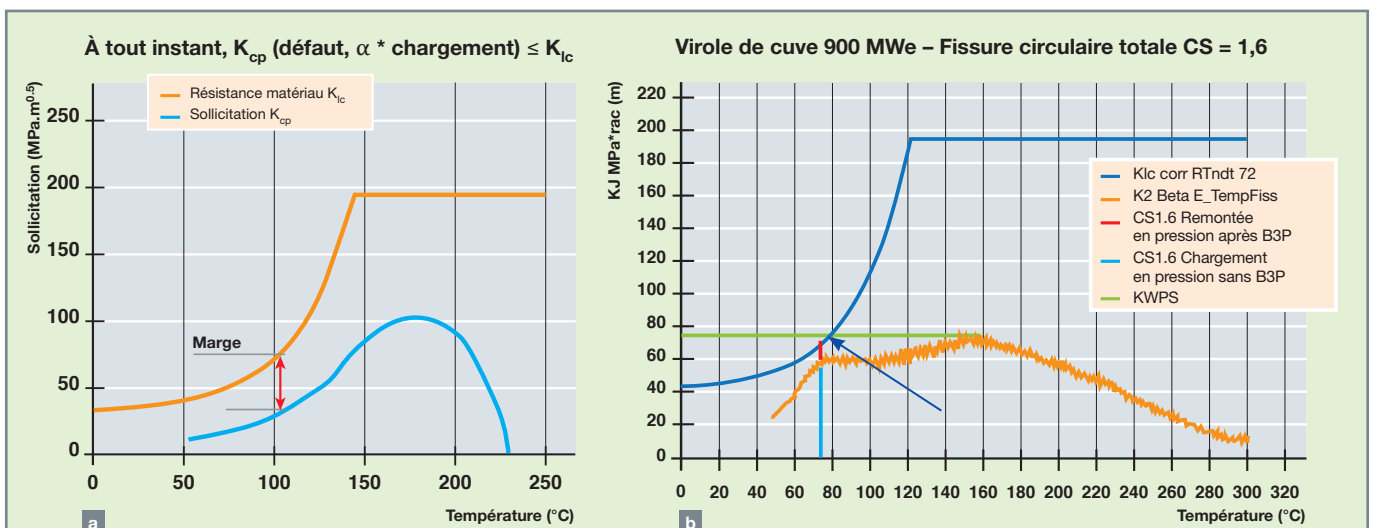


Fig. 108. Démarche d'évaluation des marges de résistance à la rupture brutale des cuves REP : (a) schéma de principe de la démonstration et (b) exemple de transitoire de type petite brèche primaire 3 pouces pour une cuve 900 MWe. La marge est indiquée par une flèche.

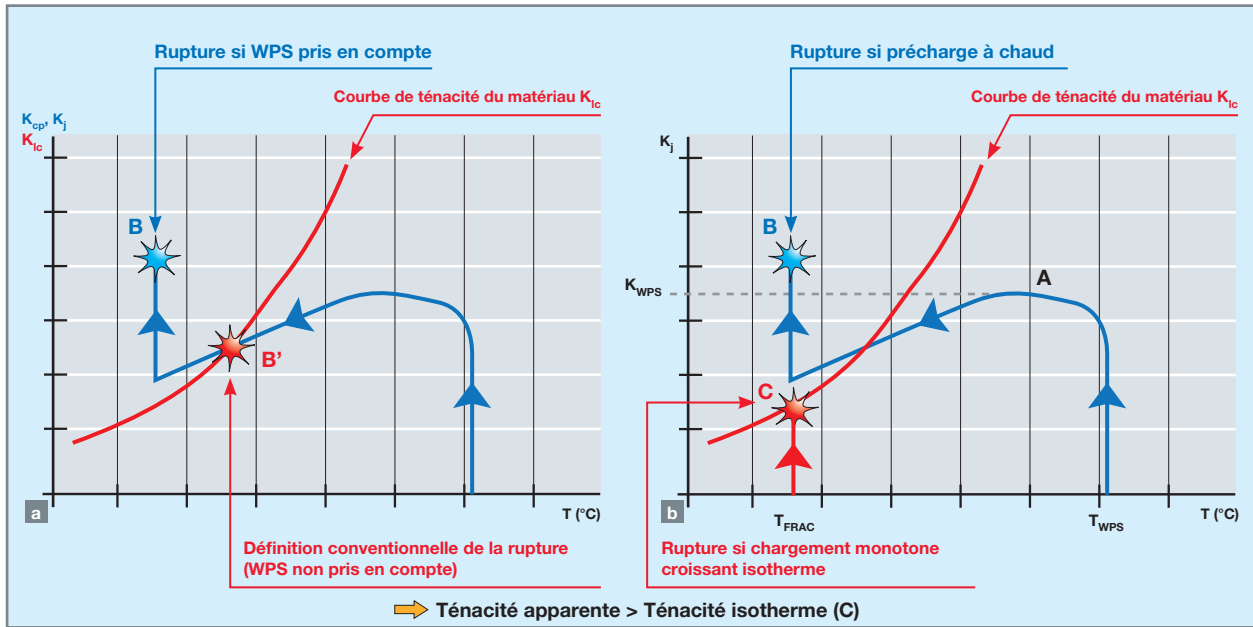


Fig. 109. Schématisation d'un transitoire typique vu par la cuve lors d'un choc thermique pressurisé (évolution de  $K_{CP}$  avec la température) et démonstration des effets bénéfiques de la précharge à chaud : (a) absence de rupture lorsque la courbe  $K_{CP}$  croise la courbe de ténacité en B' et (b) ténacité apparente supérieure (point B) à la ténacité issue d'un chargement isotherme croissant (point C) à la même température  $T_{FRAC}$ .

vettes de laboratoire, testées à plusieurs températures sous chargement monotone croissant et isotherme. Ces conditions garantissent un caractère conservatif des propriétés du matériau, mais sont peu représentatives des sollicitations réelles du composant (principalement des transitoires thermomécaniques). Pour les situations les plus significatives qui peuvent conduire à un refroidissement important de la cuve, le chargement vu par la cuve croît dans une première phase à partir sa température initiale, se stabilise, puis décroît progressivement avec le refroidissement. Pour certaines situations bien particulières, le composant peut être de nouveau sollicité en fin de transitoire, par exemple en cas de repressurisation du circuit (transitoire en bleu sur la figure 109).

Ce type de chargement complexe illustre le phénomène de préchargement à chaud lié à la prise en compte de l'histoire du chargement sur le comportement du matériau vis-à-vis de sa résistance à la rupture brutale. Conséquence de la sollicitation initiale du matériau à une température où il n'est pas sensible à la rupture fragile, ce phénomène se traduit par deux effets majeurs :

- L'impossibilité d'amorçage de la rupture brutale lors du refroidissement en phase de décharge (pas de croissance des contraintes ni de la plasticité), y compris lorsque le facteur d'intensité de contrainte devient supérieur à la ténacité isotherme  $K_{Ic}$  du matériau (= absence de rupture au point B' sur la figure 109 [a]). Il est nécessaire de solliciter à nouveau le matériau (jusqu'au point B sur la figure 109 [a]) pour initier l'amorçage ;

- une augmentation de la résistance effective du matériau (point B sur la figure 109 [b]) par rapport à la ténacité isotherme initiale  $K_{Ic}$  du matériau (point C sur la figure 109 [b]) à la même température  $T_{FRAC}$ .

Si ce phénomène est compris et correctement prédit dans des configurations simples, son application spécifique au cas du choc thermique pressurisé sur la cuve a nécessité des travaux de R&D afin :

- de démontrer son applicabilité au cas des chargements thermiques sur structures (sollicitations biaxées) ;
- de confirmer le phénomène pour les matériaux irradiés ;
- de développer un critère mécanique cohérent avec la pratique d'analyse du dossier.

## Démarche mise en œuvre

Historiquement mis en évidence dans les années 1970-1980 sur des éprouvettes conventionnelles de mécanique de la rupture sollicitées mécaniquement, l'effet WPS et son applicabilité à des situations davantage représentatives du comportement des cuves de réacteurs REP – et sa mise en œuvre effective dans les dossiers de justification mécanique – ont été étudiés de manière pragmatique en plusieurs étapes :



- La vérification de cet effet à partir d'essais standard de mécanique de la rupture sur éprouvettes conventionnelles, sur des aciers parfaitement représentatifs des aciers de cuve (aciers ferritiques 18MND5 et 16MND5) et sous sollicitation mécanique uniaxiale ;

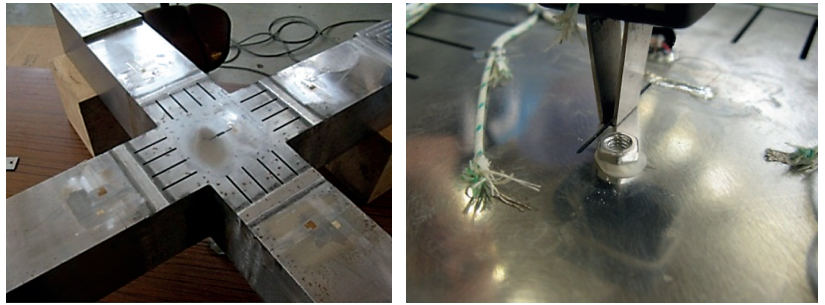


Fig. 110. Éprouvettes cruciformes testées au CEA selon des transitoires de type WPS.

- l'évaluation, puis la confirmation de cet effet sur des configurations expérimentales plus complexes et innovantes :
  - sur des éprouvettes atypiques : CTpor (éprouvettes CT comportant un défaut semi-elliptique), éprouvettes CT et SENT de grandes dimensions,
  - l'influence d'un chargement biaxial à partir d'essais sur des éprouvettes spécifiques de grandes dimensions : éprouvettes cruciformes en acier 18MND5 développées et testées au CEA et disques testés au SCK-CEN (voir fig. 110),
  - l'influence de l'irradiation du matériau (acier 16MND5) à partir d'essais sur éprouvettes CT réalisés à EDF (fluence moyenne simulant une durée de fonctionnement [DDF] de 40 ans) et au CEA (fluence élevée simulant une DDF au-delà de 60 ans) ;
- le développement et la validation de modèles mécaniques, numériques et analytiques, validés par les données expérimentales acquises ;
- la proposition d'un critère mécanique simple et utilisable d'un point de vue industriel ;
- l'intégration de cet effet dans la réglementation et la codification (code RSE-M).

La majeure partie de ce travail a été conduite conjointement par EDF, le CEA et Framatome dans le cadre de l'Institut I3P (Institut Tripartite regroupant la R&D coopérative commune aux trois organismes). Des actions complémentaires (sur les mêmes aciers) ont également été menées avec d'autres partenaires et également à l'international, pour compléter, conforter, valider et valoriser ces travaux. Citons en particulier :

- Le projet européen SMILE (2002-2005) dans le cadre du FP5, avec notamment la réalisation d'un essai de choc thermique sur un cylindre de grandes dimensions au MPA Stuttgart ;
- le projet NESC VII (2008-2013) dans le cadre du réseau européen NESC (*Network for Evaluating Steel Component*), dédié plus spécifiquement à l'effet de biaxialité du chargement et intégrant en particulier les essais sur éprouvettes cruciformes.

## Principaux acquis expérimentaux

### Vérification de l'effet WPS sur les aciers 18MND5 et 16MND5 sous chargement uniaxial

Dans une première phase, de très nombreux essais avec des trajets de chargement enveloppes ont été réalisés sur des éprouvettes sous chargement uniaxial couvrant un très large éventail de configurations expérimentales et de trajets de chargement (voir fig. 111) :

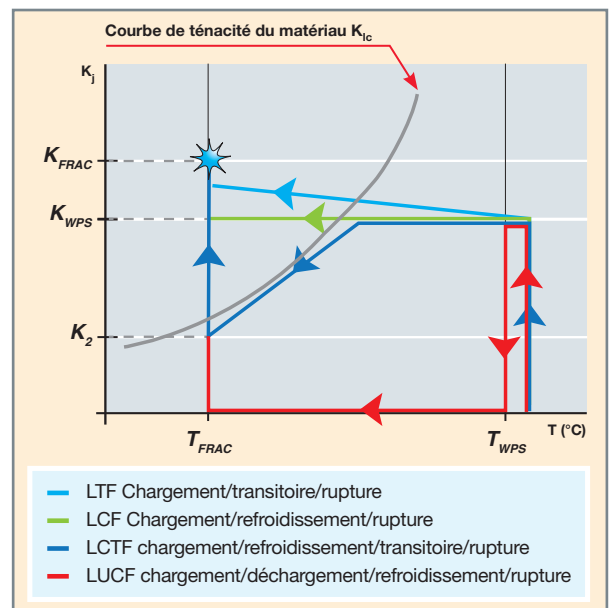


Fig. 111. Illustration de quelques transitoires de type WPS (LCF, LUCF, LTF et LCTF).

Tous les résultats ainsi obtenus confirment l'effet de préchargement sur la résistance effective de l'acier de cuve à la rupture brutale, quelles que soient les conditions expérimentales et les configurations considérées (matériaux, éprouvettes, trajets de chargement... ; voir fig. 112) :

- Absence d'amorçage de la rupture lors de la phase de refroidissement, à chargement constant (LCF, LUCF),

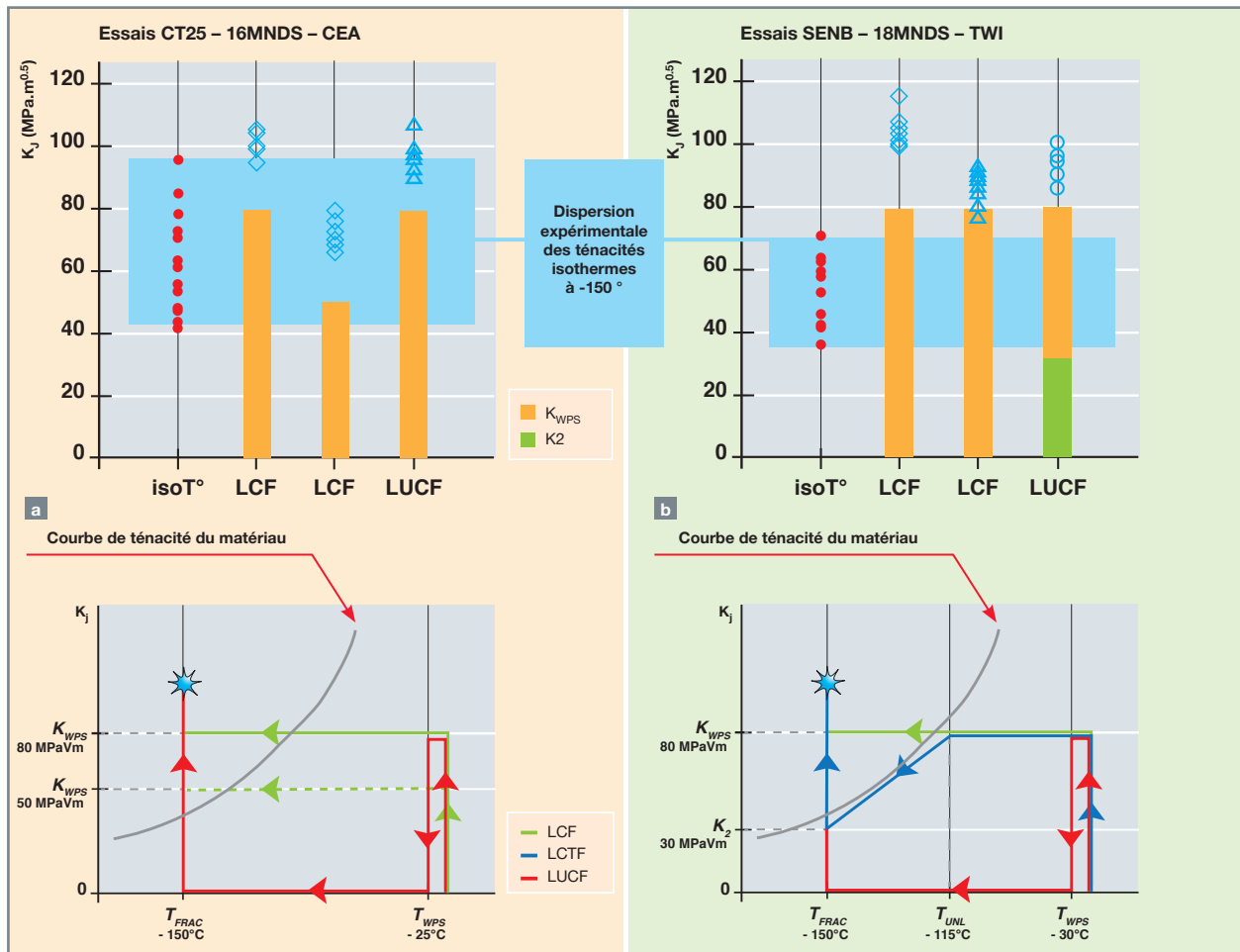


Fig. 112. Quelques résultats obtenus sur les aciers 16MND5 sur éprouvettes CT (a) et 18MND5 sur éprouvettes SENB (b) : comparaison des ténacités effectives après des cycles WPS de type LCF, LUCF et LCTF aux ténacités isothermes à la température de rupture - 150 °C.

décroissant (LTF, LCTF...) ou croissant (LTF) tant que la plasticité n'est pas active (pas d'augmentation de la déformation plastique), y compris lorsque le chargement appliqué est supérieur à la ténacité isotherme  $K_{Ic}$  du matériau ;

- nécessité de solliciter à nouveau le matériau pour amorcer la rupture brutale à la température froide ;
- augmentation – parfois significative – de la résistance effective du matériau en cas de nouvelle sollicitation en fin de transitoire.

### Confirmation de l'effet WPS sur l'acier 18MND5 sous chargement biaxial

Les essais conduits au CEA sur six éprouvettes cruciformes de grandes dimensions confirment indiscutablement l'effet WPS sous un chargement biaxial, plus représentatif des sollicitations « réelles » du composant (voir fig. 113 et fig. 114).

Ces essais ont confirmé l'effet bénéfique du WPS sous chargement biaxial et permis de valider le critère développé dans le cadre d'actions de R&D pour ce type de sollicitation.

### Confirmation de l'effet WPS sur l'acier 16MND5 irradié

Les essais sur l'acier de cuve moyennement (EDF Chinon, fluence 40 ans, voir fig. 115) ou fortement (CEA, fluence au-delà de 60 ans, voir fig. 116) irradié, à partir d'éprouvettes de géométrie identique à celles utilisées du PSI, confirment cet effet pour l'ensemble des configurations expérimentales étudiées (cycles LCF, LTF et LCTF). Les matériaux retenus proviennent du programme de surveillance EDF ou résultent d'une irradiation spécifique dans le réacteur OSIRIS du CEA. La forte augmentation des limites d'élasticité des matériaux ne remet pas en cause l'effet bénéfique du WPS, d'un point de vue qualitatif et quantitatif.



Fig. 113. Essais WPS sous chargement biaxial : éprouvettes cruciformes du CEA en fin d'essai démontrant un mode de rupture reproductible quel que soit le cycle de chargement.

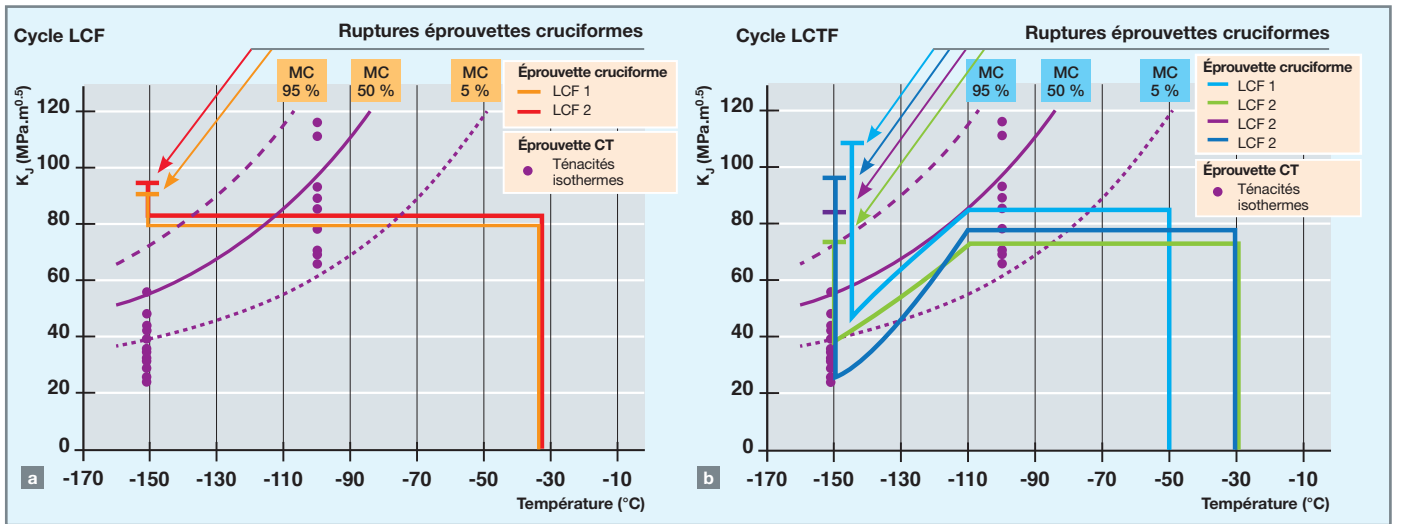


Fig. 114. Confirmation de l'effet (bénéfique) WPS sous chargement biaxial sur éprouvettes cruciformes : cycles LCF (a) et LCTF (b) comparés aux ténacités isothermes sur CT.

Un grand volume de données expérimentales est maintenant disponible couvrant un très large éventail de configurations expérimentales. L'effet favorable du préchargement à chaud sur la résistance à la rupture brutale est bien mis en évidence sur l'ensemble des configurations étudiées, en particulier pour des configurations plus spécifiques des cuves REP (irradiation du matériau, biaxialité du chargement, géométrie...). Cet effet est observé à la fois sur éprouvettes et sur des structures de plus grandes dimensions.

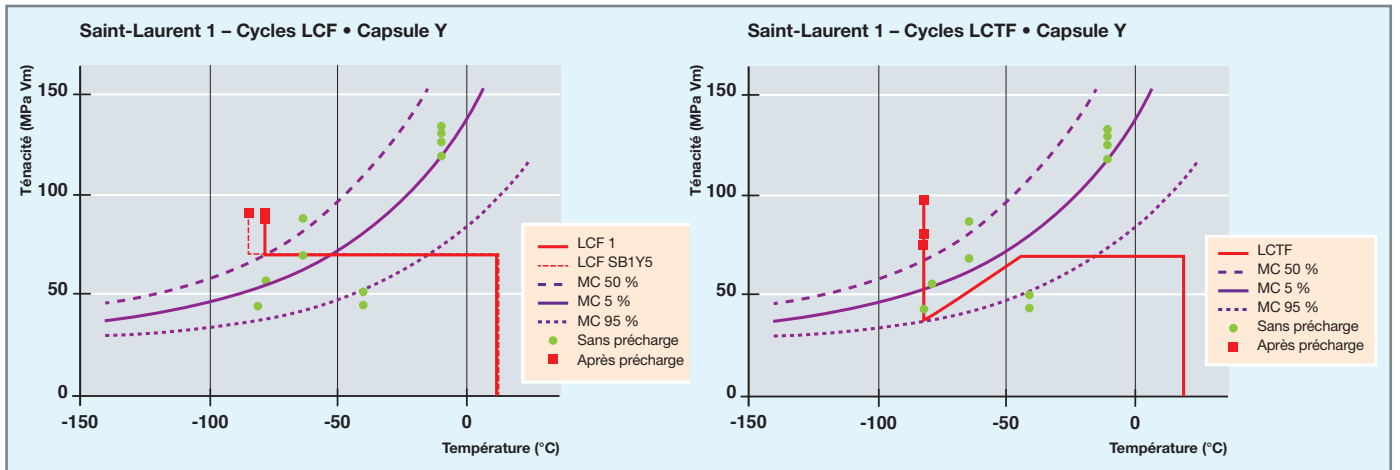


Fig. 115. Confirmation de l'effet WPS sur l'acier 16MND5 moyennement irradié (EDF, fluence 40 ans).

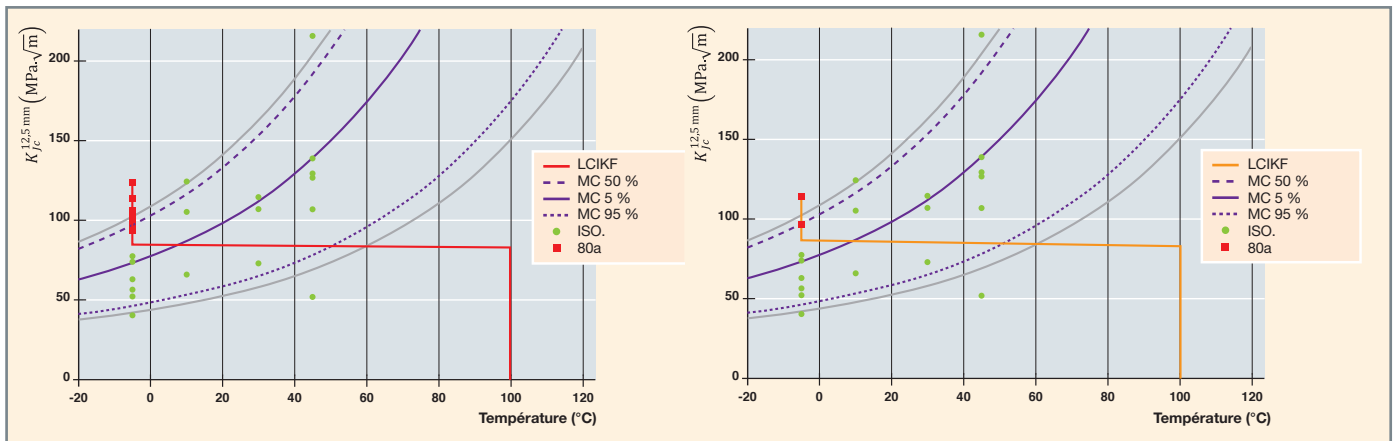


Fig. 116. Confirmation de l'effet WPS sur l'acier 16MND5 fortement irradié (CEA, fluence au-delà de 60 ans).

## Développement et validation d'un modèle mécanique numérique

Un modèle mécanique numérique a été développé puis validé pour rendre compte de l'effet de préchargement à chaud sur le comportement du matériau et de la structure (modèle « Beremin modifié »). Le modèle original de Beremin a ainsi été adapté et étendu à des configurations plus complexes incluant des structures et sollicitations quelconques, dépendance de paramètres avec la température ou encore chargement non strictement monotone... Ce modèle, appliqué en post-traitement d'un calcul élasto-plastique, permet une évaluation de la probabilité de rupture par clivage d'une structure lors d'un transitoire quelconque :

$$P_F(t) = 1 - \exp \left[ - \int_{V_p} \left[ \max_{t(\tau \leq t, \dot{\phi}(\tau) > 0)} \frac{\sigma_l(\tau)}{\sigma_u(T(\tau))} \right]^m \frac{dv}{V_0} \right]$$

Par rapport au modèle original de Beremin, la notion de « plasticité active » a été explicitement introduite, permettant

de prendre en compte l'accroissement de plasticité nécessaire entre deux pas de chargement pour créer les microfissures qui pourront ensuite déclencher la rupture brutale par clivage. Des éléments de justification de la notion de « plasticité active » ont été apportés à partir d'essais plus spécifiques sur aciers non irradiés (18MND5 et 16MND5) et irradiés (16MND5). Une modélisation fine des mécanismes de la plasticité et de rupture aux échelles inférieures dans ces microstructures complexes est un axe de R&D qui ouvre des perspectives pour consolider à l'échelle d'intérêt les hypothèses considérées.

Ce modèle est maintenant implanté dans les différents codes des partenaires de l'Institut I3P (Code\_Aster, Cast3M, SYSTUS). Sa validité a été démontrée au travers des interprétations d'essais et des *benchmarks* réalisés (voir fig. 117, fig. 118 et fig. 119). La figure 117 montre que, pour deux cycles de chargement, la ténacité effective après un préchargement à chaud est bien décrite par un modèle de type « approche locale de la rupture ».



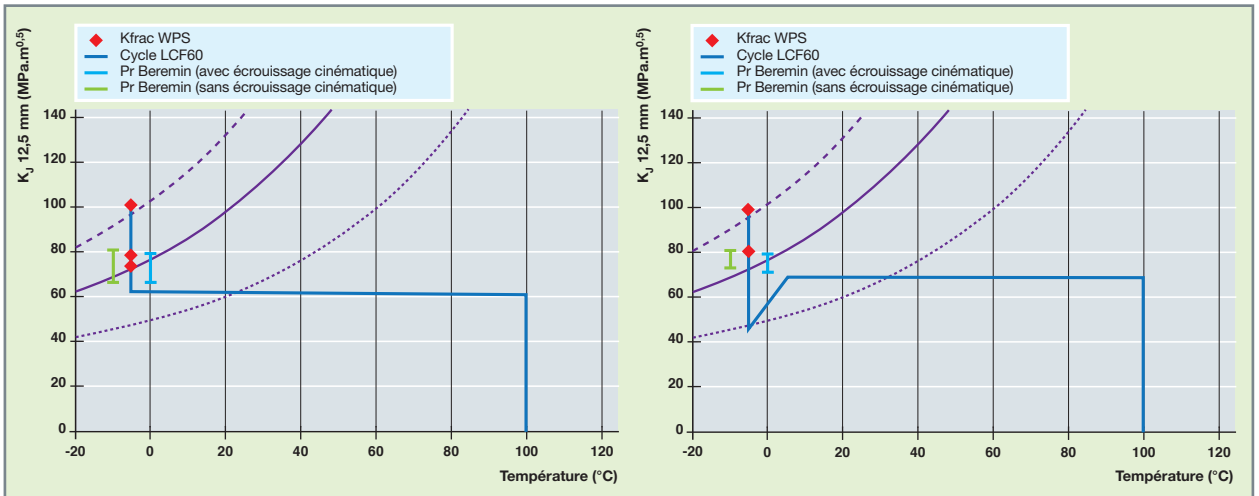


Fig. 117. Interprétation EDF par le modèle « Beremin modifié » des essais WPS réalisés au CEA sur l'acier 16MND5 fortement irradié (fluence 60 ans).

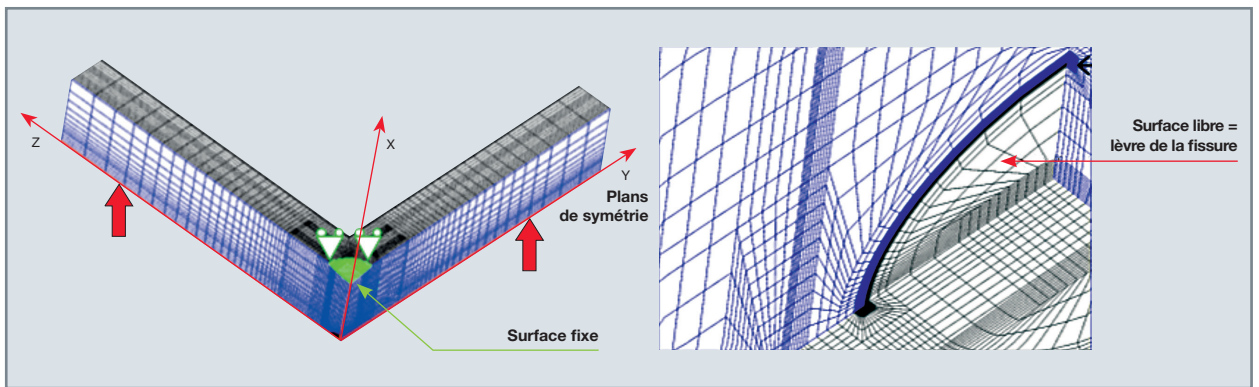


Fig. 118. Interprétation CEA des essais WPS réalisés sur éprouvettes cruciformes (acier 18MND5). Maillage réalisé sous Cast3M.

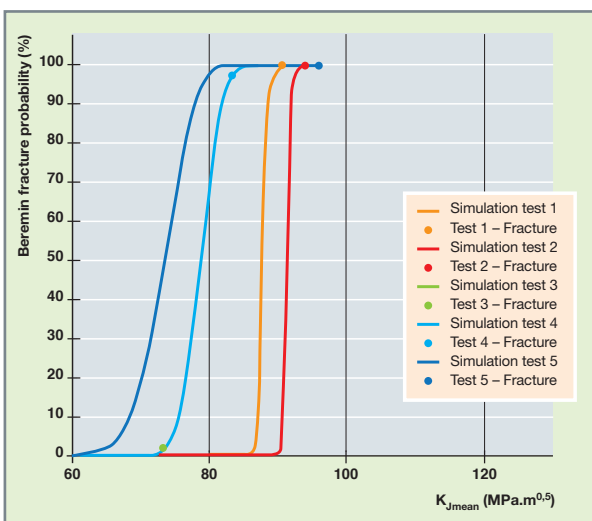


Fig. 119. Interprétation CEA par le modèle « Beremin modifié » des essais WPS réalisés sur éprouvettes cruciformes (acier 18MND5). Évolution de la probabilité de rupture calculée pour les transitoires définis sur la figure 114 et rupture expérimentale indiquée par des ronds.

## Proposition et validation d'un critère analytique : le critère ACE

Bien que le modèle numérique proposé soit validé et contribue à une meilleure description du comportement local du matériau par la prise en compte des champs de contraintes et déformations en pointe de fissure, son utilisation généralisée est difficilement envisageable pour des études générales, en raison notamment du nombre de situations à considérer. Cela nécessiterait également la généralisation des études mécaniques élasto-plastiques dans les dossiers de justification mécanique.

Un critère analytique mécanique simple a donc été proposé par les trois partenaires – le critère ACE – pour une évaluation aisée de la résistance effective à la rupture ( $K_{FRAC}^{ACE}$ ) d'un matériau préalablement sollicité à plus haute température :

$$K_{FRAC}^{ACE} = \max \left[ K_{IC}(T); \min \left\{ K_{JWPS}; K_2 + \frac{K_{JWPS}}{2} \right\} \right]$$

Ce critère est aisément utilisable d'un point de vue industriel, car ne nécessitant que trois paramètres simples toujours disponibles (voir fig. 120) :

- La ténacité isotherme du matériau à la température de rupture considérée :  $K_{Ic}(T_F)$  ;
- le niveau de préchargement initial  $K_{JWPS}$  correspondant au maximum du chargement (facteur d'intensité de contrainte) au cours du transitoire (à la température  $T_{WPS}$ ) ;
- la valeur minimale  $K_2$  du chargement au cours du transitoire.

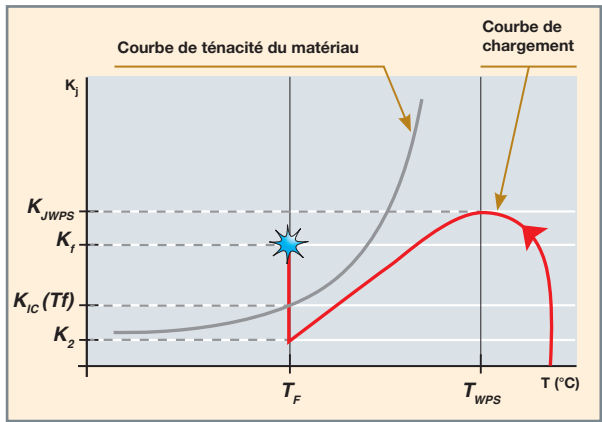


Fig. 120. Illustration d'un cycle WPS et des paramètres du critère ACE.

À partir d'une base de données expérimentales spécifique capitalisant les très nombreux résultats expérimentaux maintenant disponibles liés au WPS, l'évaluation du critère a été faite en confrontant les prédictions du modèle ( $K^{ACE}$ ) aux résultats expérimentaux  $K^{exp}$  (voir fig. 121). La validation du critère ACE et donc son conservatisme sont parfaitement démontrés sur l'ensemble de la base de données, en particulier sur les matériaux irradiés :

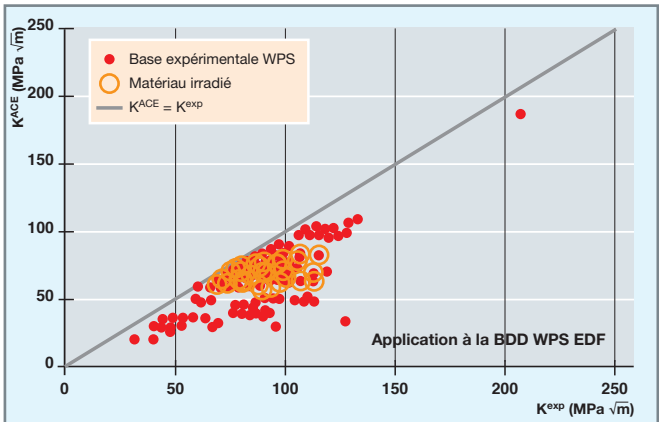


Fig. 121. Application du critère ACE à l'ensemble de la base de données expérimentales WPS comportant des matériaux irradiés et non irradiés.

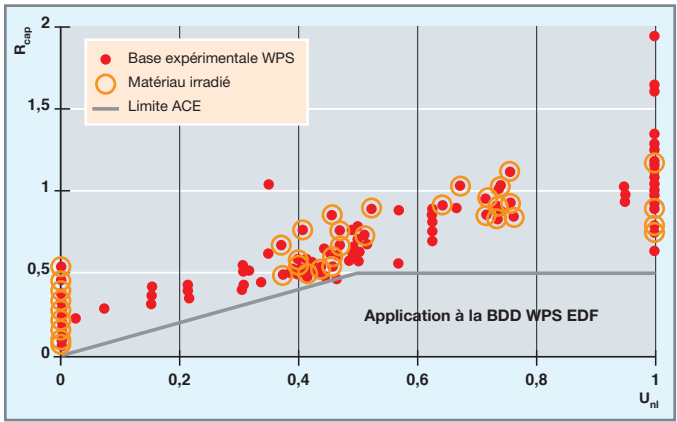


Fig. 122. Validation du caractère conservatif de la courbe enveloppe proposée pour le critère ACE.

Une autre représentation des résultats expérimentaux est faite sur la figure 122 présentant la capacité de recharge du matériau  $R_{cap}$  en fonction de la décharge appliquée  $U_{nl}$  lors des essais, avec :

$$R_{cap} = (K_{frac} - K_2)/K_{wps}$$

$$U_{nl} = (K_{wps} - K_2)/K_{wps}$$

Ces éléments confirment bien le caractère conservatif de la courbe enveloppe proposée lors de l'élaboration du critère ACE.

Le critère analytique ACE proposé est ainsi validé sur une base de données conséquente (plus de 200 essais) balayant un très large éventail de configurations expérimentales WPS (matériaux, conditions expérimentales, éprouvettes et structures...) en couvrant notamment une gamme complète de décharges d'amplitude variable (du cycle WPS sans décharge au cycle LUCF avec décharge totale).

### La codification

L'ensemble de ces travaux de R&D a été concrétisé dans une proposition de codification du traitement de l'effet WPS, basée sur le critère ACE. Cette proposition a été instruite et intégrée dans le code RSE-M (règles de surveillance en exploitation des matériels mécaniques des îlots nucléaires REP) édité par l'AFCEM.

**Clémentine JACQUEMOUD, Yann KAYSER,**  
*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*  
**Benoit TANGUY et Jeremy HURE,**  
*Département de Recherche sur les Matériaux et la Physico-chimie pour les énergies bas carbone*

## ► Références

- [1] C. JACQUEMOUD, T. YURITZINN, S. MARIE, D. MOINEREAU, M. NÉDÉLEC and S. CHAPULIOT, "NESC VII European project: Demonstration of warm pre stressing effect in biaxial loading conditions – bending tests on 18MND5 cruciform specimens", PVP conference, Baltimore, Maryland, USA, 2011.
- [2] C. JACQUEMOUD, T. YURITZINN, S. MARIE, D. MOINEREAU, M. NÉDÉLEC and S. CHAPULIOT, "Five point bending tests on 18MND5 cruciform specimens to demonstrate the warm pre stressing effect", SMIRT, Delhi, India, 2011.
- [3] C. JACQUEMOUD, T. YURITZINN, S. MARIE, D. MOINEREAU, M. NÉDÉLEC and S. CHAPULIOT, "NESC VII European project: Demonstration of warm pre stressing effect in biaxial loading conditions – bending tests on 18MND5 cruciform specimens and their interpretations", PVP conference, Toronto, Canada, 2012.
- [4] C. JACQUEMOUD, T. YURITZINN, S. MARIE, D. MOINEREAU, M. NÉDÉLEC and S. CHAPULIOT, "Synthesis of the NESC VII European project: Demonstration of warm pre stressing effect in biaxial loading conditions", PVP conference, Paris, France, 2013.
- [5] C. JACQUEMOUD, S. MARIE and M. NÉDÉLEC, "Evaluation of the active plasticity as a relevant justification of the warm pre stressing effect", *Engineering Fracture Mechanics*, 104, pp. 16-28, 2013.
- [6] D. MOINEREAU, S. CHAPULIOT, S. MARIE and C. JACQUEMOUD, "NESC VII syntheses: A European project for application of WPS in RPV assessment including biaxial loading", *Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Division Conference*, PVP2014, Anaheim, California, USA, July 20-24, 2014.
- [7] C. JACQUEMOUD and M. NÉDÉLEC, "Loading conditions likely to modify the benefits of the warm pre stressing effect", PVP conference, Paris, France, 2013.
- [8] D. MOINEREAU, S. CHAPULIOT, S. MARIE and C. JACQUEMOUD, "NESC VII project: a European project for application of WPS in RPV assessment including biaxial loading", *Transactions SMIRT-22*, San Francisco, California, USA, August 18-23, 2013
- [9] M. P. VALETA, C. SAINTE CATHERINE, G. BARBIER, W. LEFEVRE, U. EISELE and S. BHANDARI, "Structural behavior during a PTS transient taking into account the WPS effect", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 78, pp. 137-146, 2001.
- [10] T. YURITZINN, L. FERRY, S. CHAPULIOT, D. MOINEREAU, A. DAHL and P. GILLES, "Warm pre-stressing tests on specimens with semi-elliptical cracks and analysis of the results", *Engineering Fracture Mechanics*, 77 (1), pp. 71-83, 2010.
- [11] T. YURITZINN, L. FERRY, S. CHAPULIOT, P. MONGABURE, D. MOINEREAU, A. DAHL and P. GILLES, "Illustration of the WPS benefit through BATMAN test series : Tests on large specimens under WPS loading configurations", *Engineering Fracture Mechanics*, 75, pp. 2191-2207, 2008.
- [12] D. LAUEROVA *et al.*, "Information about WPS experiments performed in NRI Rez and their evaluation", Fontevraud 7 Conference, paper A083, Avignon, 2010.
- [13] S. CHAPULIOT *et al.*, "WPS criterion proposition based on experimental data-base interpretation" Fontevraud 7 Conference, paper A141, Avignon, 2010.
- [14] J. HURE, C. VAILLE, P. WIDENT, D. MOINEREAU, C. LANDRON, S. CHAPULIOT, C. BENHAMOU, B. TANGUY : Warm PreStress effect on highly irradiated reactor pressure vessel steel, *Journal of Nuclear Materials*, 464, 2015, pp 281-293
- [15] S.R. BORDET, B. TANGUY, J. BESSON, S. BUGAT, D. MOINEREAU and A. PINEAU, "Cleavage fracture of a RPV steel following warm-pre-stressing: micromechanical analysis and interpretation through a new model", *Fat. Frac. Engng. Mat. Struct.*, 29, 2006, pp. 799-816.
- [16] S. CHAPULIOT, D. LAUEROVA, M. BRUMOVSKY and B. TANGUY, "Information about WPS experiments performed in NRI Rez and their evaluation", Fontevraud 7 Conference, *Contribution of materials investigations to improve safety and performances of LWR's*, September 26-30, 2010.
- [17] D. MOINEREAU, A. DAHL, S. CHAPULIOT, T. YURITZINN, P. GILLES and B. TANGUY, "The demonstration of warm pre-stress effect in RPV assessment: some experimental results and their interpretation by fracture mechanics", 7<sup>th</sup> International ASTM/ESIS Symposium on Fatigue and Fracture Mechanics, Tampa, USA, November 14-16, 2007.
- [18] S. CHAPULIOT, J.P. IZARD, D. MOINEREAU and S. MARIE, "WPS criterion proposition based on experimental data base interpretation", Fontevraud 7 Conference, France, 2010.
- [19] J. HURE, C. VAILLE, P. WIDENT, D. MOINEREAU, C. LANDRON, C. BENHAMOU, S. CHAPULIOT and B. TANGUY, "Warm prestress effect on highly irradiated A508 Cl3 RPV steel", Fontevraud 8 Conference, France, 2014.





## Vieillessement des structures en béton armé et précontraint. Application aux enceintes de confinement de centrales nucléaires

### Généralités sur les enceintes de confinement de centrales nucléaires

De nombreuses structures du nucléaire incluent l'usage du béton armé et/ou précontraint dans leur construction. Il s'agit par exemple de bâtiments d'usage, auxiliaires ou de structures plus impliquées dans le fonctionnement ou la sûreté du réacteur comme les aérofrigoriférants ou l'enceinte de confinement (appelée également bâtiment réacteur). Cette dernière représente, dans le cadre de la défense en profondeur, la troisième barrière de confinement après la gaine du combustible et le circuit primaire (voir fig. 123) et joue donc un rôle essentiel dans la sûreté de l'installation en limitant à des valeurs acceptables les rejets vers l'environnement en cas d'accident [1]. Pour ces structures, une perte d'étanchéité, pendant leur durée de fonctionnement ou en cas d'accident, aurait un impact majeur. C'est pour cette raison qu'elles sont étroitement surveillées, notamment lors des visites décennales, décidant de la prolongation du fonctionnement du réacteur pour dix années supplémentaires.

Or, le béton armé est un matériau dont les propriétés évoluent avec le temps, soit de manière « naturelle » (séchage

induisant une évolution du degré de saturation, retrait endogène, de dessiccation...), soit par interaction avec l'environnement (corrosion, voir encart ci-après) ou sous l'effet de sollicitations externes (chargement de précontrainte induisant du fluage, mise en pression de l'enceinte lors des visites décennales, situation accidentelle...). L'ensemble de ces phénomènes thermo-hygro-mécaniques couplés ont un impact sur les propriétés macroscopiques du matériau, jusqu'à conduire, dans certains cas, à l'apparition d'une dégradation mécanique homogène (microfissuration) voire localisée (macrofissure). Or, les propriétés de transfert, caractérisant le degré d'étanchéité de la structure, sont directement impactées par cette dégradation mécanique.

Cette problématique est particulièrement centrale pour les enceintes de confinement des réacteurs 1 300 et 1450 MWe. En effet, deux systèmes existent sur le parc nucléaire français : les enceintes simple paroi avec liner métallique (réacteurs 900 MWe) et les enceintes double paroi sans liner métallique (réacteurs 1 300 et 1450 MWe ; voir fig. 126). Dans le premier cas, l'étanchéité est uniquement portée par un liner métallique (« peau d'étanchéité »). La perte de fonctionnalité est alors définie par la rupture de cet élément. Le béton exerce des fonctions mécaniques, à la fois de support (pour le liner) et de résistance (contre les agressions externes). Dans les enceintes double paroi, c'est le béton armé et précontraint de l'enceinte interne qui assure l'étanchéité de la structure. L'enceinte externe est dimensionnée de manière à résister aux agressions externes (impact, sollicitations environnementales). L'espace entre enceintes est soumis à une légère dépression permettant de récupérer puis de filtrer les résidus de fuite en cas d'accident. Toutefois, l'étanchéité est principalement assurée par l'enceinte interne en béton armé précontraint. Elle doit donc fournir des garanties pour le maintien de sa fonctionnalité dans le temps.

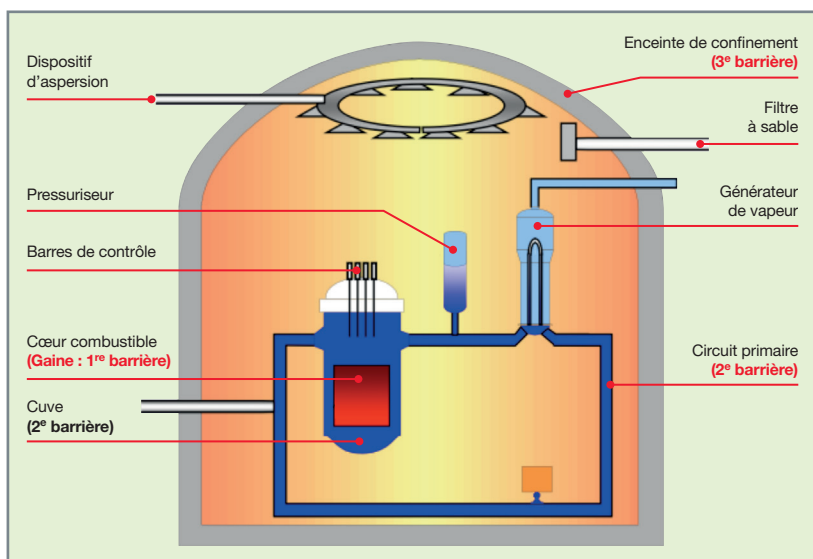


Fig. 123. Les trois barrières de confinement (source : monographie DES « L'énergie nucléaire du futur : quelles recherches pour quels objectifs ? », p. 29).

### Corrosion par carbonatation

La carbonatation est un phénomène naturel résultant de la dissolution du dioxyde de carbone dans l'air dans la solution interstitielle du matériau cimentaire (milieu poreux plus ou moins saturé en eau). L'effet du  $\text{CO}_2$  se produit à de faibles concentrations (0,04 % de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère). Le  $\text{CO}_2$  diffuse sous une forme dissoute et gazeuse en fonction du niveau de saturation du matériau. L'incorporation de  $\text{CO}_2$  dans la solution fait chuter le pH de la solution interstitielle, de 13 à des valeurs aussi basses que 8. Une réaction acido-basique se produit alors avec les composés basiques tels que la portlandite et les C-S-H (silicate de calcium hydraté), entraînant des modifications minérales et microstructurales. Les principaux hydrates de la pâte de ciment se dissolvent et les carbonates de calcium précipitent.

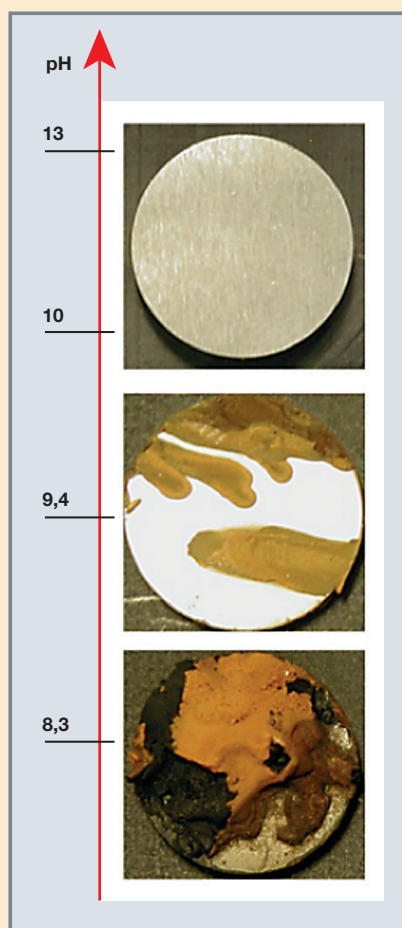


Fig. 124. Effet du pH de la solution interstitielle sur l'état de corrosion de l'acier. Transition entre corrosion à l'état passif et corrosion à l'état actif.

Le pH de la solution interstitielle dans le béton est d'environ 13. À ce pH, les oxydes de fer ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) sont stables et l'acier noyé dans le béton est placé dans des conditions passives. La couche d'oxydes de fer est appelée couche de passivation et la cinétique de corrosion des armatures en acier est extrêmement faible dans ces conditions (de l'ordre de  $0,1 \mu\text{m/an}$ ) [2].

Cependant, lorsque le front de carbonatation atteint l'armature en acier ou la doublure en acier, le pH dans les pores chute d'environ 12,5 à 8,5, ce qui rend le fer instable. La dépassivation de l'acier se produit lorsque ce critère est atteint (voir fig. 124), même si d'autres paramètres doivent être pris en compte : oxygène, eau, disponibilité de l'électrolyte, pH, cellules d'aération différentielle, etc.

Une fois que tous les critères sont remplis, la corrosion devient active. L'acier se dissout et des produits de corrosion apparaissent.

Ces produits de corrosion commencent à précipiter dans la porosité connectée disponible dans le béton entourant la barre d'acier. Au début, un petit volume de produit remplit les pores sans générer d'effets négatifs sur le béton. Cependant, le volume des produits de corrosion augmente à mesure que l'état de corrosion progresse. Il peut même atteindre six fois le volume du fer métallique [3]. Cette augmentation de volume induit une pression sur l'interface acier-béton qui peut conduire à des fissures une fois la résistance à la traction du béton dépassée.

### Corrosion par les chlorures

Les chlorures diffusent à travers la structure poreuse capillaire de la pâte de ciment. La cinétique de transport dépend fortement d'un certain nombre de facteurs, par exemple le rapport eau/ciment, le type de ciment, la température du béton et la maturité du béton. Certains chlorures réagissent chimiquement avec les composants du ciment (par exemple les aluminates de calcium) et sont efficacement éliminés de la solution interstitielle. La fraction de chlorures totaux disponible dans la solution interstitielle pour décomposer le film passif est conditionnée par plusieurs paramètres, par exemple le pH et la source des chlorures – mélange ou environnement. Le seuil de concentration de chlorure en dessous duquel une corrosion significative ne se produit pas dépend également de ces paramètres : ce seuil est considéré comme égal à 0,4 % (en poids) de Cl dans le ciment [4]. Une fois la couche de passivité de l'acier endommagée, la résistivité électrique du béton et l'oxygène disponible contrôlent la cinétique de corrosion. La disponibilité d'oxygène est une condition préalable à la corrosion avec, dans certains cas, une couleur résultante des produits de corrosion qui peut être verte, blanche ou noire (voir fig. 125).

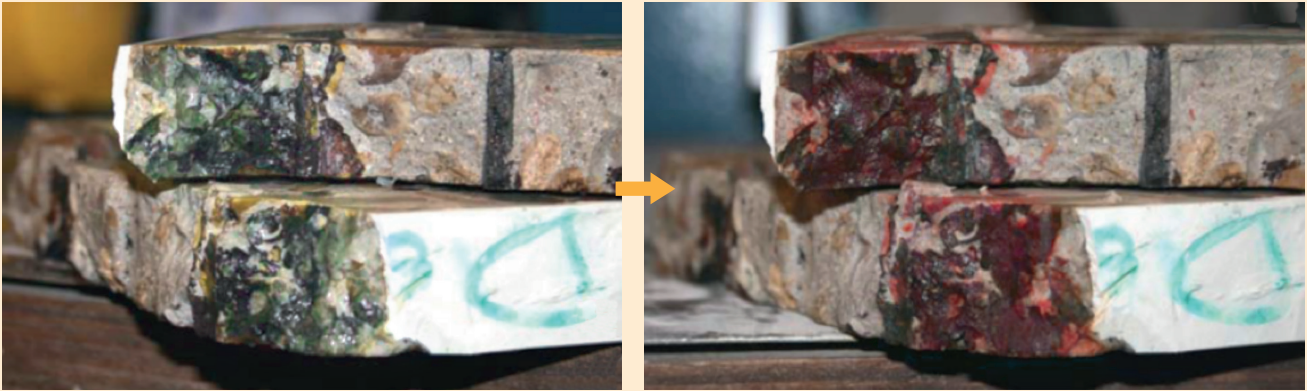


Fig. 125. Rouille verte (à gauche) réoxydée après deux heures à l'air (devient rouge, à droite).

La conversion du fer métallique en oxyde ferrique (rouille) entraîne une augmentation de volume. L'augmentation de volume peut provoquer des fissures, des éclats et même un délaminage dans le béton. Cependant, le béton d'enrobage peut parfois se désintégrer avant que tout signe de détérioration ne soit visible à la surface du béton. Outre la fissuration et l'écaillage, la corrosion entraîne une réduction de la section des armatures, une ductilité réduite et une altération de l'interface entre le béton et l'acier.

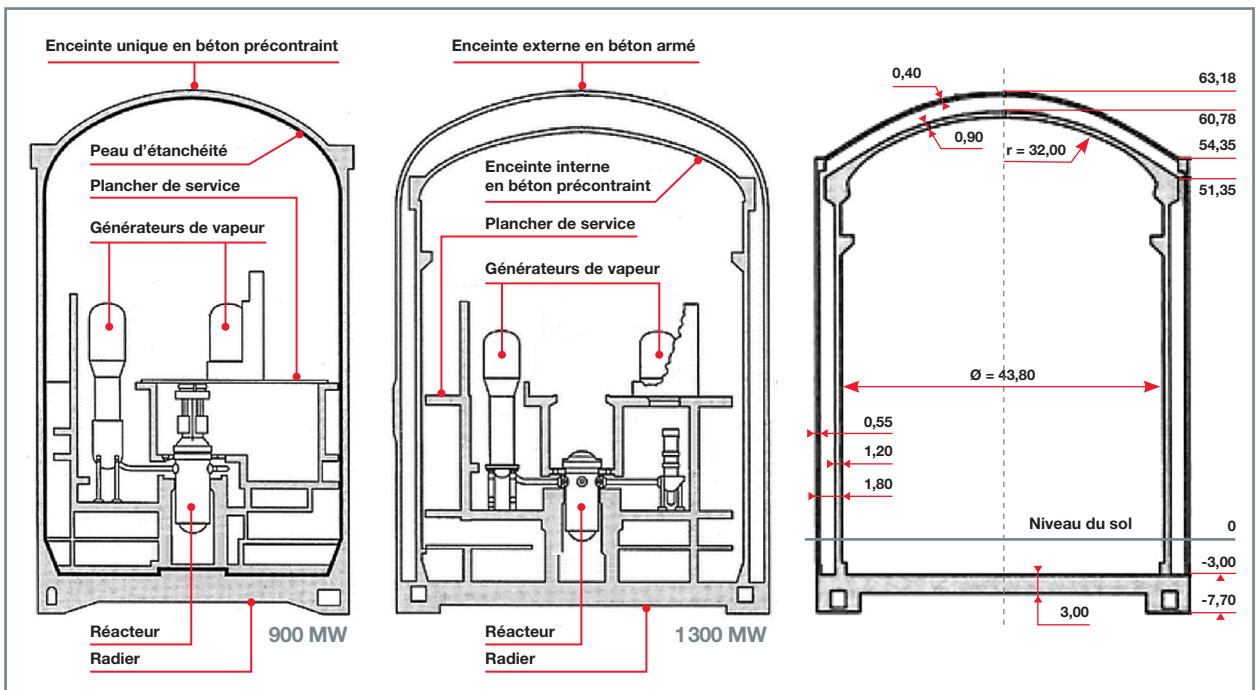


Fig. 126. Enceintes de confinement simple paroi (à gauche) et double paroi (au centre) et dimensions caractéristiques d'une enceinte à double paroi (à droite) [1].

## Évaluation du comportement mécanique des enceintes de confinement

Les dimensions de l'enceinte de confinement et son rôle joué dans la sûreté du réacteur empêchent presque toute expérimentation sur site qui pourrait mettre en jeu son intégrité (solicitations additionnelles, carottage...). Le recours à l'outil numérique est donc privilégié pour évaluer le comportement mécanique et son évolution dans le temps. Atteindre ces objectifs nécessite néanmoins de résoudre deux problèmes *a priori* difficilement compatibles : caractériser une information locale (l'endommagement ou l'ouverture de fissure – ordre de grandeur caractéristique proche de la dizaine de micromètres) avec des outils applicables à l'échelle d'une structure de grandes dimensions (grandeur caractéristique supérieure

à la dizaine de mètres). L'exemple de l'application directe de modèles d'endommagement à une maquette d'enceinte de confinement de réacteurs indiens (voir fig. 127) illustre bien cette difficulté. Si le comportement mécanique global peut être correctement reproduit par la simulation (pression maximale admissible, déformée globale...), il est difficile, à cette échelle, de définir l'état de fissuration à partir de la seule distribution de variables internes (voir fig. 128). Au mieux, une information moyennée à l'intérieur d'un élément de maillage (taille caractéristique de plusieurs centimètres) est obtenue, mais cette information n'est pas suffisante pour garantir une bonne description des transferts hydrauliques. Ainsi, la caractérisation du comportement mécanique à l'échelle d'une enceinte de confinement et, par conséquent, l'évaluation de son degré d'étanchéité supposent très logiquement le recours à une stratégie de modélisation multi-échelle.

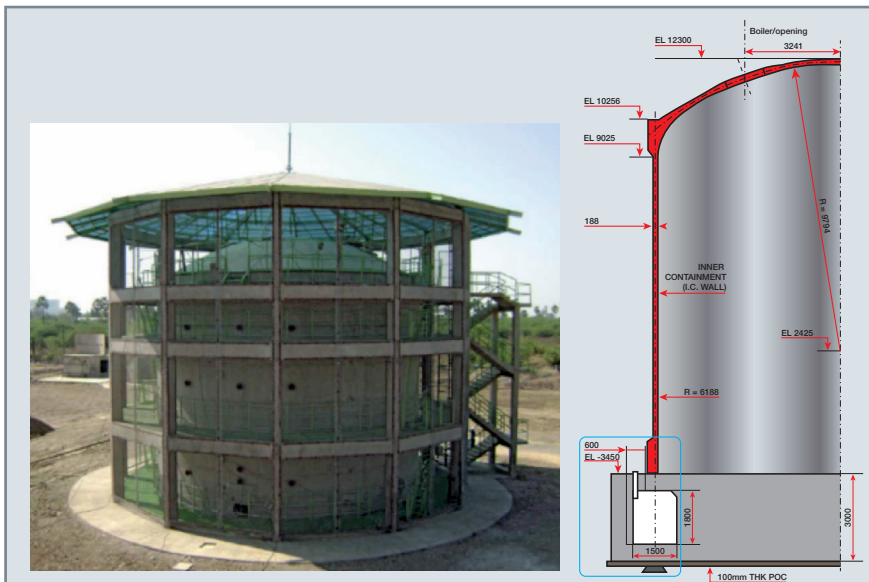


Fig. 127. Maquette de confinement indienne [5].

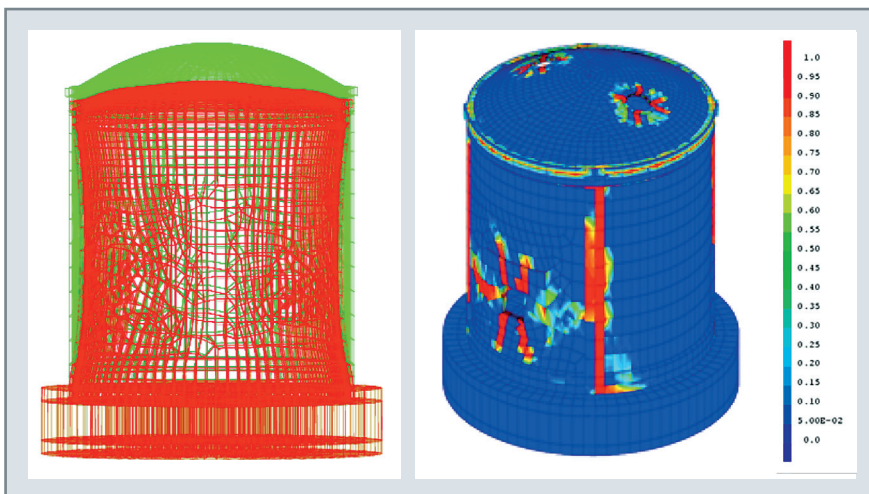


Fig. 128. Résultats de simulation par application d'un modèle d'endommagement directement à l'échelle de la maquette d'enceinte de confinement indienne (Cast3M).

En s'appuyant sur la nature même du matériau, plusieurs échelles peuvent alors être définies (voir fig. 129), en fonction de la finesse des phénomènes étudiés et en partant de la structure industrielle cible :

- L'échelle de la structure de référence, ici l'enceinte de confinement de centrales nucléaires (taille caractéristique supérieure à la dizaine de mètres). À cette échelle, les outils numériques visent essentiellement à caractériser le comportement global de la structure, car les coûts numériques sont prohibitifs pour une caractérisation fine de la dégradation mécanique ;
- l'échelle de l'élément de structure (taille caractéristique de l'ordre du mètre) pour laquelle il devient possible d'utiliser des approches numériques représentatives et robustes. Les modèles restent globaux, mais peuvent inclure les interactions entre les différents composants (évolution de la liaison entre l'acier et le béton dans le cas du béton armé par exemple) ;
- l'échelle de l'éprouvette de laboratoire (taille caractéristique de l'ordre de la dizaine de centimètres) à partir de laquelle les modèles globaux peuvent être calibrés. Il s'agit typiquement de l'échelle de l'écriture et de la validation des lois de comportement macroscopiques ;



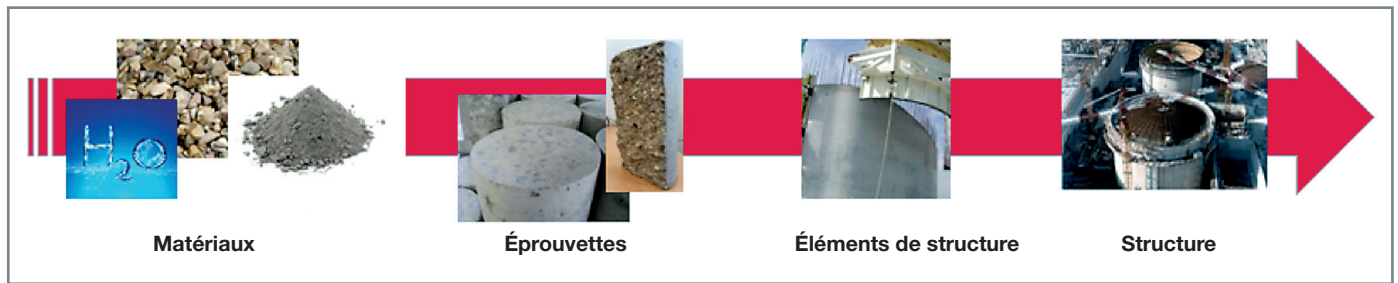


Fig. 129. Définition des différentes échelles – du matériau à la structure industrielle.

- enfin l'échelle du composant du matériau (ou échelle mésoscopique) essentiellement utilisée pour l'identification des mécanismes locaux, la compréhension de la physique ou l'aide à la calibration des lois d'évolution macroscopiques.

### De l'enceinte de confinement vers son volume structurel représentatif (VSR)

Compte tenu des dimensions significatives de l'enceinte de confinement, l'un des enjeux majeurs est donc de réduire numériquement la taille du système afin de passer de l'échelle de la structure de référence à celle de l'élément de structure (voir fig. 130).

Pour cela, différentes approches peuvent être envisagées. Par exemple, la décomposition de domaines, combinée à l'utilisation de techniques de parallélisation [6] permet de calculer simultanément plusieurs volumes structurels qui sont ensuite « réassemblés » pour obtenir la réponse complète. Le coût numérique est donc globalement réduit par l'utilisation de la parallélisation. Toutefois, dans certaines situations, cette solution peut ne pas être optimale, car elle suppose le calcul du comportement mécanique sur l'ensemble de la structure. Or, dans le cas de l'évaluation de la fuite par des fissures localisées, la zone concernée par le

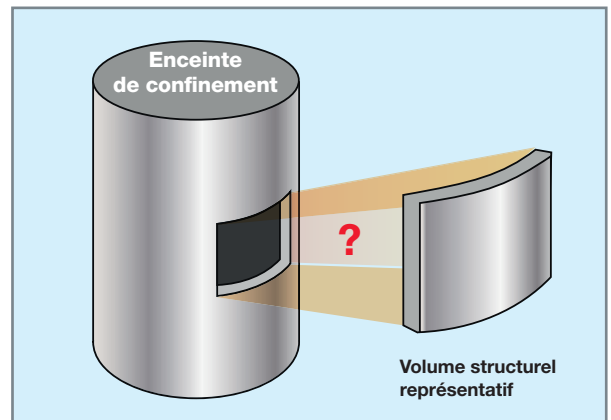


Fig. 130. Principe d'élément de structure d'une enceinte de confinement de centrales nucléaires.

comportement non linéaire est spatialement limitée. Il est donc « inutile » de modéliser le comportement mécanique sur la totalité de la structure pour concentrer l'effort numérique sur la ou les zones d'intérêt (zone de développement de la fissuration). C'est le principe de la méthode de condensation statique adaptative [7], résumé dans la figure 131. Cette méthode s'appuie sur une décomposition de la structure en zones d'intérêt et en zones condensées. Les degrés de liberté des zones condensées sont « éliminés » en utili-

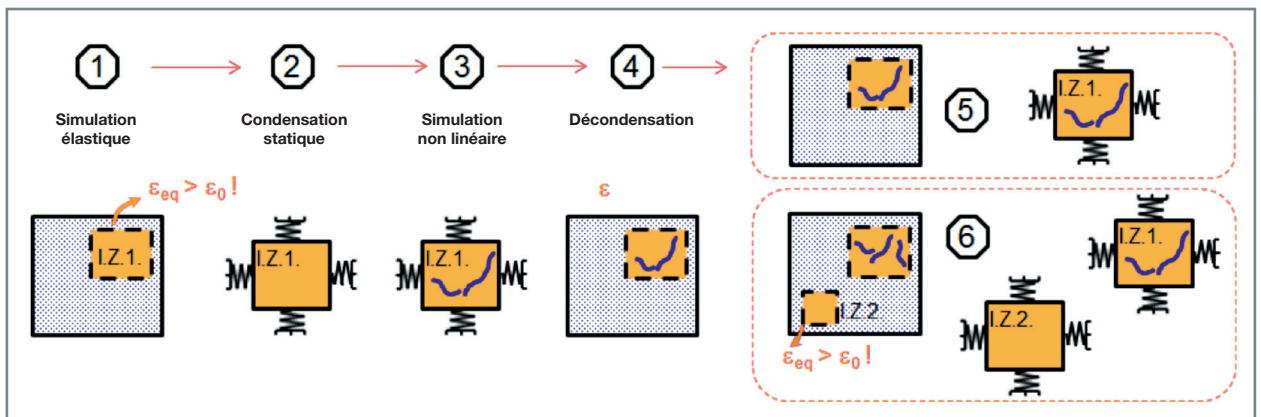


Fig. 131. Principe de la méthode de condensation statique adaptative. « I.Z. » désigne les zones d'intérêt.



Fig. 132. Condensation statique adaptative appliquée à un modèle d'enceinte simplifiée sous chargement de pression au-delà de la pression de dimensionnement. Évolution de la distribution d'endommagement. Les zones grisées sont les zones condensées [9].

sant la **méthode de condensation statique** [8] et en définissant des rigidités et des chargements équivalents aux frontières de la zone d'intérêt. En cours de calcul, des critères de propagation et d'apparition de nouvelles zones sont testés. Si l'un ou plusieurs de ces critères sont vérifiés, le système évolue avec l'apparition de nouvelles zones d'intérêt. C'est le côté « adaptatif » de la méthode qui est ici mis en avant. Dans ces conditions, il devient alors possible de simuler le comportement mécanique de la structure en limitant significativement le coût numérique. La figure 132 illustre les résultats obtenus sur un modèle d'enceinte simplifiée mise en pression. Seul le comportement non linéaire des zones colorées (distribution d'endommagement) est réellement calculé, diminuant ainsi la charge et le temps de calcul complet. Sur cette figure, on observe une concentration de la dégradation mécanique autour des ouvertures qui représentent autant d'hétérogénéités géométriques.

### Les lois de comportement pour le béton et la caractérisation de la fissure

À ce stade, il est donc possible, sous réserve d'utiliser une méthode adaptée, de se ramener à l'étude d'un élément de structure de dimensions métriques. À cette échelle, l'enjeu est de disposer des outils adaptés à une bonne caractérisation de la dégradation mécanique du béton. Parmi les différentes approches disponibles (modèles discrets [10], cohésifs [11]...), le choix est fait ici de retenir la mécanique de l'endommagement. En dehors de sa large utilisation dans la littérature, elle présente l'avantage de pouvoir simuler à la fois l'apparition de la dégradation mécanique et sa propagation (sous réserve de méthodes particulières définissant les caractéristiques d'une fissure à partir d'un champ d'endommagement). De plus, contrairement à d'autres approches (éléments discrets ou éléments cohésifs par exemple), elle ne nécessite pas une connaissance *a priori* du mode de rup-

ture (dépendance de la position des fissures à la position des éléments cohésifs, dédoublement des nœuds sur le trajet de la fissure ou recours à des techniques de remaillage parfois complexes).

Les modèles d'endommagement connaissent un véritable essor depuis plus de trente ans : modèles isotropes [12], orthotropes [13], couplés à des déformations irréversibles, à des déformations plastiques [14] ou à des glissements internes [15]. Devant une telle offre de modèles, le choix se fait généralement sur le compromis entre complexité (nombre de paramètres à calibrer, facilité de convergence) et représentativité (qualité de la modélisation des phénomènes physiques).

Chaque modèle est associé à une fonction seuil, à partir de laquelle le béton n'a plus un comportement élastique, et à une loi d'évolution (associé à des mécanismes dissipatifs) permettant de définir le comportement du matériau dans un chargement au-delà de son seuil d'élasticité [16]. Le processus de calibration, conduisant à l'identification des paramètres de la loi de comportement, passe par la comparaison entre des réponses expérimentales et les résultats de simulation sur un ensemble de cas tests dits « élémentaires » (parmi lesquels la compression uniaxiale, la traction directe ou par fendage ou la flexion trois points). Cette première analyse peut être complétée par des chargements plus complexes (essai biaxial, triaxial...), jusqu'à définir le domaine de validité de chaque modèle (domaine sur lequel le modèle est capable de reproduire la réponse expérimentale ; voir fig. 133). Cette méthodologie peut alors être généralisée jusqu'à proposer une stratégie de validation des lois de comportement sur la base d'un ensemble de cas tests expérimentaux de référence [17], la seule donnée des réponses uniaxiales ne pouvant suffire à estimer la représentativité de la loi.

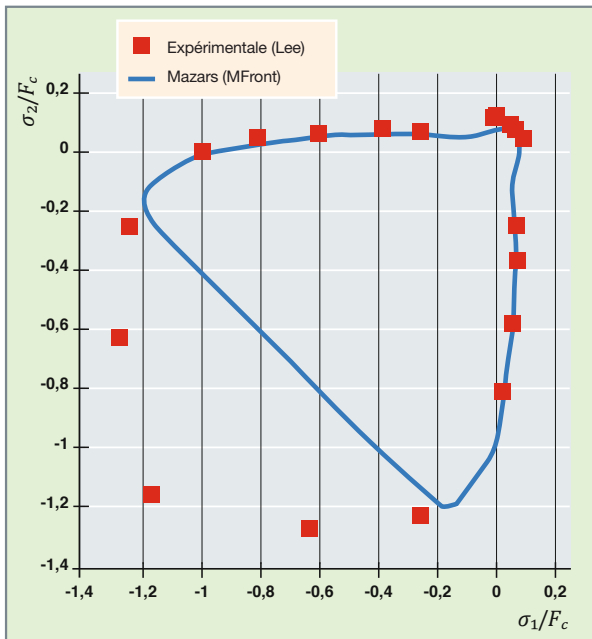


Fig. 133. Comparaison des résistances en chargement biaxial (chargement proportionnel dans les directions 1 et 2). Modèle de Mazars [12] et réponse expérimentale d'après [18].  $F_c$  correspond à la résistance en compression.

Concernant la caractérisation de la dégradation mécanique du béton, on citera également, sans les développer, trois verrous scientifiques d'intérêt :

- L'utilisation et la calibration des méthodes de régularisation. La localisation des déformations, inhérente à l'utilisation de modèles d'endommagement adoucissant, requiert l'utilisation de méthodes de régularisation pour garantir une réponse objective (voir fig. 134). Qu'elles soient à gradient ou non locales [19] [20], elles introduisent généralement une longueur interne afin d'obtenir une simulation indépendante de la finesse et de la direction du maillage. En dehors de leur coût numérique d'utilisation toujours problématique aujourd'hui, la question de la calibration de cette longueur interne reste posée.

Rattachée à la taille de la « process zone » [21], forfaitairement définie à partir de la taille du plus gros granulat (deux à trois fois le diamètre) ou plus rarement calibrée à partir d'essais de flexion sur éprouvettes de différentes dimensions [22], elle peut prendre, dans la littérature, une large plage de valeurs (de quelques millimètres à quelques centimètres) témoignant de la difficulté d'une détermination *a priori* de cette quantité ;

- la caractérisation des propriétés de fissure à partir d'un modèle d'endommagement. Si les modèles d'endommagement permettent généralement de reproduire l'apparition et la propagation de zones dégradées, il est difficile d'obtenir directement des informations quantitatives sur la fissuration (ouverture de fissure par exemple), pourtant nécessaires à la caractérisation des écoulements. Pour y parvenir, deux alternatives principales existent. La première solution consiste à utiliser un modèle d'endommagement pour décrire l'apparition de la dégradation mécanique. Il est ensuite combiné à des techniques plus adaptées à la propagation (par exemple, une méthode « XFem » [23]). Une seconde solution, d'application plus directe, est de post-traiter les résultats de la simulation utilisant le modèle d'endommagement, sans considérer explicitement la discontinuité du champ du déplacement. L'analyse des résultats peut se baser sur la distribution de la variable d'endommagement, de la déformation ou du déplacement (introduction d'une déformation de fissuration [24], évaluation par post-traitement à partir du glissement acier-béton [25]...). Quelle que soit la méthode envisagée, il devient alors possible de remonter aux caractéristiques de la dégradation mécanique, à la fois en régime homogène (microfissuration) et localisé (fissure) ;
- la prise en compte à l'échelle structurelle des interactions entre l'acier et le béton. Classiquement, l'introduction de barres d'acier dans le béton vise à fournir à l'ensemble une résistance à la traction supérieure à celle du béton seul et un comportement plus ductile. En cas de fissuration du béton, les renforts permettent un transfert de contraintes du béton vers l'acier, puis une redistribution des contraintes

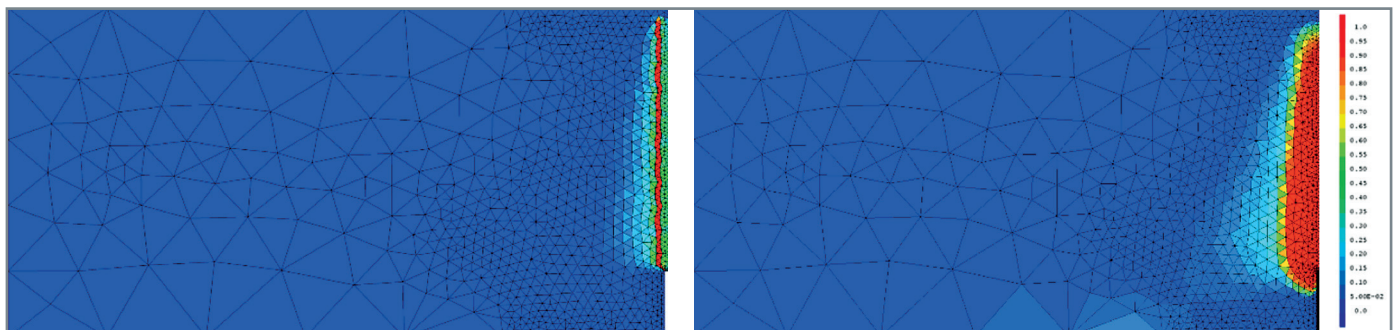


Fig. 134. Poutre en béton entaillée. Distribution d'endommagement avec modèle d'endommagement local (à gauche) et régularisé (à droite).

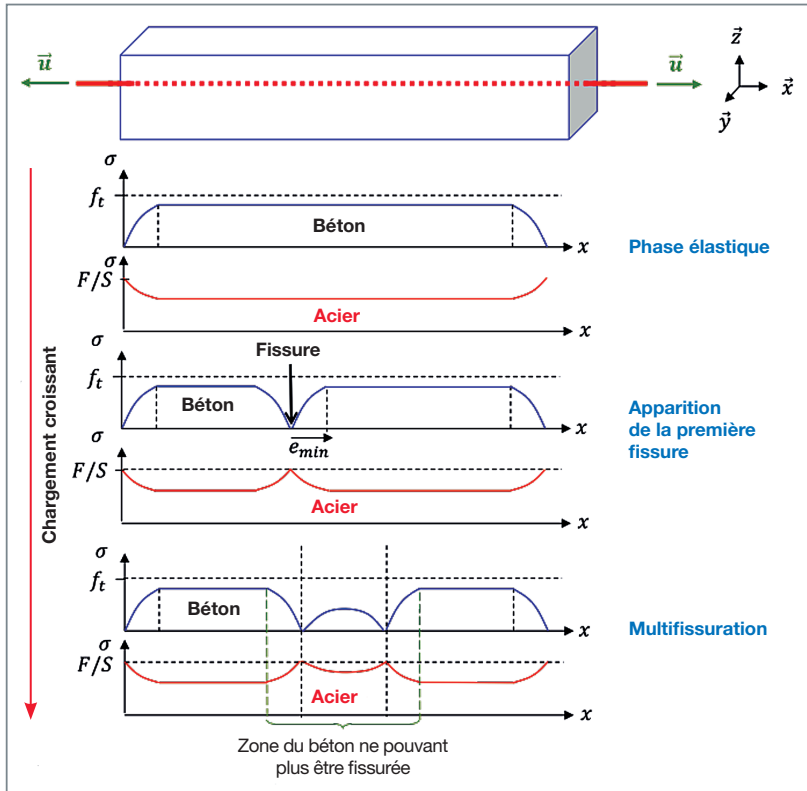


Fig. 135. Évolution des contraintes dans un tirant en béton armé avec le chargement. Effet de l'interface acier-béton.

d'évolution reliant la contrainte d'adhérence au glissement acier-béton [26]. Compte tenu de la complexité de ces lois d'entrée, généralement empiriques [27], le recours à l'échelle mésoscopique peut être envisagé afin de mieux comprendre les phénomènes locaux et aider à la calibration du modèle d'interface (voir fig. 137).

## Évaluation des transferts de fluide dans les enceintes de confinement

Le calcul mécanique à l'échelle de l'élément de structure permet de disposer de la distribution de l'endommagement, à partir de laquelle il est possible, moyennant l'utilisation de techniques adaptées, de déterminer les caractéristiques de la fissuration (ouverture et espacement des fissures notamment). Pour la caractérisation de la fuite, deux régimes d'écoulement sont alors définis : le régime diffus associé à une dégradation mécanique de type microfissuration et le régime d'écoulement localisé associé à l'apparition de macrofissure.

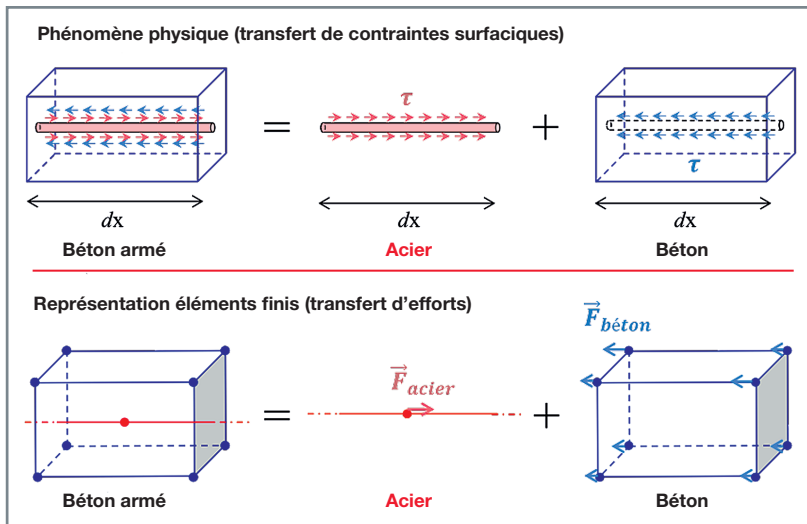


Fig. 136. Principe du modèle d'interface 1D-3D [28].

autour de la fissure de l'acier vers le béton (voir fig. 135). Ainsi, une modélisation adaptée des interactions entre les deux matériaux est nécessaire si les propriétés de fissuration (ouverture et espacement) veulent être correctement représentées. La prise en compte de ces mécanismes à l'échelle de l'élément de structure requiert l'utilisation de modèles simplifiés, une représentation explicite de l'interface acier-béton étant difficilement atteignable (complexité des maillages, coût numérique...). Les plus fréquents sont des éléments d'interface (voir fig. 136), associés à des lois

Dans le premier cas (régime diffus), des équations thermo-hydro (et/ou hygro) mécaniques (THM) sont classiquement résolues. Les propriétés de transfert (la perméabilité notamment) varient en fonction de la dégradation mécanique (loi endommagement-perméabilité [30] ou relation entre la perméabilité et la densité de microfissuration [31]). Ces techniques sont particulièrement adaptées avant que des fissures localisées n'apparaissent. Moyennant un certain nombre d'hypothèses sur la nature et l'écoulement du gaz présent, le système d'équations [32] peut être ramené à une



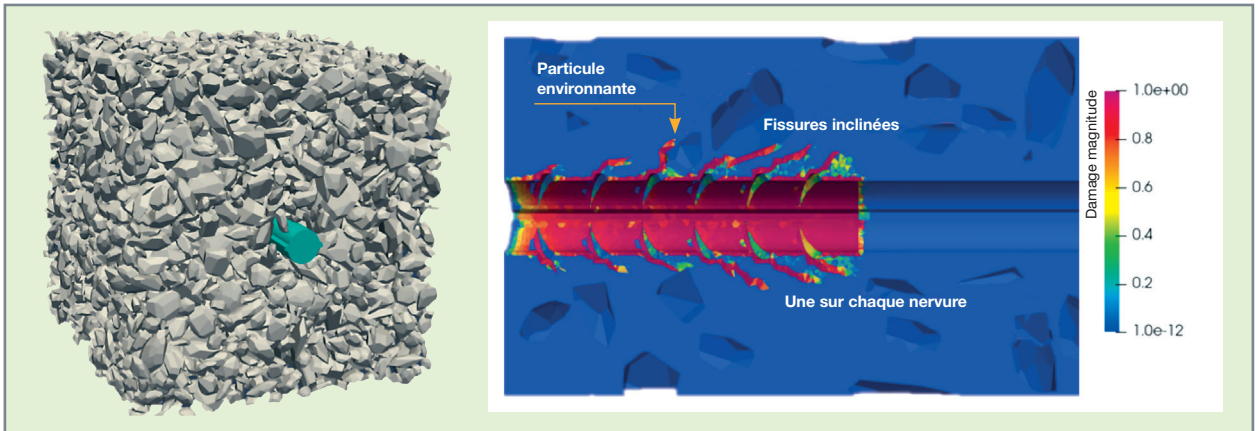


Fig. 137. Simulation d'un essai d'arrachement de barre d'acier à l'échelle mésoscopique. À gauche, illustration de la structure modélisée, à droite, exemple de distribution d'endommagement [29].

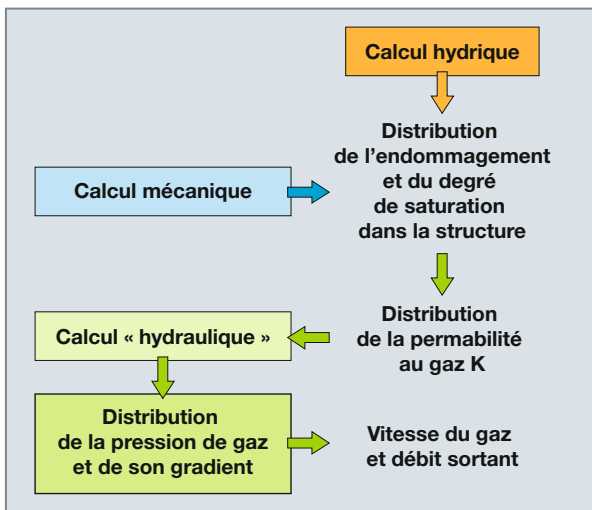


Fig. 138. Principe de la simulation du comportement hydraulique par l'approche diffuse.

seule équation, analogue dans sa forme à de la thermique non linéaire. Cette dernière fait intervenir la vitesse du gaz, calculée par la loi de Darcy et fonction de la perméabilité au gaz, elle-même fonction du degré de saturation du matériau et de l'endommagement mécanique. En suivant la méthodologie de la figure 138, basée sur l'enchaînement de calculs hydriques (pour déterminer le degré de saturation), mécanique (pour l'endommagement) et hydraulique (résolution de l'équation d'écoulement), sans couplage, il devient possible de définir, en tout point et en tout instant, la distribution de la pression de gaz à l'intérieur de la structure (voir fig. 139), à partir de laquelle est défini le débit sortant.

Une fois des macrofissures traversantes formées, des approches discrètes sont généralement préférées pour évaluer le débit en régime localisé. Le flux est alors défini comme une fonction des caractéristiques de la macrofissure (loi de Poiseuille en cube de l'ouverture de fissure par exemple [33]).

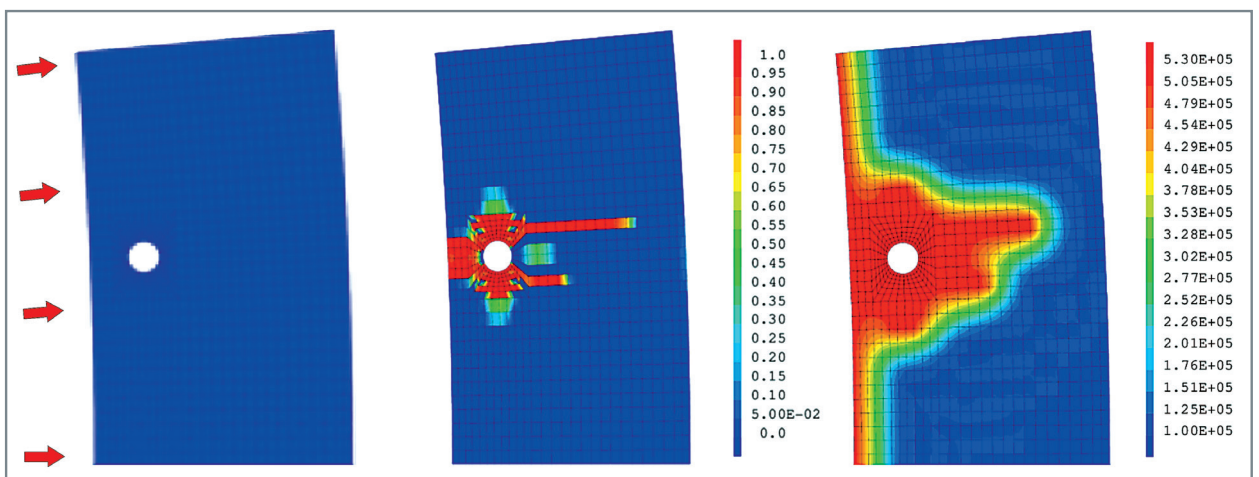


Fig. 139. Application de la méthodologie de calcul « régime diffus » à un volume structurel représentatif d'enceinte. Principe de chargement en pression (à gauche), distribution d'endommagement mécanique (au centre) et distribution de pressions de gaz (à droite).

L'équation générale fait intervenir un coefficient de perte par frottement qui tend notamment à représenter les effets de tortuosité et de rugosité de la fissure qui diminuent le débit sortant par rapport à l'hypothèse de plans lisses. Pour le déterminer, des formules empiriques sont généralement établies sur la base de résultats d'essais à gammes de pression et d'ouverture de fissure données, avec des enjeux autour de la définition d'une ouverture de fissure équivalente le long du trajet de fissuration ou de représentativité du coefficient de frottement.

Dans les deux situations présentées, les outils utilisés font partie de la famille des approches globales, par nature simplifiées, mais directement applicables à l'échelle de l'élément de structure. Comme pour le comportement mécanique, elles peuvent être complétées et alimentées par des approches plus raffinées et généralement plus locales, intégrant la physique des couplages (élément joint thermo-hydro-mécanique par exemple [34]) ou décrivant plus finement la géométrie de la fissure (méthode des éléments discrets par exemple, incluant directement la simulation de la rugosité et de la tortuosité de la fissure).

## Conclusions et perspectives

Les grandes dimensions des enceintes de confinement de centrales nucléaires nécessitent donc le recours à des stratégies de changement d'échelle pour atteindre une caractérisation fine de leur potentielle dégradation mécanique, et des écoulements de fluides sous-jacents. Sous réserve de se ramener à des volumes structurels représentatifs (éléments de structure métriques), il devient possible d'utiliser des modèles de comportement mécaniques qui, associés à des lois d'écoulement empiriques ou plus élaborées, rendent

accessibles une bonne caractérisation des transferts dans le béton. Les degrés de couplage thermo-hygro-hydro-mécaniques à considérer dépendent essentiellement de la nature du fluide (air sec, vapeur) et du scénario de chargement considéré (fonctionnement nominal, accident de perte de réfrigérant primaire, accidents graves...).

Compte tenu de la complexité des phénomènes physiques, tant du point de vue de la mécanique (séchage, retrait, fluage, relaxation des câbles de précontrainte...) qu'hydraulique (interaction entre le fluide et le béton dans le cas d'un écoulement vapeur par exemple), les maquettes expérimentales à échelle réduite restent une opportunité unique pour la validation des outils numériques. On citera, sans être exhaustif, les maquettes SANDIA [35], MAEVA, BARCOM [5] ou plus récemment VERCORS [36]. La richesse de l'instrumentation associée à ces maquettes (500 capteurs et 2 km de fibres optiques dans le cas de la maquette VERCORS) permet une évaluation exhaustive de la qualité des modélisations mises en œuvre. Au-delà, elles permettent d'alimenter la réflexion autour de la nécessaire communication entre l'essai et la simulation jusqu'à la proposition d'approches de type jumeaux numériques, dont la construction et l'utilisation pour le suivi d'ouvrages restent un enjeu majeur.

**Ludovic JASON,**

*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*

**et Valérie L'HOSTIS,**

*Direction des Programmes Énergies*



Fig. 140. Exemples de maquette d'enceinte de confinement. Maquette SANDIA (à gauche) [35] et VERCORS (à droite).

## ► Références

- [1] J.-L. COSTAZ, « Confinement. Enceintes », dossier *Techniques de l'ingénieur*, 1997.
- [2] V. L'HOSTIS, E. AMBLARD, C. BLANC, F. MISERQUE, C. PARIS and L. BELLOT-GURLET, "Passive corrosion of steel in concrete in context of nuclear waste disposal", *Corrosion engineering, science and technology*, Vol. 42, n° 2, 2011.
- [3] T. LIU and R.W. WEYERS, "Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures", Vol. 28, n° 3, 1998.
- [4] U. ANGST, B. ELSENER, C.K. LARSEN and Ø. VENNESLAND, "Critical chloride content in reinforced concrete – A review", *Cement and Concrete Research*, Vol. 39, n° 12, 2009.
- [5] BARC, "Containment Model Round Robin Analysis", *Model Documents*, Mumbai, India, 2007.
- [6] A. K. NOOR, "Parallel processing in finite element structural analysis", *J. Engineering with Computers*, Vol. 3, n° 4, pp. 225-241, 1988.
- [7] A. LLAU, L. JASON, J. BAROTH and F. DUFOR, "Adaptive zooming method for the analysis of large structures with localized nonlinearities", *Finite Elements in Analysis and Design*, 106, pp. 73-84, 2015.
- [8] R.J. GUYAN, "Reduction of stiffness and mass matrices", *AIAA Journal*, 3, 380, 1965.
- [9] A. MEZHER, L. JASON, G. FOLZAN and L. DAVENNE, "New adaptive static condensation method for the simulation of large dimensions prestressed reinforced concrete structures", COMPLAS 2021, Barcelone, 2021.
- [10] H.D. BUI, *Mécanique de la rupture fragile*, Masson, Paris, 1978.
- [11] G.I. BARENBLATT, "The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture", *Advanced Applied Mechanics*, 7, 55-129, 1962.
- [12] J. MAZARS, *Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure*, thèse d'État, université Pierre-et-Marie-Curie, 1984.
- [13] S. FICHANT, C. LA BORDERIE and G. PJAUDIER-CABOT, "Isotropic and anisotropic descriptions of damage in concrete structures", *Mechanics of Cohesive Frictional Materials*, 4, 339-359, 1999.
- [14] L. JASON, A. HUERTA, G. PJAUDIER-CABOT and S. GHAVAMIAN, "An elastic plastic damage formulation for concrete. Application to elementary tests and comparison with an isotropic damage model", *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195, 52, 7077-7092, 2006.
- [15] L. ADELAIDE, B. RICHARD, F. RAGUENEAU and C. CREMONA, "Thermodynamic admissibility of a set of constitutive equations coupling elasticity, isotropic damage and internal sliding", *Comptes rendus de mécanique*, 338, 1, 158-163, 2010.
- [16] B. RICHARD et C. GIRY, « Lois de comportement en calculs de structure – Identification et utilisation », *Techniques de l'ingénieur*, 2019.
- [17] L. JASON, S. GHAVAMIAN, G. PJAUDIER-CABOT and A. HUERTA, "Benchmarks for the validation of a non local damage model", *Revue française de génie civil*, 8, pp. 303-328, 2004.
- [18] S.K. LEE, Y.C. SONG and S.H. HANG, "Biaxial behavior of plain concrete of nuclear containment building", *Nuclear Engineering and Design*, 227 2, pp. 143-153, 2004.
- [19] R.H.J. PEERLINGS, R. DE BORST, W.A.M. BREKELMANS, J.H.P. DE VREE and I. SPEE, "Some observations on localization in non-local and gradient damage models", *European Journal of Mechanics A/Solids*, 15, 937-953, 1996.
- [20] G. PJAUDIER-CABOT and Z.P. BAZANT, "Nonlocal damage theory", *Journal of Engineering Mechanics*, 113, 1512-1533, 1987.
- [21] Z.P. BAZANT, "Instability, ductility and size effect in strain softening concrete", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 102, 331-344, 1976.
- [22] C. LE BELLEGO, J.-F. DUBÉ, G. PJAUDIER-CABOT, B. GÉRARD, "Calibration of non local damage model from size effect tests", *European Journal of Mechanics A/Solids*, 22, 33-46, 2003.
- [23] C. COMI, S. MARIANI, U. PEREGO, "An extended FE strategy for transition from continuum damage to mode I cohesive crack propagation", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 31, 2, pp. 213-238, 2007.
- [24] M. MATALLAH, C. LA BORDERIE and O. MAUREL, "A practical method to estimate crack opening in concrete structures", *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 34, 1615-1633, 2009.
- [25] C. MANG, L. JASON and L. DAVENNE, "Crack opening estimate in reinforced concrete walls using a steel-concrete bond model", *Archives of civil and mechanical engineering*, 16, pp. 422-436, 2016.
- [26] C. MANG, L. JASON, L. DAVENNE, "A new bond slip model for reinforced concrete structures: Validation by modelling a reinforced concrete tie", *Engineering Computations*, 32, 7, pp. 1934-1958, 2015.
- [27] C. TURGUT, L. JASON, L. DAVENNE, "Structural-scale modeling of the active confinement effect in the steel-concrete bond for reinforced concrete structures", *Finite Element in analysis and Design*, 72, 2020.
- [28] A. CASANOVA, L. JASON, L. DAVENNE, "Bond slip model for the simulation of reinforced concrete structures", *Engineering Structures*, 39, pp. 66-78, 2012.
- [29] M. ABBAS, B. BARY and L. JASON, "Mesoscopic Modelling of the Behaviour of Interfaces between Reinforcing Steel and Concrete", COMPLAS 2021, Barcelone, 2021.
- [30] V. PICANDET, A. KHELIDJ and G. BASTIAN, "Effect of axial compressive damage on gas permeability of ordinary and high performance concrete", *Cement Concrete Research*, 31, 1525-1532, 2001.
- [31] B. BARY, G. RANC, S. DURAND and O. CARPENTIER, "A coupled thermo-hydro-mechanical-damage model for concrete subjected to moderate temperatures, International Journal of Heat and Mass Transfer", 51, 2847-2862, 2008.
- [32] L. JASON and B. MASSON, "Comparison between continuous and localized methods to evaluate the flow rate through containment concrete structures", *Nuclear Engineering and Design*, 277, pp. 146-153, 2014.
- [33] H. SIMON, G. NAHAS, N. COULON, "Air-steam leakage through cracks in concretewalls", *Nuclear Engineering and Design*, 237, 1786-1794, 2007.

[34] A. MILLARD et L. JASON, *Projet MACENA : Bilan des activités 2017*, rapport interne CEA, NT-2017-62063, 29 pages, 2017.

[35] SANDIA NATIONAL LABORATORIES, *Overpressurization Test of a 1:4-Scale Prestressed Concrete Containment Vessel Model*, NRC Publications, 2003.

[36] EDF, *Présentation du troisième benchmark VERCORS*, 2021.





## Gestion des transitoires incidentels : l'exemple du gerbage dans les réacteurs de quatrième génération et du couplage entre codes

Ce chapitre s'intéresse à l'étude du gerbage dans les réacteurs de quatrième génération et au nécessaire couplage entre la neutronique et la mécanique des structures. Il est ainsi l'occasion de mettre en avant le développement de simulations multi-physiques couplées pour le traitement et l'analyse de situations incidentelles. Le recours à ces couplages est le résultat d'une triple évolution : évolution des solveurs disciplinaires dans le sens d'une amélioration de leur capacité prédictive, évolution de l'environnement informatique caractérisée par une puissance de calcul croissante, évolution des architectures logicielles propice à la mise en œuvre de nouvelles méthodologies de couplage, avec à la clé une normalisation des pratiques. Les simulations multi-physiques dont il est question ici sont largement caractérisées par la mise en regard de solveurs disciplinaires, au sens où chaque solveur traite d'une physique spécifique et constitue de ce fait le noyau numérique d'un outil de simulation dédié. C'est le cas pour la mécanique des structures, intégrée comme ingrédient pour la résolution de phénomènes multi-physiques plus complexes. Dans ce chapitre sera présentée une application du couplage neutronique-mécanique des structures pour la gestion de transitoires de type arrêts d'urgence sur réactivité négative (AU/RN).

### Introduction sur la neutronique

La neutronique s'intéresse au comportement des neutrons dans un réacteur nucléaire et à leurs interactions avec la matière. En particulier, elle cherche à décrire la réaction en chaîne nucléaire et le dégagement de puissance associé. La matière est relativement transparente aux neutrons : entre deux interactions avec le milieu environnant, ils effectuent un vol rectiligne de l'ordre du centimètre dans les REP et de l'ordre de la dizaine de centimètres dans les RNR-Na. Ils explorent donc leur milieu environnant à une échelle macroscopique et leur comportement dépend donc de la géométrie macroscopique des objets qu'ils traversent. Il en découle que les déformations géométriques de ces objets, décrites par la mécanique des structures, impactent au premier ordre les grandeurs neutroniques.

### L'exemple de l'expérience Godiva

Godiva est une expérience américaine des années 1950, dont l'objet est l'étude du comportement neutronique d'un système surcritique. Les informations données ici sont extraites du compte rendu de l'expérience [1]. Le dispositif considéré est une sphère d'uranium métallique très enrichie en uranium 235. Ses propriétés sont données dans le tableau 5.

Tableau 5.

Paramètres principaux de l'expérience Godiva.	
Rayon	8,7407 cm
Enrichissement en U5	93,5 %
Densité	18 740 kg.m <sup>-3</sup>
Module d'Young	208 GPa
Coefficient de Poisson	0,23
Coefficient de dilatation thermique	1,39 × 10 <sup>-5</sup> K <sup>-1</sup>
Conductivité	27,5 W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>
Capacité thermique spécifique	117,7 J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>

Une photo de l'expérience est donnée en figure 141. On voit que la sphère est en trois morceaux, pour limiter le risque de criticité pendant les phases de manutention. La réactivité peut être ajustée en ajoutant des pastilles d'uranium à sa surface. Enfin, quand la sphère est formée, il est encore nécessaire d'insérer un barreau d'uranium en son centre pour atteindre la criticité.

Godiva a servi à l'observation d'excursions de puissance. La sphère est rendue surcritique soudainement, ce qui provoque un dégagement de puissance, une élévation de température et une dilatation thermique, laquelle étouffe la réaction en chaîne. Il n'y a pas d'influence directe de la température sur la neutronique ici (ce qu'on appellerait l'effet Doppler en réacteur est inexistant à cause du spectre neutronique extrêmement dur).

L'effet sur la neutronique d'une dilatation uniforme d'un objet homogène peut être évalué analytiquement. Un résultat bien connu en neutronique est que la distance parcourue en moyenne par les neutrons entre deux interactions, notée  $\lambda$ , est inversement proportionnelle à la densité du matériau :

$$\lambda \propto \frac{1}{d}$$

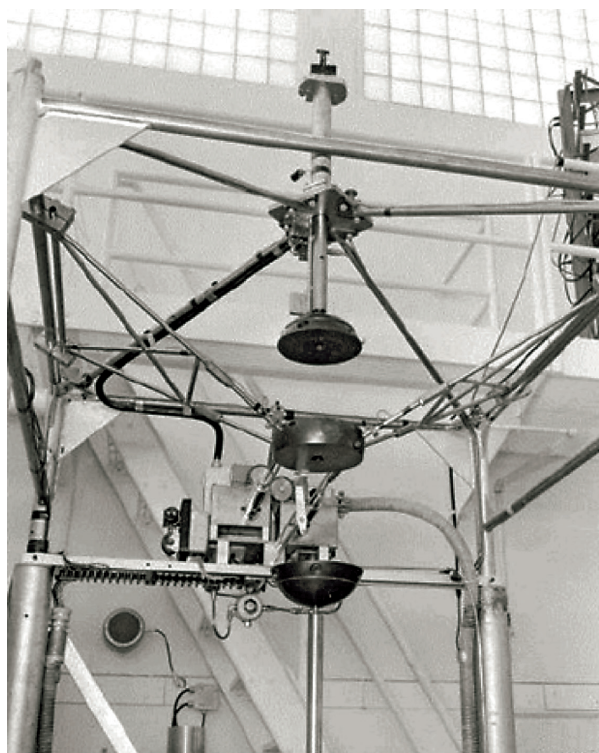


Fig. 141. Une photo de l'expérience Godiva, en position ouverte.

La conservation de la masse nous donne que, lors d'une dilatation, la densité est inversement proportionnelle au volume de l'objet. Il en suit :

$$\lambda \propto V.$$

Cependant les dimensions d'un objet ne varient que comme  $V^{1/3}$  lors d'une dilatation. Ainsi,  $\lambda$  varie plus vite que la taille de l'objet ce qui signifie que les fuites de neutrons augmentent. Ce résultat ne fait qu'exprimer le fait qu'un objet (un noyau) apparaît selon un angle plus petit lorsqu'il s'éloigne de nous (du fait de la dilatation). Il est donc plus probable pour un neutron de le dépasser sans le rencontrer. Dans le cas de l'expérience Godiva, cela veut dire que les neutrons sortent plus facilement du dispositif sans provoquer de fission : la réaction en chaîne tend à diminuer.

L'expérience Godiva est particulièrement bien documentée, et un de ses tirs en particulier est utilisé comme un *benchmark* numérique simple de couplage neutronique – mécanique [2] [3] [4] [5]. Il a été calculé au CEA avec le code Cast3M par un couplage entre des modèles d'élasticité linéaire, de diffusion thermique et de transport simplifié de neutrons (ce dernier ayant été implémenté dans Cast3M au cours d'une thèse [6]). Les résultats sont donnés pour différents pas de temps à la figure 142 et comparés aux données expérimentales dans le tableau 6.

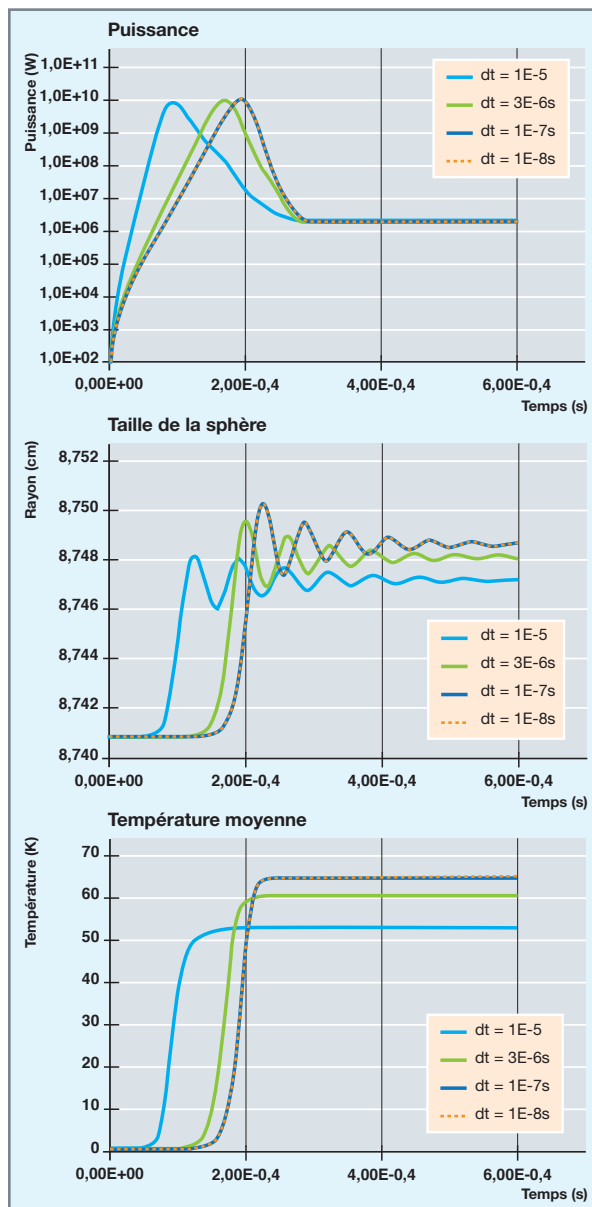


Fig. 142. Évolution temporelle des principales grandeurs de l'expérience Godiva d'après simulation (issue de [6]).

Tableau 6.

Principaux résultats de l'expérience Godiva		
Grandeur	Expérience	Simulation
Période (temps de multiplication par e de la puissance)	11,6 $\mu$ s	11,6 $\mu$ s
Puissance maximale	8,6 GW	10,8 GW
Élévation de température	N/A	65 K
Variation de volume	N/A	0,27 %

L'accord obtenu avec l'expérience est relativement bon. On note la dynamique extrêmement rapide de l'excursion de puissance qui nécessite la prise en compte de phénomènes dynamiques et l'utilisation de pas de temps très fins.



## Le cas des réacteurs au sodium

### Problématique principale

Les cœurs des réacteurs nucléaires sont susceptibles de se déformer par dilatations thermiques, effets d'irradiation des matériaux ou lors d'accidents particuliers comme des séismes. Ces effets, difficiles à calculer avec précision et mineurs dans les réacteurs à eau, sont historiquement maîtrisés par des conservatismes. Les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium (RNR-Na) sont en revanche beaucoup plus sensibles aux déformations mécaniques, du fait de leurs propriétés neutroniques (fuites neutroniques importantes, faible fraction de neutrons retardés, forte irradiation des matériaux) et thermiques (fortes variations possibles des températures lors d'accidents). Sur ces réacteurs, il est donc nécessaire de les prendre en compte explicitement.

Le cœur des RNR-Na est constitué d'assemblages combustibles disposés normalement en un réseau hexagonal régulier compact. En plus des phénomènes naturels, déjà évoqués, pouvant mener à des déformations, des dispositifs d'écartement des assemblages en cas d'augmentation de la température sont actuellement à l'étude pour ce type de réacteurs. Ils visent à améliorer le comportement du cœur dans le cas d'une éventuelle situation accidentelle. Certaines déformations peuvent induire des déplacements relatifs irréguliers des assemblages, ce qui peut amener à une expansion du cœur ou à sa compaction. En particulier, une compaction du cœur pourrait générer des effets en réactivité qui peuvent potentiellement mener à la prompt-criticité. La démonstration de sûreté des RNR-Na repose donc en partie sur la garantie que l'on puisse évaluer de manière fiable la réactivité consécutive à un réarrangement des assemblages du cœur, quelle qu'en soit la cause.

### La simulation numérique de cœurs des RNR-Na déformés

La difficulté principale de la simulation des cœurs déformés est liée au fait que les modèles neutroniques déterministes actuellement utilisés dans les phases de conception de cœur reposent sur une représentation géométrique du cœur en réseau régulier et ne sont donc pas bien adaptés pour traiter des cœurs à arrangements irréguliers.

Les déformations qui ne remettent pas en cause la régularité du réseau sont en revanche relativement aisées à prendre en compte, et le sont déjà classiquement dans les études de sûreté des RNR-Na. Citons, par exemple, l'effet dit du « sommier » qui prend en compte les dilatations thermiques de la pièce, en bas du cœur, dans laquelle les assemblages de combustible sont fixés. Cette déformation est modélisée comme une dilatation régulière du réseau d'assemblage. On peut également mentionner la dilatation axiale du combustible, qui se traduit par un allongement du cœur.

Les déformations irrégulières, plus délicates à prendre en compte, ont fait l'objet de deux thèses au CEA [6] [7]. Ces thèses, menées indépendamment au CEA Cadarache et au CEA Saclay, ont globalement abouti à la même conclusion, l'existence de deux approches possibles :

- **La déformation de maillage** pour suivre la déformation. On conserve ici la définition des milieux de référence et on déforme le maillage de calcul (ou la description géométrique pour un code de Monte-Carlo). Dans le cas d'un code utilisant des éléments finis, la formulation des éléments finis doit s'adapter à la déformation du maillage. Puisque les codes de neutronique ne sont nativement pas prévus pour cela, il est nécessaire soit de les adapter (approche suivie par Gentili dans le solveur SNATCH d'ERANOS [7]), soit d'implémenter une résolution neutronique dans un code éléments finis déjà capable de prendre en compte des déformations (approche suivie par Patricot avec Cast3M, code de mécanique des structures [6]).
- **La projection de la géométrie** sur un maillage de référence non déformé. Dans cette approche, une image déformée du cœur est projetée sur le maillage de référence, ce qui permet l'utilisation des solveurs et méthodes numériques usuels en neutronique. Il est possible de projeter uniquement les compositions isotopiques [7] ou d'y adjoindre également les données nucléaires [6].

Ces deux approches suivies par ces deux thèses ont abouti à quatre outils qui ont été appliqués avec succès au réacteur PHÉNIX.

### Les arrêts d'urgence par réactivité négative dans PHÉNIX

Le réacteur à neutrons rapides PHÉNIX, démarré dans les années 1970, a fait l'objet, en 1989 et 1990, de quatre arrêts d'urgence sur réactivité négative (AU/RN). Une des causes les plus plausibles retenues pour expliquer ce phénomène a été celui d'un mouvement relatif radial des assemblages du cœur (gerbage). La figure 143 illustre un gerbage « libre » autour d'un assemblage légèrement excentré.

### Les essais de gerbage dans PHÉNIX

Les études menées à la suite des AU/RN ont montré que, pour atteindre les niveaux de réactivité déduits des mesures de puissances enregistrées (jusqu'à - 320 pcm), un mouvement centrifuge des assemblages de plusieurs millimètres était nécessaire au niveau du plan médian cœur. Une première campagne d'essais quasi statiques de gerbage du cœur, réacteur critique, a donc été proposée dans le cadre des essais de fin de vie de PHÉNIX, dans la période 2009-2010 [8]. Celle-ci a permis d'apporter des éléments de confirmation sur la corrélation entre l'amplitude d'un écartement des assemblages du cœur et la réactivité induite.

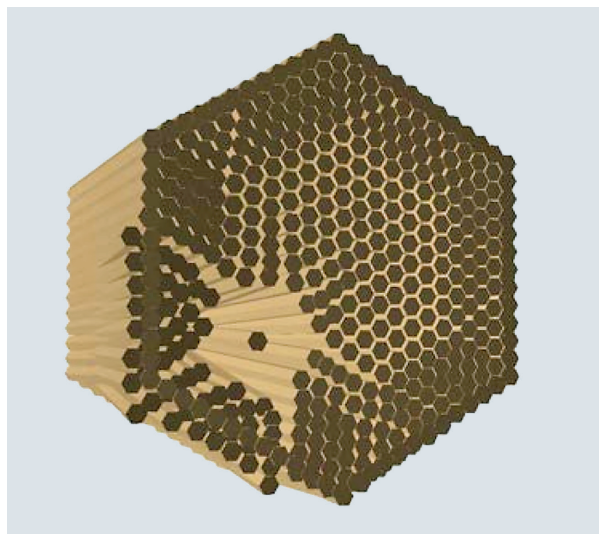


Fig. 143. Exemple de gerbage « exacerbé » (issu de [7]).

En 2009, on a réalisé des gerbages statiques du cœur de PHÉNIX, qui consistaient à remplacer un assemblage combustible par un dispositif écarteur, poussant sur les assemblages voisins. Des mesures de réactivité ont été faites en même temps. En 2013, des essais complémentaires de gerbage dynamique ont été réalisés avec un effacement rapide du dispositif écarteur et une mesure des déplacements des assemblages pendant leur retour en position d'équilibre. Cette fois-ci cependant, aucune mesure neutronique n'a été réalisée pendant les essais. Alors que le déroulement des essais statiques s'est avéré très satisfaisant sur le plan neutronique, des difficultés sont apparues sur le pilotage et l'instrumentation des aspects mécaniques du cœur (conception du dispositif écarteur peu favorable, défaillance d'au moins un sonar de suivi des assemblages). Ces difficultés ont gêné l'interprétation de ces essais, en particulier l'évaluation de la corrélation entre l'amplitude de déformation du cœur et la réactivité induite.

Une analyse fine des deux essais a néanmoins permis de compléter une partie des informations manquantes sur le comportement mécanique du cœur et de valider le code HARMONIE pour la mécanique statique du cœur. Certaines hypothèses sur l'état du cœur au moment de l'essai de gerbage statique ont pu être validées, ce qui a conduit à mieux définir la séquence d'ouverture du cœur.

### L'essai de gerbage statique

Le dispositif écarteur (voir fig. 144) a été positionné successivement dans deux positions du cœur : au centre et en périphérie. Le gerbage du cœur est actionné de manière lente et progressive depuis la partie haute du dispositif, jusqu'à atteindre au maximum un déplacement des assemblages voisins de 6 mm au niveau des plaquettes. Les effets en réactivité sont évalués en temps réel à partir des mesures

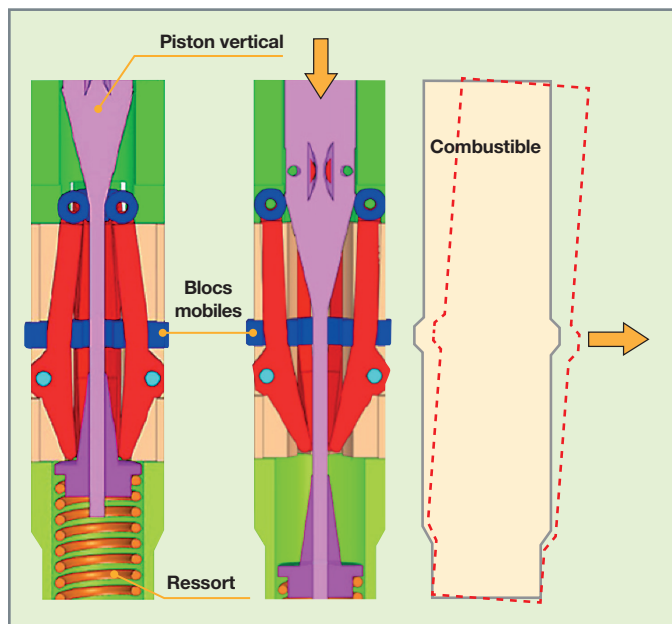


Fig. 144. Plaquettes mobiles du dispositif écarteur de l'essai de gerbage statique.

neutroniques standards du réacteur (chambres de pré-démarrage et démarrage). Les différentes phases de l'essai se sont déroulées avec un réacteur dans un état isotherme, aux températures de 180 °C (centre et périphérie) ou 350 °C (centre uniquement).

Les mesures neutroniques faites pendant cette expérience sont données sous forme de tendances sur la figure 145. Comme on s'y attendait, l'effet du gerbage est négatif. Le comportement semble asymptotiquement linéaire, avec une phase de transition où l'effet est moindre. Contrairement à ce qu'on pouvait penser, l'effet en réactivité est proche à 350 °C et à 180 °C. Il semble donc que la compacité du cœur n'ait pas beaucoup changé.

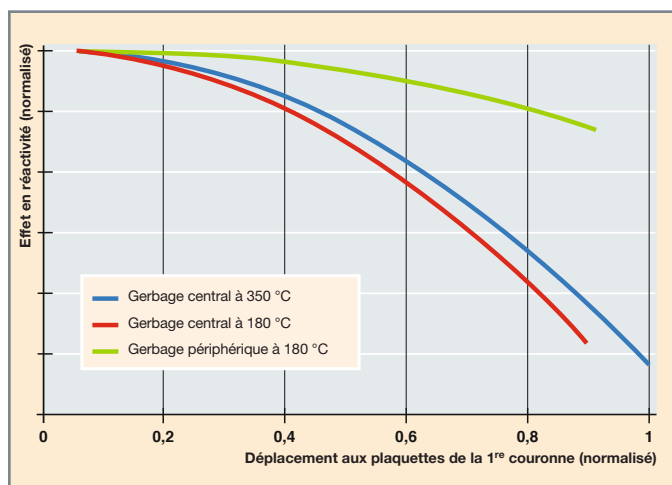


Fig. 145. Mesures de réactivité des essais de gerbage statique.



## L'essai de gerbage dynamique

Le principe de l'essai est d'introduire, à la place d'un assemblage du cœur, un dispositif mécanique (CFMD : *core flow-ring mechanical device*) permettant de pousser les six assemblages adjacents de manière quasi statique au niveau de la partie inférieure de la PNS (contrairement aux essais de gerbage statique où les assemblages étaient sollicités au niveau des plaquettes), puis de libérer subitement la contrainte pour observer le retour dynamique des assemblages. Nous ne disposons malheureusement pas de mesures neutroniques de cet essai.

### Interprétation des essais

L'interprétation des essais se fait en enchaînant deux simulations. Un premier calcul de mécanique cherche à prédire la géométrie du cœur. Il est suivi d'un calcul de neutronique qui s'intéresse à l'effet en réactivité de la déformation. Il n'y a pas de rétroaction de la neutronique vers la mécanique.

Les calculs mécaniques sont réalisés avec Cast3M, à l'aide d'une méthode d'homogénéisation présentée dans [9] et [10]. Chaque assemblage est représenté par un élément poutre encastré à la base. Les chocs sont pris en compte par une rigidité de contact. On ne prend pas en compte les déformations initiales des assemblages dues à l'irradiation. Les calculs de neutronique sont réalisés ici avec une méthode de projection de géométrie (voir plus haut), implémentée avec APOLLO3. Le maillage de calcul est composé de « pixels » hexagonaux de 3 cm d'entreplat, sur lequel on projette la géométrie déformée.

Les effets neutroniques trouvés pour les essais de gerbage statique à 180 °C, sont donnés en figure 146 pour le gerbage central et en figure 147 pour le gerbage périphérique. Différentes hypothèses sur la taille du jeu inter-assemblage sont utilisées dans ces simulations. L'écartement réel entre les assemblages pendant les essais de gerbage est mal connu, parce que l'expérience a été faite sur un cœur déjà irradié dont les déformations initiales n'ont pas été caractérisées. Il est visible sur ces résultats que cet écartement initial des assemblages pilote la phase de transition initiale (sans jeu, les résultats sont linéaires). On reproduit assez bien l'expérience avec des jeux d'environ 0,3 mm pour le gerbage central et 0,1 mm pour le gerbage périphérique, ce qui tend à montrer que les déformations initiales du cœur ne sont pas homogènes.

L'évolution de la puissance trouvée pour l'essai de gerbage dynamique est tracée en figure 148. Pendant la phase de gerbage, lors de la première seconde, la puissance décroît linéairement après une courte phase de transition déjà commentée. Elle continue de décroître, mais plus lentement, pendant la demi-seconde de maintien du cœur en situation ouverte. La vitesse de décroissance de la puissance est pilotée, dans cette phase où la réactivité est négative, par la vitesse de disparition des précurseurs de neutrons retardés. Quand le dispositif écarteur s'efface, à  $t = 1,5$  s, la puissance oscille en opposition de phase avec le déplacement des assemblages : elle est maximale lorsque le cœur est compacté et minimale lorsqu'il se rouvre. À la fin du transitoire, la puissance se stabilise à une valeur non nulle inférieure à la puissance initiale, à cause de la diminution des concentra-

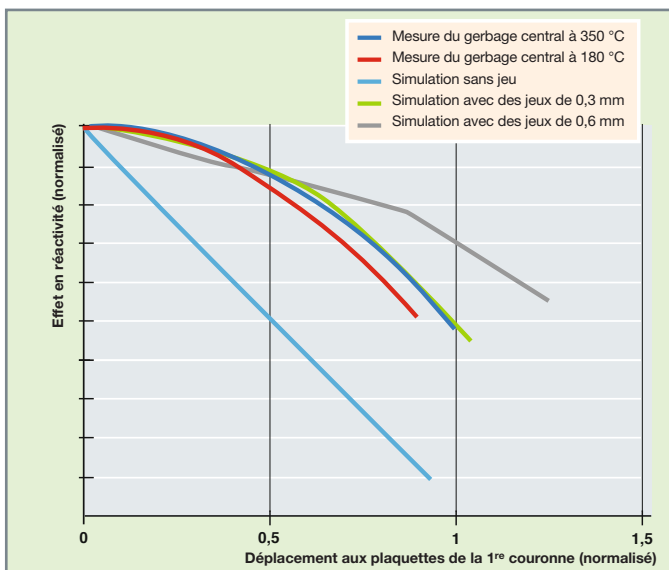


Fig. 146. Simulation de l'effet en réactivité de l'essai de gerbage statique central de PHÉNIX à 180 °C.

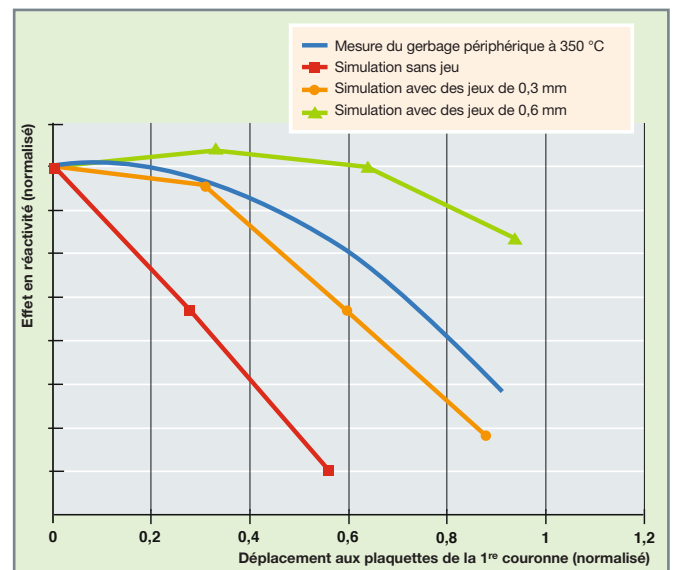


Fig. 147. Simulation de l'effet en réactivité de l'essai de gerbage statique périphérique de PHÉNIX à 180 °C.

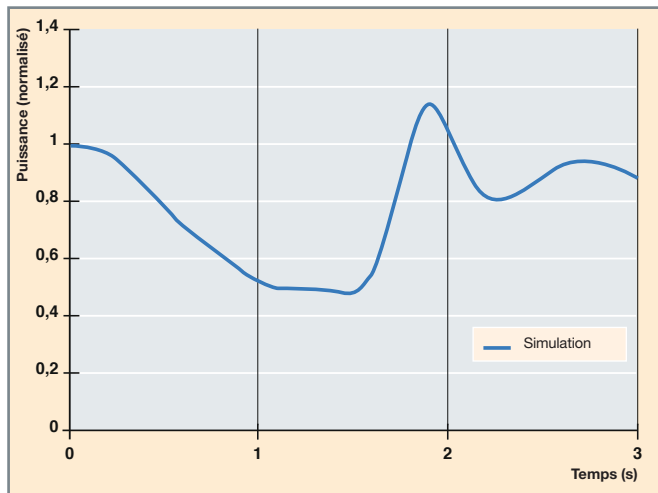


Fig. 148. Évolution de la puissance lors de la simulation de l'essai de gerbage dynamique de PHÉNIX.

tions de précurseurs de neutrons retardés qui a eu lieu pendant ce transitoire, où la puissance était globalement inférieure à la valeur initiale.

Même s'il n'y a pas de résultats expérimentaux auxquels se comparer, les résultats de ce calcul sont cohérents avec notre compréhension des phénomènes en jeu.

## Conclusions

Le comportement d'une population de neutrons dépend de la configuration géométrique des milieux dans lesquels elle se propage. Certaines situations, en particulier accidentelles, peuvent conduire à des déformations des cœurs de réacteurs nucléaires qu'il est donc nécessaire de prendre en compte dans les simulations neutroniques. Cependant, les codes de calcul de neutronique étant pensés et optimisés pour traiter des configurations nominales régulières, la prise en compte de déformations irrégulières n'est pas chose aisée. Des travaux de thèse ont tout de même pu dégager deux approches possibles, selon que le maillage de calcul est lui-même déformé pour suivre la déformation géométrique ou pas.

Nous avons vu, dans ce chapitre, deux exemples d'application de ces méthodes à des expériences mettant en œuvre des déformations géométriques complexes. Le premier exemple, un peu académique, touche à la dynamique rapide et nécessite un véritable couplage entre thermomécanique et neutronique. Le second met en œuvre des déformations irrégulières dans un cœur de réacteur à neutrons rapides refroidi au sodium.

Si les résultats obtenus sont satisfaisants, il convient maintenant d'adapter et valider ces méthodes à des cœurs plus complexes si le besoin se présentait.

**Cyril PATRICOT, Jean-Charles LE PALLEC,**  
*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*  
**et Patrick BLAISE,**  
*Direction Scientifique*

## ► Références

- [1] T.F. WIMETT. "Time behavior of Godiva through prompt critical", *Technical report, Los Alamos scientific laboratory*, 1956.
- [2] C. FIORINA, M. AUFIERO, S. PELLONI and K. MIKITYUK, "A time-dependent solver for coupled neutron-transport thermal-mechanics calculations and simulation of a GODIVA prompt-critical burst", *Proceedings of ICONE22, Prague, Czech Republic*, 2014.
- [3] M. AUFIERO, C. FIORINA, A. LAUREAU, P. RUBIOLLO and V. VALTAVIRTA, "Serpent-OpenFOAM coupling in transient mode: simulation of a Godiva prompt critical burst", *Proceedings of M&C + SNA + MC 2015, Nashville, USA*, 2015.
- [4] C. PATRICOT, O. FANDEUR, and A.-M. BAUDRON, "Interests of the improved quasi-static method for multi-physics calculations illustrated on a neutronics-thermomechanics coupling", *Proceedings of PHYSOR 2016, Sun Valley, USA*, 2016.
- [5] Y. WANG *et al.*, "Demonstration of MAMMOTH Strongly-Coupled Multiphysics Simulation with the Godiva Benchmark Problem", *Proceedings of M&C 2017, Jeju, Korea*, 2017.
- [6] C. PATRICOT, *Couplages multi-physiques : évaluation des impacts méthodologiques lors de simulations de couplages neutronique/thermique/mécanique*, thèse de doctorat, 2016.
- [7] M. GENTILI, *Aspects neutroniques associés à des réseaux irréguliers d'assemblages dans un cœur de RNR-Na*, thèse de doctorat, 2015.
- [8] B. FONTAINE *et al.*, "Description and preliminary results of PHÉNIX core flowering test", *Nuclear Engineering and Design*, 241, pp. 4143-4151, 2011.
- [9] D. BROU, J. CARDOLACCIA and L. MARTIN, "Physical and numerical methods for the dynamic behavior of the fast reactor", *Proceedings of ASME, Anaheim, California, USA*, 2014.
- [10] D. BROU, J. CARDOLACCIA, L. MARTIN and J.-L. PORTIER, "Core mechanical dynamics experiment in the PHÉNIX reactor", *Proceedings of ASME, Boston, Massachusetts, USA*, 2015.

## La modélisation des agressions externes

**A**près avoir développé l'apport de la mécanique des structures dans les études liées au fonctionnement « nominal » des structures du nucléaire, cette section va s'intéresser aux agressions externes. Trois thèmes seront abordés à titre d'exemple :

- Le séisme qui est, parmi les agressions externes à considérer pour la sûreté, le cas le plus couramment rencontré pour les installations nucléaires dans le monde ;
- les chocs et impacts, accidents redoutés pour tout type de structure, dont il est nécessaire d'évaluer et anticiper les effets afin d'en limiter les conséquences ;
- les explosions, d'origine accidentelle ou malveillante, vues comme des ondes de surpression ou de dépression brutales dont la propagation peut générer des dégâts mécaniques majeurs sur les structures, et notamment sur les barrières de confinement.

Comme dans la section précédente, pour chaque chapitre, une brève introduction présentera les enjeux de la thématique. Les méthodes pour répondre à ces enjeux seront ensuite discutées en s'appuyant autant que possible sur la modélisation, l'expérimentation et la simulation. Différents niveaux de complexité pourront être considérés en fonction de la nature de l'information recherchée et du domaine d'étude considéré.





## Le risque sismique

**P**armi les agressions externes à considérer pour la sûreté des installations nucléaires, le séisme est sans nul doute le cas le plus courant. En effet, plusieurs installations nucléaires de par le monde ont subi, ou subiront, au cours de leur vie des secousses sismiques d'une intensité relativement modérée. Fort heureusement, il n'en est pas de même pour des événements d'intensité extrême, qui sont, par définition, extrêmement rares, mais vis-à-vis desquels la sûreté des installations doit être démontrée.

La conception et la construction parasismiques des structures sont un domaine en plein essor pour les ingénieurs/chercheurs depuis plusieurs décennies. Cependant, la grande majorité de ces travaux concernent le comportement des structures de génie civil et notamment des ponts et des bâtiments. La particularité des structures industrielles, comme celles rencontrées dans l'industrie pétrochimique et surtout dans l'industrie nucléaire, est que l'accent est mis non seulement sur le comportement des bâtiments, mais également sur les équipements. En effet, le bon fonctionnement de ces installations, ainsi que l'absence de conséquences néfastes pour l'environnement pendant ou après des séismes forts, ne dépend pas seulement du comportement satisfaisant du génie civil, mais également des équipements. Ces équipements sont d'une grande variété. À titre d'exemple, on peut citer le cœur (assemblages combustibles, chute des barres de contrôle), les tuyauteries, les ponts roulants, les conteneurs de matière radioactive, les râteliers de stockage de combustible usé, les réservoirs de stockage d'eau, les armoires électriques, les groupes électrogènes de secours ou les pompes. Cette liste est loin d'être exhaustive. Tous les EIS (éléments importants pour la sûreté) sont concernés, mais aussi tous les éléments susceptibles d'agresser un EIS, la liste peut ainsi être très longue.

Par ailleurs, deux autres aspects, qui sont omniprésents dans le cas des installations nucléaires, contrairement à la majorité des bâtiments courants, sont les interactions fluide-structure et sol-structure. Le premier aspect s'impose, de façon évidente, par la présence des fluides autour ou

dans plusieurs composants. Pour le second, un îlot nucléaire est un ensemble de structures plutôt rigide et lourd, modifiant ainsi par son action le comportement du sol. De plus, les dimensions horizontales de ces structures sont assez grandes, comparables aux longueurs d'onde d'intérêt dans le sol, ce qui peut imposer la prise en compte du déphasage de l'excitation sismique le long de la fondation (effet de passage d'onde) ainsi que d'une éventuelle incohérence spatiale des propriétés du sol.

Enfin, il est à signaler que la protection parasismique des installations nucléaires nécessite de faire appel à une multitude de branches de la mécanique : dynamique, non-linéarités matérielles et géométriques, non-linéarités de contact, mécanique de la rupture. Par ailleurs, les incertitudes, notamment celles inhérentes à la nature aléatoire de l'excitation, sont prises en compte soit d'une manière forfaitaire empirique, soit dans le cadre de la théorie des processus stochastiques.

Étant donné que la plupart des disciplines de la mécanique ci-dessus interviennent également dans le cas d'autres chargements, nous nous limiterons, par la suite, à certains aspects qui concernent plus particulièrement la mécanique sismique. Ici, nous ne discuterons pas non plus d'aspects sismologiques, tels que les mécanismes des failles et la propagation d'ondes de la faille jusqu'à la zone proche de la structure.

### Pratique habituelle

Pour le mécanicien des structures, l'excitation sismique consiste en un mouvement imposé au niveau des fondations de la structure ou à la zone proche. Dans la pratique, elle est définie par la donnée du spectre de réponse d'oscillateur (SRO) correspondant au site. Ce spectre représente le maximum de la réponse d'un oscillateur à l'excitation sismique en fonction de sa pulsation,  $\omega$ , et de son taux d'amortissement critique,  $\xi$ . Pour un signal d'accélération sismique,  $\ddot{u}_g$ , de durée  $T$ , le déplacement maximum, relatif par rapport au sol, d'un oscillateur est donné par le produit de convolution :

$$SD(\omega) = \max_{0 \leq t \leq T} \left[ \int_0^t \frac{1}{\omega \sqrt{1 - \xi^2}} \ddot{u}_g(\tau) e^{-\xi \omega (t-\tau)} \sin(\omega \sqrt{1 - \xi^2} (t - \tau)) d\tau \right] \quad (1)$$

Le maximum de la force élastique de l'oscillateur par unité de masse, dénommée « pseudo-accélération », est  $PSA(\omega) = \omega^2 SD(\omega)$ . Le spectre de pseudo-accélération est nul pour un oscillateur très souple (fréquence nulle) et est égal à l'accélération maximale du sol, PGA (*peak ground acceleration*), pour un oscillateur très rigide (fréquence infinie). La définition du spectre de réponse d'oscillateur est associée à un signal sismique donné,  $\ddot{u}_g$ , mais le spectre définissant l'excitation est un spectre lissé, censé envelopper les SRO des signaux probables pour un site donné. Il est défini soit par les normes parasismiques, soit d'après des études sismologiques spécifiques du site, avec des méthodes probabilistes ou déterministes.

Dans le cas des structures linéaires, l'intérêt du SRO réside dans la recombinaison modale spectrale qui permet de déterminer aisément le maximum d'une grandeur d'intérêt de la réponse. En effet, les équations de la dynamique pour ce type de structures, quand elles sont mono-supportées (c'est-à-dire quand tous les mouvements de leur fondation sont supposés avoir le même déplacement imposé par le séisme) sont :

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = -\mathbf{M}\mathbf{r}\ddot{u}_g \quad (2)$$

où  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{K}$  et  $\mathbf{C}$  sont les matrices de masse, de rigidité et d'amortissement respectivement,  $\mathbf{r}$  est un vecteur unitaire dans la direction du mouvement sismique et  $\ddot{u}_g$  est l'évolution temporelle de l'accélération sismique au niveau de la fondation. Toute grandeur scalaire  $Q$  (par exemple, composante de déplacements ou de contraintes à un point) peut s'exprimer comme une somme de contributions modales de 1 à  $N$  :

$$Q = \sum_{n=1}^N \alpha_n(t) Q_n \quad (3)$$

où  $\alpha_n(t)$  est le déplacement généralisé du mode  $n$  et  $Q_n$  est la valeur de la grandeur d'intérêt dans le vecteur propre,  $\boldsymbol{\varphi}_n$ , du mode. Sous certaines hypothèses, basées sur la théorie des processus aléatoires stationnaires, le maximum de  $Q$  est estimé par une combinaison quadratique et bilinéaire des maxima modaux. Par exemple, dans le cas des systèmes ayant des fonctions de réponse fréquentielle avec des pics modaux bien espacés :

$$Q_{\max} = \sqrt{\sum_{n=1}^N (\alpha_{n,\max} Q_n)^2} \text{ avec } \alpha_{n,\max} = \frac{\boldsymbol{\varphi}_n^T \mathbf{M} \mathbf{r}}{\boldsymbol{\varphi}_n^T \mathbf{M} \boldsymbol{\varphi}_n} SD(\omega_n) \quad (4)$$

La formule (4) donne le maximum de la réponse à la composante de l'excitation dans une seule direction. L'excitation sismique ayant trois composantes, le maximum est calculé par combinaison quadratique des maxima dans les trois directions orthogonales :

$$Q_{\max} = \sqrt{Q_{x,\max}^2 + Q_{y,\max}^2 + Q_{z,\max}^2} \quad (5)$$

Cette formule est fondée sur l'observation que, souvent, les composantes du mouvement sismique du sol sont décorrélées et que les autocorrélations des signaux horizontaux diffèrent peu : la matrice de covariance est diagonale avec les termes correspondant aux axes horizontaux quasi égaux. Cette hypothèse, adoptée aussi par nécessité, en l'absence d'information précise sur la source et la propagation des ondes sismiques, est d'une grande importance pratique. En effet, étant donné que la matrice de covariance reste presque invariante lors d'une rotation du repère autour de l'axe vertical, il n'y a pas lieu de considérer d'axes horizontaux privilégiés. Néanmoins, il est à signaler que cette indépendance statistique n'est valide que pour les signaux de sol. Il n'en est pas de même pour les signaux transférés à l'intérieur d'une structure qui sont filtrés par la réponse dynamique de la structure.

Dans le cas où on a besoin de connaître plus d'une grandeur concomitante, on détermine l'hyper-sphère de valeurs probables dans l'espace de ces grandeurs [1]. Par exemple, pour déterminer les armatures longitudinales d'une poutre en béton armé, sollicitée dans un plan, on a besoin de connaître les valeurs concomitantes de l'effort normal  $N$  et du moment fléchissant  $M$ . À partir des maxima de  $N$  et  $M$ , calculés d'après l'équation (4) et de la corrélation de ces deux variables, il est possible de déterminer l'ellipse de la figure 149 qui entoure le domaine des couples possibles  $M$ ,  $N$ . Dans la pratique, le ferrailage est calculé pour un certain nombre de points se situant sur le contour du domaine. On peut remarquer le parallèle entre cette ellipse et l'ellipse des couples équiprobables dans le cas de deux variables aléatoires. Dans le cas de plusieurs grandeurs concomitantes, il s'agira d'un ellipsoïde dans un espace de dimension supérieure (par exemple, de dimension 3 pour les poutres en trois dimensions ou de dimension 6 pour les coques minces).

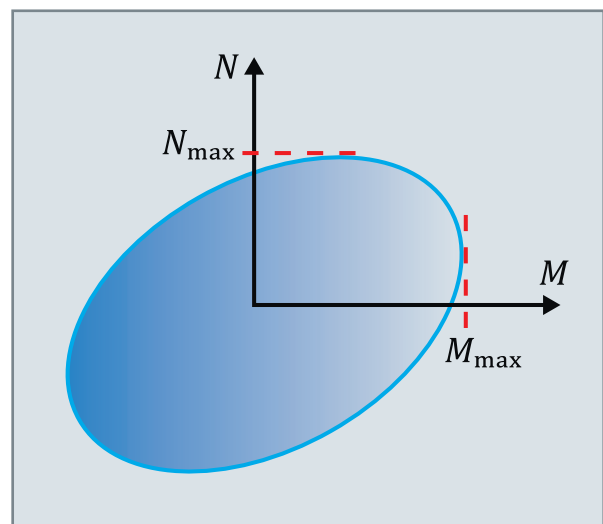


Fig. 149. Domaine des couples probables  $M$ ,  $N$ .

On voit donc qu'on peut estimer la réponse d'une structure linéaire uniquement par la donnée du SRO, en s'affranchissant des difficultés associées à une description temporelle de l'excitation.

Il n'en est pas de même dans le cas des structures non linéaires où les seules méthodes d'analyse pertinentes sont les méthodes temporelles. En plus de difficultés de modélisation numérique, liées aux non-linéarités, un certain nombre de questions se posent quant aux signaux d'excitation (signaux réels ou artificiels ou synthétiques compatibles avec le SRO, facteur d'amplification, durée, nombre de signaux).

Dans le cas du dimensionnement d'une structure neuve, un certain degré de comportement non linéaire « contrôlé » peut être pris en compte, de façon empirique, en appliquant la méthode de recombinaison spectrale après avoir modifié le SRO [2]. L'idée de base est qu'à cause des non-linéarités matérielles (par exemple, plastification des profilés métalliques ou des armatures d'acier), les efforts subis par la structure sont inférieurs aux efforts que la même structure aurait subis, si elle avait eu un comportement linéaire.

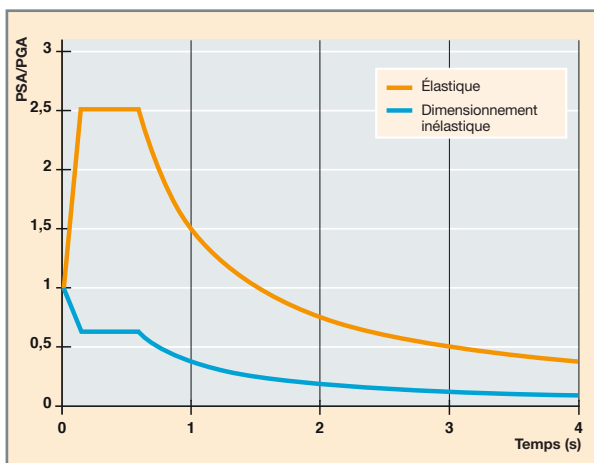


Fig. 150. Spectres (pseudo-accélération normalisée en fonction de la période) élastiques et de dimensionnement inélastique pour un coefficient de comportement  $q = 4$ .

La modification du SRO consiste donc à abaisser ses ordonnées en les divisant par un coefficient qui dépend de la fréquence (voir fig. 150). Ce coefficient est une approximation empirique du rapport entre la sollicitation sismique que la structure aurait subie si elle avait eu un comportement linéaire et la sollicitation qui peut être considérée pour le dimensionnement. Dans la zone résonante du spectre, ainsi que pour des fréquences inférieures (périodes supérieures) à celle-ci, il est égal au coefficient de comportement  $q$  [2]. Il s'agit d'un coefficient qui dépend du type de la structure concernée. Cette diminution n'est possible que si le com-

portement non linéaire est suffisamment ductile. C'est pourquoi, le dimensionnement n'est pas seulement fondé sur les résultats des calculs de réponse sismique (spectraux ou temporels), mais il est aussi accompagné par des vérifications et des détails constructifs qui excluent l'occurrence des modes de ruine fragile. Pour ce faire, on dote les mécanismes de ruine fragile d'une résistance supérieure à celle des mécanismes ductiles. Il s'agit du dimensionnement en capacité. Un exemple classique est la détermination du ferrailage de résistance à l'effort tranchant des poteaux en béton armé. Dans ce cas, l'effort tranchant de dimensionnement  $V_d$  n'est pas l'effort tranchant de calcul  $V_c$ , mais l'effort déterminé par l'équilibre de moments ultimes  $M_1^u$  et  $M_2^u$  (voir fig. 151) correspondant au ferrailage longitudinal réellement disposé (et non pas calculé). Les moments ultimes sont majorés par un coefficient de sécurité  $\gamma$ , qui tient compte d'une éventuelle résistance des armatures et/ou du béton, supérieure à sa valeur nominale :

$$V_d = \gamma \frac{M_1^u + M_2^u}{h} > V_c \quad (6)$$

Ainsi, l'apparition d'un mécanisme post-élastique ductile de flexion est favorisée en excluant le mode de ruine fragile par cisaillement. De même, le dimensionnement en capacité est utilisé pour répartir la plastification d'une façon généralisée dans la structure (voir fig. 152 [a]), en évitant les mécanismes locaux (voir fig. 152 [b]) qui exigeraient un appel de ductilité considérable, non atteignable. Par exemple, dans le cas des

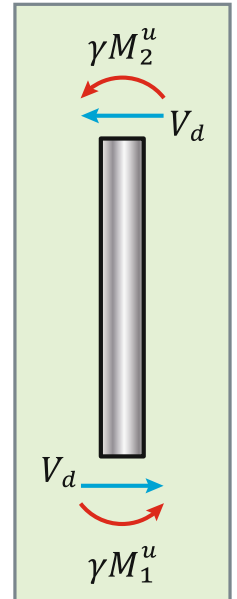


Fig. 151. Diagramme d'équilibre de moments d'un poteau.

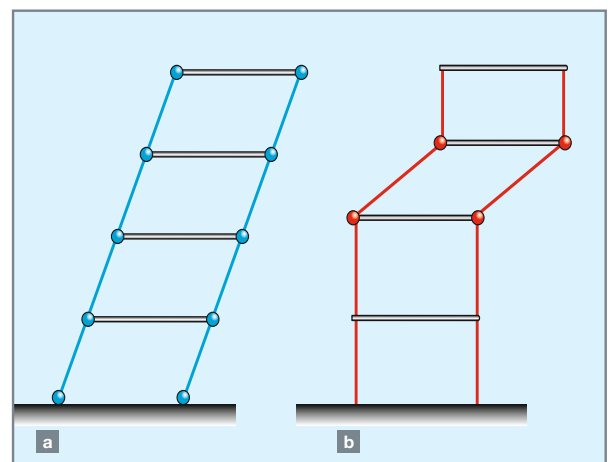


Fig. 152. Mécanismes de plastification d'un portique : (a) formation répartie de rotules plastiques ; (b) mécanisme local à proscrire.

portiques, cet objectif est atteint en dotant les poteaux d'une résistance supérieure à celles des poutres, évitant ainsi la formation des rotules plastiques dans les poteaux, sauf à leur base.

### Mouvements sismiques transférés

Afin de dimensionner les équipements dans une installation, il convient de disposer de l'excitation vue par l'équipement, c'est-à-dire du mouvement sismique transféré aux supports de l'équipement. Habituellement, le calcul du mouvement transféré consiste en un calcul de la structure porteuse en tenant compte des équipements comme des masses attachées de façon rigide à leurs supports. Cette pratique est illustrée, schématiquement, sur la figure 153 pour un système à deux degrés de liberté (DDL). Cependant, en toute rigueur, l'absence d'interaction dynamique entre structure porteuse et équipement n'est justifiée que dans le cas d'équipements de masse très faible par rapport à la masse de la structure. Le couplage dynamique devient plus important quand les deux sous-systèmes ont des fréquences propres voisines et, dans ce cas, il conduit à une sollicitation de l'équipement largement inférieure à celle calculée avec l'hypothèse de découplage. L'influence du couplage dynamique est illustrée sur la figure 154 où, en considérant une accélération d'excitation de bruit blanc, on compare les écarts types de l'accélération de l'équipement entre analyses couplée et découplée. On y remarque que l'effet de l'interaction diminue avec la diminution de la masse de l'équipement et/ou l'augmentation de son amortissement.

Une solution analytique permet de mieux appréhender ce couplage dans le cas où les fréquences  $f_1$  et  $f_2$  des deux sous-systèmes (indice 1 pour le système principal et indice 2 pour le système secondaire) sont proches, c'est-à-dire  $\varepsilon = |f_2 - f_1| / f_1 \ll 1$ . En considérant le même taux

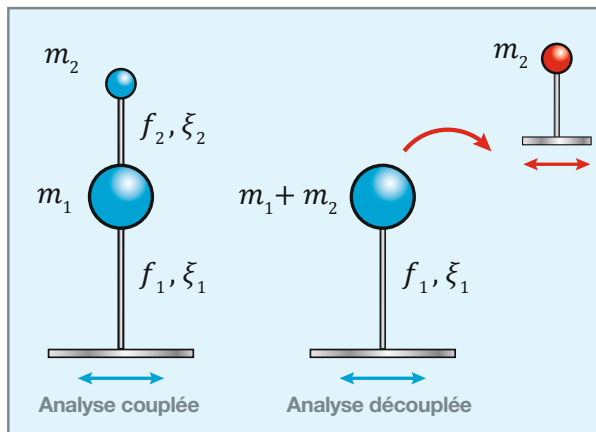


Fig. 153. Analyses couplée et découplée pour le calcul de la réponse des équipements.

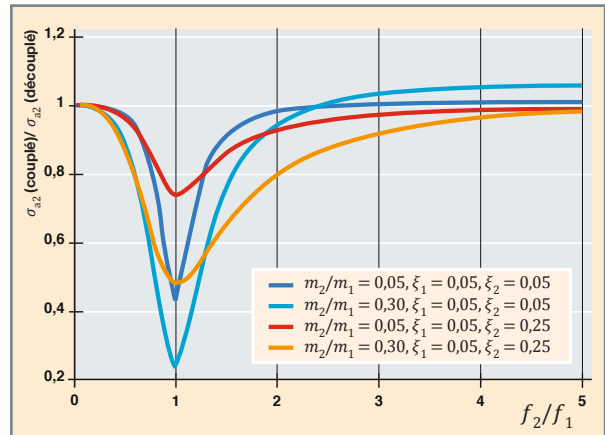


Fig. 154. Rapports des écarts types de l'accélération de la structure secondaire obtenus.

d'amortissement  $\xi_1 = \xi_2 = \xi$  et si l'on note le rapport de masse  $\alpha = m_2/m_1$ , on peut montrer que le rapport  $R$  des maxima des amplitudes des fonctions de réponse fréquentielle des déplacements, obtenues avec et sans prise en compte du couplage est [3] :

a) Dans le cas d'un amortissement fort, c'est-à-dire  $\xi^2 > (\alpha + \varepsilon^2)/4$  et  $\xi^2 > (\alpha + \varepsilon^2)/4$  :

$$R = \frac{|d_{\max}^{\text{couplé}}|}{|d_{\max}^{\text{découplé}}|} \cong \frac{(\varepsilon + \alpha/4)^2 + 4\xi^2}{\alpha + \varepsilon^2 + 4\xi^2} \quad (7)$$

Avec les hypothèses sur l'amortissement ci-dessus, cette expression est de l'ordre de 1. Il s'ensuit que le couplage peut être négligé ;

b) dans le cas d'un amortissement faible, c'est-à-dire  $\xi^2 < (\alpha + \varepsilon^2)/4$  et  $\xi^2 < (\varepsilon + \alpha/4)^2/4$  :

$$R = \frac{|d_{\max}^{\text{couplé}}|}{|d_{\max}^{\text{découplé}}|} \cong \frac{\varepsilon + \alpha/4}{\sqrt{\varepsilon^2 + \alpha}} \quad (8)$$

Le couplage peut être négligé seulement si le rapport de masse est très faible :  $\alpha \ll \varepsilon^2$ .

Il est de pratique courante de caractériser l'excitation transférée par ses spectres de réponse, comme pour la structure porteuse. Néanmoins, des questions se posent quand on applique la méthodologie habituelle de la recombinaison modale spectrale, à cause du filtrage du mouvement de sol par la dynamique de la structure porteuse. En particulier :

a) L'approximation de l'équation (4) est meilleure dans le cas d'une excitation à bande large. Or, les signaux transférés sont des signaux à bande étroite avec des pics correspondant aux fréquences des modes prépondérants ;



b) les différentes directions d'excitation ne sont pas, nécessairement, statistiquement indépendantes et, par conséquent, la recombinaison donnée par l'équation (5) n'est pas valide.

Par ailleurs, il est évident que, si la structure porteuse a un comportement non linéaire, les mouvements transférés en seront influencés. Dans le cas d'un comportement élasto-plastique, la répartition généralisée de la plasticité a un effet bénéfique en diminuant les valeurs spectrales au voisinage des fréquences fondamentales et en évitant l'amplification de la réponse des modes supérieurs [4] [5]. D'où l'intérêt des méthodes de dimensionnement en capacité qui, en excluant les mécanismes locaux, sont bénéfiques, non seulement pour la réponse de la structure porteuse, mais également pour les spectres de plancher. Néanmoins, cette tendance n'est pas confirmée pour d'autres types de lois de comportement.

## Isolation sismique

La protection passive d'une structure vis-à-vis du risque sismique peut être obtenue avec trois méthodes de conception différentes :

- La structure est dotée d'une résistance suffisante pour qu'elle résiste au séisme tout en restant dans le domaine élastique linéaire ;

- la structure est dotée d'une capacité de déformation post-élastique suffisante (appelée souvent, par abus de langage, ductilité) pour résister à la sollicitation sismique en acceptant un certain niveau de dommage ;

- l'excitation sismique est filtrée, à des endroits précis, à l'aide de dispositifs spécifiques. Ce filtrage peut être effectué par déformation élastique ou inélastique. Il s'agit de l'isolation sismique (par exemple, par appuis en élastomère ou de frottement à la base de la structure) et de ces variantes (par exemple, en utilisant des dispositifs métalliques plastifiant à des endroits stratégiques).

Il existe une multitude de dispositifs d'isolation sismique. La figure 155, loin d'être exhaustive, présente quatre types couramment utilisés. Le premier (a) est un appui en élastomère fretté à faible dissipation d'énergie intrinsèque. Il est constitué d'une succession de couches fines d'élastomère, séparées par des frettes d'acier. L'adhérence des deux constituants est obtenue après vulcanisation. L'insertion des frettes diminue le tassement vertical et augmente la contrainte verticale admissible sans diminuer la souplesse horizontale. Les trois suivants sont des dispositifs avec une plus grande capacité de dissipation d'énergie soit par plastification d'un noyau de plomb (b), soit par frottement (c), soit par l'ajout d'un amortisseur visqueux (d). Un exemple d'installation d'appuis en élastomère à la base d'un réacteur est présenté en figure 156.

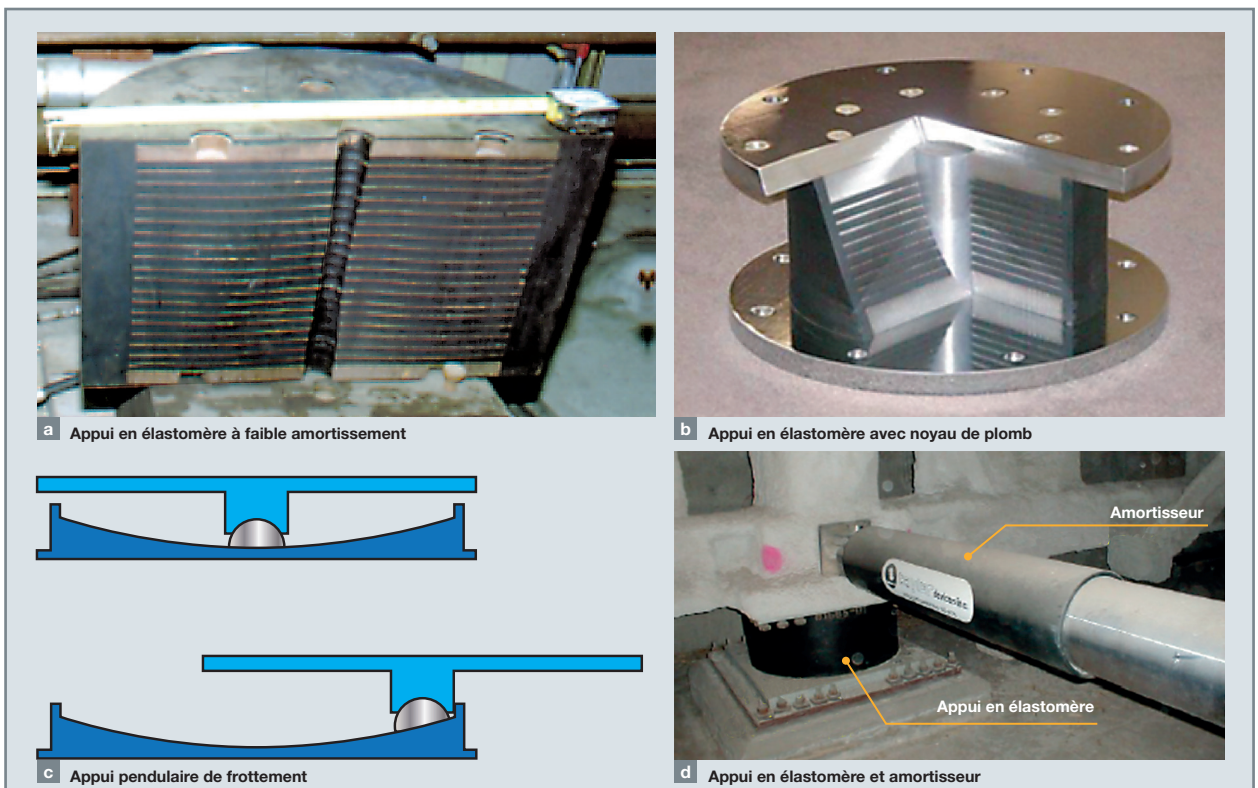


Fig. 155. Dispositifs d'isolation sismique.

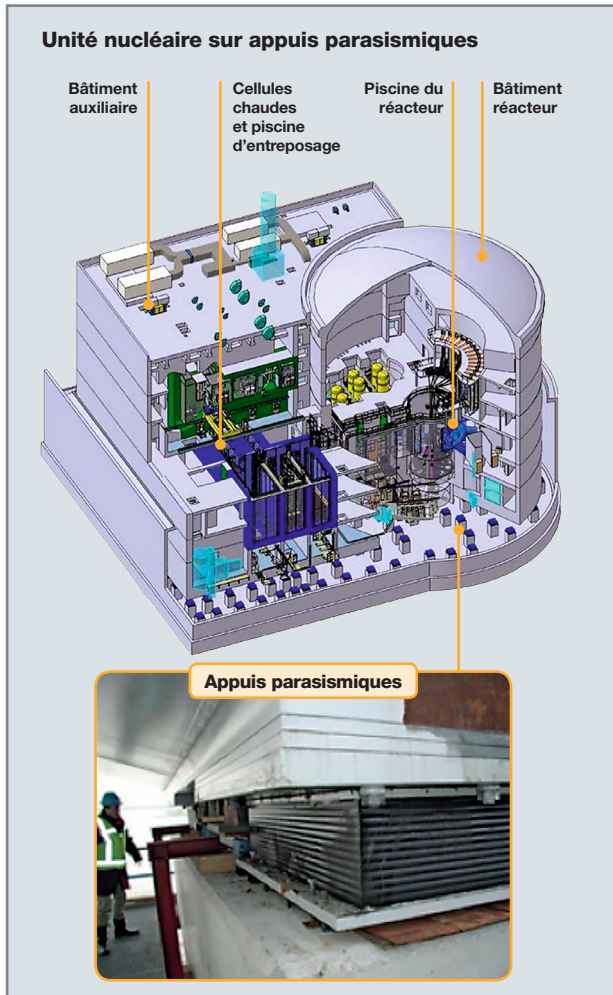


Fig. 156. Le réacteur expérimental Jules-Horowitz (RJH) sur appuis parasismiques (aseismic pads) en élastomère.

Bien qu'assez différente au niveau de la conception et de la réalisation pratique, cette troisième méthode (l'isolation sismique) est tout à fait identique aux deux premières du point de vue de la physique. Ceci est évident si la structure sismiquement isolée est conçue comme étant l'ensemble de la structure principale et des dispositifs spécifiques. À titre d'exemple, dans le cas d'isolation sur appuis à frottement, la structure résiste grâce au comportement non linéaire de frottement, exactement de la même façon qu'une structure ductile résiste grâce à sa capacité de déformation inélastique. De même, une structure sur appuis en élastomère n'est qu'un cas particulier d'une application intelligente de la première méthode.

La quasi-totalité des appuis parasismiques ont une capacité d'isolation dans le plan horizontal seulement, tandis qu'ils sont très rigides dans la direction verticale. Le principe de l'isolation sismique pour ce type d'appuis, avec des appuis considérés comme ayant un comportement linéaire (ou

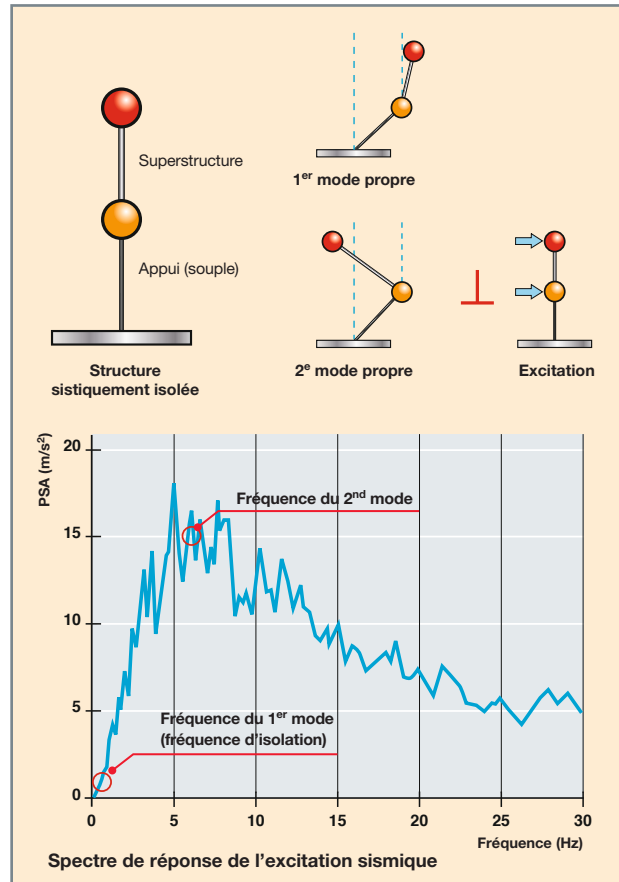


Fig. 157. Principe de l'isolation sismique.

linéaire équivalent en première approximation), est illustré, schématiquement, sur la figure 157 pour un système simple à deux DDL.

D'une façon générale, on distingue les modes à basse fréquence, appelés modes isolés et les autres modes qui sont appelés modes non isolés. Pour des superstructures assez rigides, ce qui est le cas des bâtiments nucléaires, les modes isolés correspondent à des mouvements de la superstructure se comportant presque comme un corps rigide sur des appuis souples. Dans le cas en 3D, il s'agit des deux mouvements de translation horizontale et d'un mouvement de rotation autour de l'axe vertical. Ces modes, qui sont spatialement excités par le séisme horizontal, ont pratiquement tous la même fréquence (fréquence d'isolation) qui est très basse, en général inférieure à 0,5 Hz, correspondant ainsi à des valeurs spectrales faibles sur le spectre de l'excitation. De l'autre côté, les modes non isolés, dont certains peuvent avoir des fréquences dans la zone d'amplification du spectre

de l'excitation, sont orthogonaux à la forme spatiale de l'excitation à cause de leur orthogonalité avec les modes isolés, par rapport à la masse, et de la forme particulière (mouvement de corps rigide) de la déformée modale des modes isolés. Par conséquent, les modes non isolés ne sont que faiblement excités par les composantes horizontales des séismes. Il faut signaler que, si la superstructure est relativement souple (ce qui n'est pas le cas pour les bâtiments nucléaires), les modes non isolés peuvent être excités spatialement par le séisme, car, dans ce cas, les déformées modales des modes isolés ne correspondent plus à des mouvements de corps rigide de la superstructure.

Dans le cas des installations industrielles et en particulier des installations nucléaires, en plus de la tenue des bâtiments au séisme, il faudra garantir le fonctionnement satisfaisant des équipements en cas de séisme. C'est pourquoi, dans certains cas, la méthode de l'isolation sismique est préconisée, surtout en vue de diminuer les efforts vus par les équipements et moins pour diminuer les efforts dans le bâtiment. En effet, les caractéristiques modales des bâtiments sismiquement isolés, avec des superstructures plutôt rigides, conduisent à des spectres de réponse horizontale de plancher, très attractifs pour le dimensionnement des équipements. Ces spectres présentent une amplification locale importante à la fréquence de l'isolation, mais les valeurs spectrales pour les fréquences supérieures à deux à quatre fois la fréquence d'isolation se situent sur un plateau horizontal (voir fig. 158). La valeur de ce plateau est approximativement l'accélération maximale d'un corps rigide appuyé sur les appuis parasismiques. Cette forme des spectres de plancher montre que la sollicitation des équipements, pour des fréquences supérieures à environ deux fois la fréquence d'isolation, est diminuée de façon significative, simplifiant ainsi le dimensionnement et le calcul des équipements.

Cependant, dans certains cas, une amplification de la réponse des modes non isolés peut se produire, modifiant la forme idéale de la figure 158 (b) et limitant, en partie, les bénéfices de l'isolation sismique. Dans le cas des superstructures relativement rigides, telles que la majorité des bâtiments nucléaires, cette amplification de la réponse des modes supérieurs peut provenir [6] [7] [8] :

- D'une dissipation d'énergie importante à la base, due, par exemple à l'ajout des dispositifs dissipatifs tels que des amortisseurs visqueux linéaires ou non linéaires, dispositifs élasto-plastiques, dispositifs de frottement, etc. ;
- d'une excitation de balancement (*rocking*) à la base due à des ondes sismiques à incidence non verticale (ondes de volumes inclinées ou ondes de surfaces) ou, dans le cas d'une fondation enfouie, à cause de la diffraction des ondes par l'excavation, même si elles se propagent verticalement ;
- du couplage entre l'excitation verticale et la réponse horizontale dans le cas des superstructures non symétriques.

Néanmoins, malgré cette éventuelle diminution de l'efficacité de l'isolation sismique, les spectres de plancher des structures sismiquement isolées se situent, en général, bien en deçà de ceux des mêmes structures sans isolation sismique.

## Méthodes expérimentales

La simulation numérique seule ne peut pas toujours donner une réponse quant à la capacité d'une structure ou d'un équipement à résister, de façon satisfaisante, à l'excitation sismique, d'où la place très importante des essais dans le

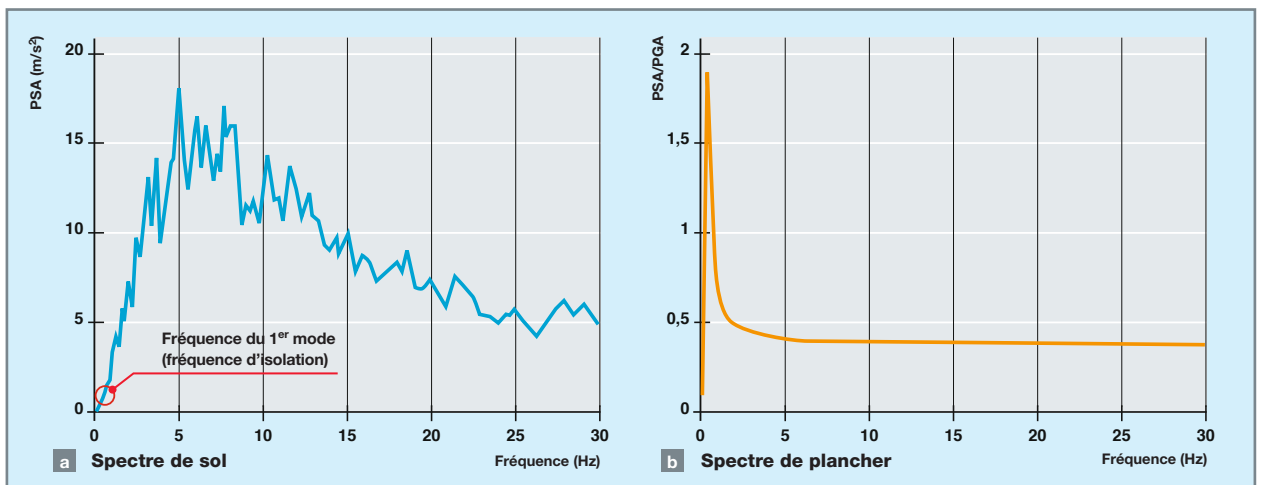


Fig. 158. Spectres de réponse (a) de sol et (b) à l'intérieur d'un bâtiment sismiquement isolé.

géné parasismique. En général, en fonction de leurs principaux objectifs, les essais sismiques font partie d'une des trois catégories suivantes :

- Essais de recherche et de développement, nécessaires pour un ou plusieurs des objectifs suivants :
  - meilleure compréhension des phénomènes physiques, intervenant sur le comportement local et global de la structure,
  - valider ou calibrer les outils de simulation numérique, les techniques de modélisation et estimer le niveau des approximations inhérentes aux modèles,
  - proposer ou valider des recommandations normatives ou des guides méthodologiques ;
- essais de qualification d'équipements ou de composants sensibles ou de grande valeur. Afin d'éviter tout phénomène de distorsion, l'échelle doit être 1:1. Des essais de ce type sont souvent imposés par les règlements. Ils sont nécessaires quand il est très difficile, voire impossible, de construire un modèle numérique fiable pour la structure en question (par exemple, armoires électriques des centrales nucléaires) et une réponse du type « oui » ou « non » est requise ou est la seule réponse réaliste ;
- tests de démonstration, destinés à éduquer l'opinion publique ou comme aide à la décision pour les décideurs politiques. Habituellement, dans ce cas, les maquettes sont à la plus grande échelle possible.

Les méthodes expérimentales habituelles sont présentées schématiquement sur la figure 159. Les essais cycliques en quasi-statique, notamment d'éléments de structure, per-

mettent d'obtenir des informations sur le comportement de ces éléments sous chargement cyclique. Les essais *in situ* consistent à construire et instrumenter des maquettes à une échelle plus ou moins grande sur un site sismique et d'attendre l'occurrence de vrais séismes. En ce qui concerne les essais en centrifugeuse, ils trouvent leur utilité dans le cas d'interaction sol-structure, car, grâce à la force centrifuge, ils permettent de respecter la similitude par rapport à la contrainte statique du sol, en modifiant l'accélération de pesanteur. Néanmoins, ce dispositif expérimental ne peut accueillir que des maquettes très petites, de l'ordre de 500 kg. Par la suite, nous nous limiterons à la présentation de deux méthodes qui sont, de loin, les plus fréquemment utilisées et les plus pertinentes : les essais sur table vibrante et les essais pseudo-dynamiques (voir fig. 160).

### Essais sur table vibrante

Les tables vibrantes simulent directement le phénomène physique puisqu'elles imposent un mouvement à la base de la structure comme les séismes réels. Il s'agit d'essais dynamiques en temps réel qui peuvent donc tenir compte de certains effets qui ne peuvent pas être représentés avec d'autres méthodes expérimentales. Ils sont généralement plus représentatifs de la réalité (sous réserve de gérer la similitude dans le cas d'échelle réduite). Ils peuvent également être la seule solution dans le cas de systèmes à masse répartie (comme les réservoirs de stockage ou les murs en maçonnerie excités dans la direction perpendiculaire à leur plan) ou pour la qualification d'équipements sensibles pour la sûreté. Leurs principales limites sont associées à l'échelle des structures testées, les maquettes pouvant rarement être à échelle 1:1. Par conséquent, dans la pratique, seulement une partie de la structure ou des modèles à échelle réduite

peut être testée (avec des lois de similitude parfois complexes, voire impossibles à obtenir sur l'ensemble des paramètres d'intérêt). Enfin, l'asservissement est, en général, moins précis que dans le cas des techniques plus lentes, telle la méthode pseudo-dynamique qui sera décrite dans la suite.

### Essais pseudo-dynamiques

La méthode pseudo-dynamique (PsD) consiste en une méthode hybride où les effets inertiels et visqueux sont pris en compte numériquement, ainsi que le chargement sismique, mais les forces internes, équivalentes aux contraintes (indépendantes de la vitesse de déformation), sont les forces physiques mesurées. Les déplacements à l'instant  $n+1$  sont

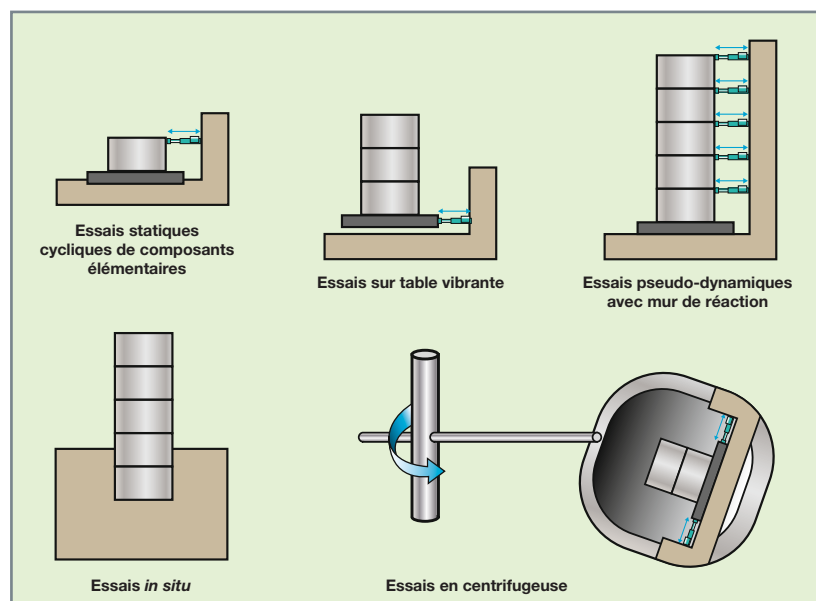
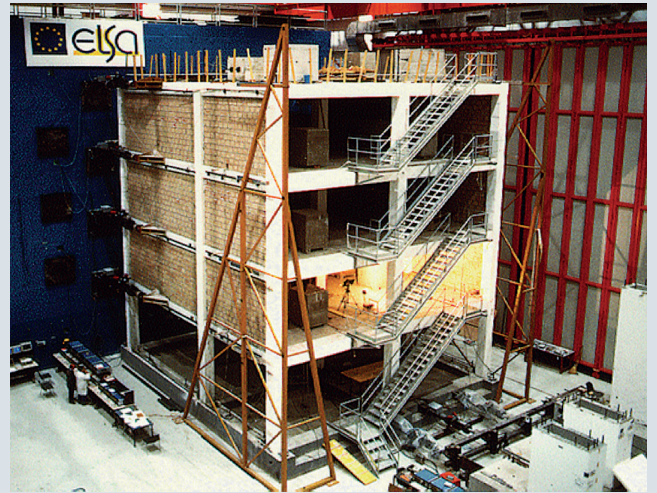


Fig. 159. Types d'essais sismiques.





Maquette fluide-structure sur table vibrante



Essai pseudo-dynamique d'un bâtiment avec mur de réaction en L

Fig. 160. Essais sur table vibrante et essais pseudo-dynamiques.

calculés en considérant l'équation d'équilibre dynamique à l'instant  $n$  et en appliquant la méthode des différences centrées.

$$\mathbf{U}_{n+1} = \left[ \underbrace{\mathbf{M} + \mathbf{C} \frac{\Delta t}{2}}_{\text{estimé}} \right]^{-1} \left[ \left[ \underbrace{\mathbf{M} \mathbf{r}}_{\text{estimé}} \ddot{u}_{g,n} - \underbrace{\mathbf{F}_n^{\text{int}}(\mathbf{U}_n)}_{\text{mesuré}} \right] \Delta t^2 + 2\mathbf{U}_n - \mathbf{U}_{n-1} \right] \quad (9)$$

Ces déplacements sont imposés avec des vérins hydrauliques et les forces internes correspondantes,  $\mathbf{F}_{n+1}^{\text{int}}$ , sont mesurées, ce qui permet d'avancer au calcul des déplacements à l'instant suivant  $n+2$ . La méthode est qualifiée de pseudo-dynamique, car le temps expérimental d'imposition de l'incrément de déplacements,  $\Delta \mathbf{U}_{n+1} = \mathbf{U}_{n+1} - \mathbf{U}_n$ , est largement supérieur au temps de calcul numérique  $\Delta t$ .

Comme principaux avantages de la méthode, il faut noter que :

- Les maquettes peuvent être, en général, plus grandes que celles sur tables vibrantes. En effet, l'imposition lente des déplacements permet d'avoir de grandes forces des vérins sans avoir besoin d'une grande puissance hydraulique. Par conséquent, un certain nombre d'essais peuvent être effectués à une échelle 1:1 ;
- étant donné qu'aucun mouvement n'est imposé à la base, la maquette peut être posée sur une fondation rigide et ainsi éviter les mouvements parasites de la base qui apparaissent dans le cas des tables vibrantes ;
- le temps de réalisation de l'essai étant beaucoup plus long que le temps de la réponse réelle dynamique, le contrôle

des vérins est de meilleure qualité que lors d'un essai dynamique. Par ailleurs, l'opérateur a la possibilité d'arrêter l'essai en cas d'un comportement non souhaitable pendant l'essai ;

- grâce, toujours, à l'élongation du temps, qui facilite le contrôle des vérins, la nature « hybride » de ces tests peut être poussée plus loin. Ainsi, la technique de sous-structuration consiste à tester physiquement une petite partie de la structure (en général celle qui est difficilement modélisable), tandis que le reste est simulé numériquement. Il est également possible de faire interagir plusieurs sous-structures testées expérimentalement dans des laboratoires différents. Il s'agit d'essais géographiquement distribués.

Comme inconvénients de cette technique, notons que :

- Elle est applicable seulement pour des structures dont les effets inertiels peuvent être représentés par une matrice de masse de petite dimension et facilement déterminée. En effet, ce sont les vérins qui imposent les déplacements correspondant aux DDL inertiels et leur nombre ne peut être que limité. Elle est, par exemple, très bien adaptée dans le cas des bâtiments dont l'essentiel de la masse se situe à leurs planchers. Il n'en est pas de même dans le cas des structures à masse répartie ;
- elle ne peut pas tenir compte de phénomènes dépendant de la vitesse de déformation, s'ils sont importants ;
- théoriquement, une excitation verticale pourrait également être appliquée. Néanmoins, ceci nécessiterait l'installation d'un nombre de vérins verticaux égal au nombre de DDL inertiels verticaux, ainsi que de leurs structures de

réaction correspondantes. Par conséquent, à cause de ces difficultés pratiques, des essais de ce type n'ont jamais été réalisés ;

- étant donné que les déplacements (ou forces) sont appliqués ponctuellement par un petit nombre de vérins, les contraintes au voisinage des points d'accrochage des vérins peuvent être très différentes de celles du prototype. Afin de minimiser ces effets locaux, il peut s'avérer nécessaire d'insérer des dispositifs spécifiques de répartition des forces entre les vérins et la maquette ;
- elle ne peut pas reproduire le couplage dynamique entre excitation horizontale et réponse verticale.

### Vers un dialogue calcul-essai en génie parasismique

Les données expérimentales obtenues sur des maquettes de structures à grande échelle jouent un rôle important dans l'étude de l'intégrité des structures soumises à des charges sévères telles que les sollicitations sismiques. La réalisation d'une telle étude nécessite un dialogue entre l'expérience et la simulation numérique à différents niveaux. Un premier niveau de dialogue expérience-simulation est nécessaire pour la conception des essais de structures. En effet, il est nécessaire d'estimer les capacités de la structure testée en amont afin de s'assurer que, d'une part, elle sera sollicitée dans le domaine souhaité et que, d'autre part, la ruine de la maquette sera évitée. La simulation de l'essai permet également de mieux cibler l'instrumentation de la maquette et la répartition des capteurs.

L'interprétation complète des données expérimentales obtenues sur une structure ne serait possible que *via* la simulation numérique de l'essai. À titre d'exemple, des analyses modales permettent de suivre l'évolution de la signature dynamique de la maquette due à l'endommagement de la maquette pendant un essai dynamique. La simulation numérique aide également à connaître les niveaux de contraintes engendrées et à mieux comprendre la répartition de l'endommagement de la maquette. La validation des modèles numériques par des résultats expérimentaux est également une tâche importante qui peut se réaliser par la comparaison essais-calculs.

Enfin, une interaction approfondie entre la simulation numérique et l'expérience peut ouvrir de nouveaux horizons dans le domaine de la mécanique expérimentale en fournissant des stratégies de contrôle avancées pour les essais.

### Comparaison essai-calcul

Les résultats expérimentaux constituent une information importante en soi. La comparaison avec la modélisation numérique augmente encore plus le bénéfice tiré par les essais parce qu'elle permet de mieux comprendre la physique et de valider les outils de simulation. Au laboratoire de mécanique sismique (EMS) du CEA Saclay, la modélisation numérique fait partie intégrante de presque toutes les campagnes expérimentales. Nous allons illustrer, brièvement, cette comparaison essai-calcul dans le cas d'une campagne expérimentale sur l'entrechoquement entre deux structures, testées sur la table vibrante AZALÉE de la plateforme TAMARIS au CEA Saclay.

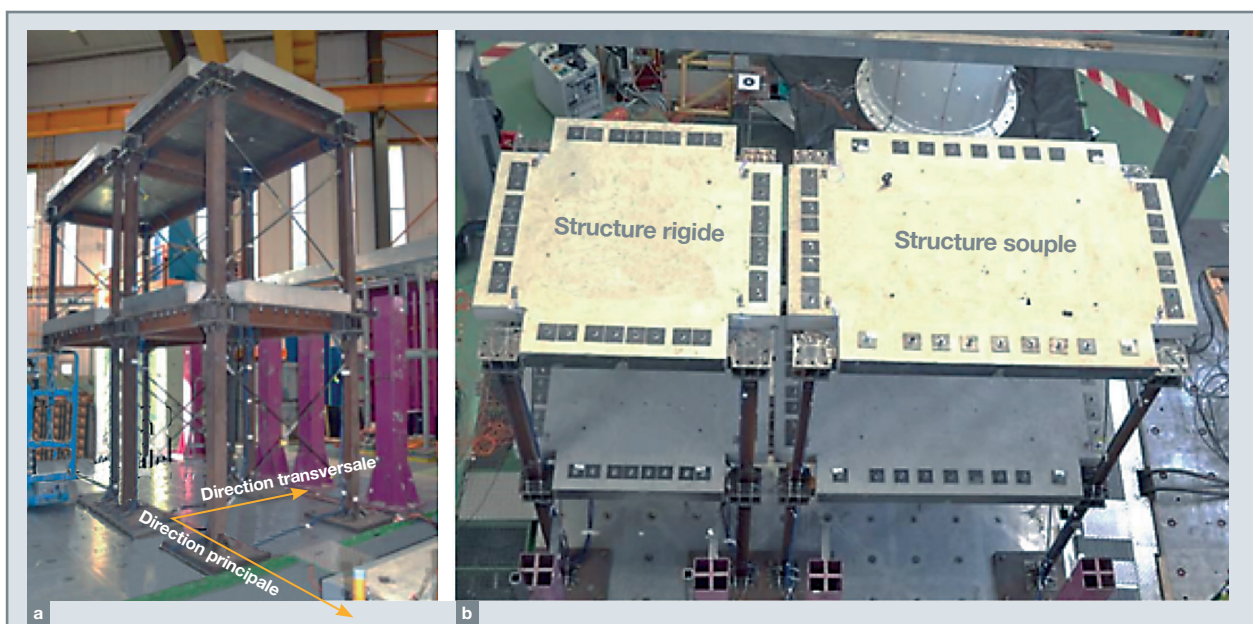


Fig. 161. Configuration des maquettes sur la table vibrante pour la réalisation des essais sismiques.

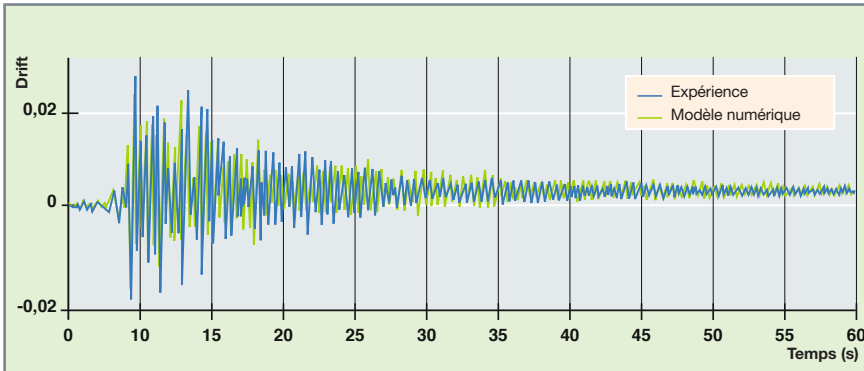


Fig. 162. Déplacement normalisé (*drift*) du premier étage de la structure souple.

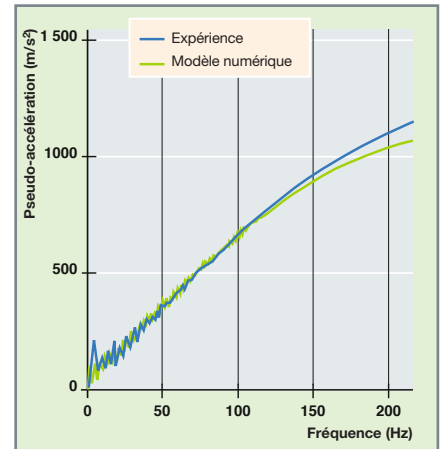


Fig. 163. Spectres de réponse d'oscillateur au niveau du second plancher de la structure souple.

Les maquettes utilisées pour la réalisation des essais sismiques sont représentées sur la figure 161. Pour faciliter la clarté de l'exposé, par la suite, la structure ayant la plus grande fréquence fondamentale est appelée structure rigide, tandis que l'autre est appelée structure souple. Ces maquettes, d'une hauteur totale de 5 mètres, sont, chacune, composées de deux étages. Chaque étage est constitué d'un plancher en béton armé boulonné sur un cadre formé de poutres en acier. Cette campagne étudie uniquement l'impact entre les planchers en béton armé des structures adjacentes. C'est pourquoi, comme observé sur la figure 161, les planchers ont été conçus de façon à dépasser sensiblement des portiques en acier sur lesquels ils reposent. Ainsi, les impacts peuvent intervenir uniquement entre les parties en béton armé de deux planchers adjacents, et ce sur l'ensemble du côté des planchers. La structure rigide est approximativement trois fois plus rigide que la structure souple suivant la direction principale exposée sur la figure 161. Par ailleurs, le dispositif de fixation des maquettes sur la table vibrante permet de faire varier le jeu initial entre les deux structures.

Plusieurs essais ont été effectués avec différents signaux d'excitation et différentes valeurs de jeu initial. En plus des impacts entre les planchers, une plastification à la base des poteaux a été observée pour les signaux de forte intensité (accélération maximale de la table de 0,55 g). Les résultats expérimentaux ont été comparés avec les résultats de la modélisation numérique. Le modèle numérique tenait en compte de non-linéarités de contact (impact entre les planchers) et de la plastification des poteaux. Afin de minimiser le coût de calcul, seulement dix DDL généralisés ont été retenus pour chaque maquette. La figure 162 présente le déplacement du premier étage, normalisé par sa hauteur, pour la structure souple. La figure 163 présente le spectre de réponse d'oscillateur au plancher du deuxième étage de la

même structure. Ces résultats correspondent à l'essai de la plus grande intensité. Les résultats numériques et expérimentaux sont, en général, proches. En effet, étant donné le caractère fortement non linéaire de la réponse, la modélisation s'avère très satisfaisante, et ce malgré son faible coût de calcul.

### Recalage de modèles à partir d'essais sur table vibrante

Une part importante des campagnes d'essais sur les tables de la plateforme TAMARIS concerne l'étude des structures endommageables ou présentant un comportement non linéaire (constructions en béton armé, ossatures en bois, ponts roulants, structures glissantes et/ou basculantes, etc.) sous chargement sismique et dont les résultats doivent constituer une référence expérimentale pour la mise au point et la calibration de modèles numériques permettant de prédire le comportement des ouvrages en zone sismique.

La présence de non-linéarités en cours d'essai pose deux principaux problèmes :

- (P1) Le contrôle des actionneurs hydrauliques qui équipent les tables vibrantes repose sur une théorie linéaire dont on espère une certaine robustesse vis-à-vis des non-linéarités ;
- (P2) l'identification des paramètres des modèles numériques des structures testées est soumise, comme tous les problèmes inverses, à l'écueil des minima locaux et de la continuité de la solution par rapport aux données d'entrée.

Une stratégie usuelle pour la conduite des campagnes d'essais consiste à activer les non-linéarités de façon incrémentale en réalisant des essais consécutifs de niveau croissant ;



les paramètres du contrôleur qui opère en boucle fermée sont réglés en début d'essai tandis que des corrections par avance de phase sont réalisées après chaque essai sismique pour tenir compte des non-linéarités qui apparaissent après essai. Malgré cela, les pôles du système expérimental en boucle fermée peuvent devenir instables. Ainsi, afin d'améliorer le contrôle des actionneurs, une des thématiques de recherche du laboratoire EMSI consiste à développer des outils pour l'identification des systèmes et le recalage des modèles afin d'intégrer un dialogue expérimental-numérique tenant une part croissante dans le contrôle des actionneurs (voir fig. 164).

Afin de répondre à la problématique P1, un premier volet concernant l'identification des systèmes a été développé. En effet, afin de pouvoir calibrer les paramètres du contrôle de façon adéquate, le comportement dynamique du système expérimental, synthétisé par sa signature modale (fréquences propres, taux d'amortissement et déformées modales), doit être caractérisé avec précision. Un premier travail pour l'identification robuste de la signature modale du système expérimental reposant sur la méthode des sous-espaces a été réalisé et est décrit en détail dans [9]. Cette première technique ne repose que sur les données d'essai pour construire un modèle dynamique du système expérimental. Afin d'introduire une part croissante de modèle numérique (éléments finis) dans la stratégie de contrôle des tables, un deuxième volet a été développé. Une stratégie de recalage reposant sur le concept d'erreur en relation de comportement a été mise au point dans [10] avec l'ambition de répondre à la problématique P2. Ces premiers travaux ont permis le recalage *offline* du modèle numérique du spéci-

men testé lors de la campagne SMART2013. Cette stratégie a ensuite été couplée à un filtre de Kalman non linéaire (*unscented Kalman filter*) dans l'espoir de réaliser ce recalage en temps réel (*online*). La nature fréquentielle du traitement réalisé n'a pour l'instant permis de réaliser ce recalage qu'en temps quasi réel (actualisation des paramètres du modèle toutes les secondes). Ces derniers développements sont synthétisés dans [11].

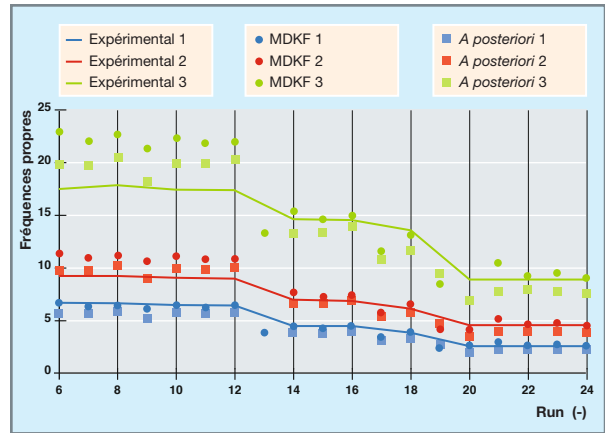


Fig. 165. Comparaison des trois premières fréquences propres du système expérimental SMART2013 F-4SID - #i : fréquences obtenues (*offline*) à l'aide de la méthode des sous-espaces [1], mCRE - #i : fréquences obtenues (*offline*) par minimisation d'une erreur en relation de comportement modifiée [10] MDKF - #i : fréquences obtenues (temps quasi réel) par filtre dual de Kalman modifié [11].

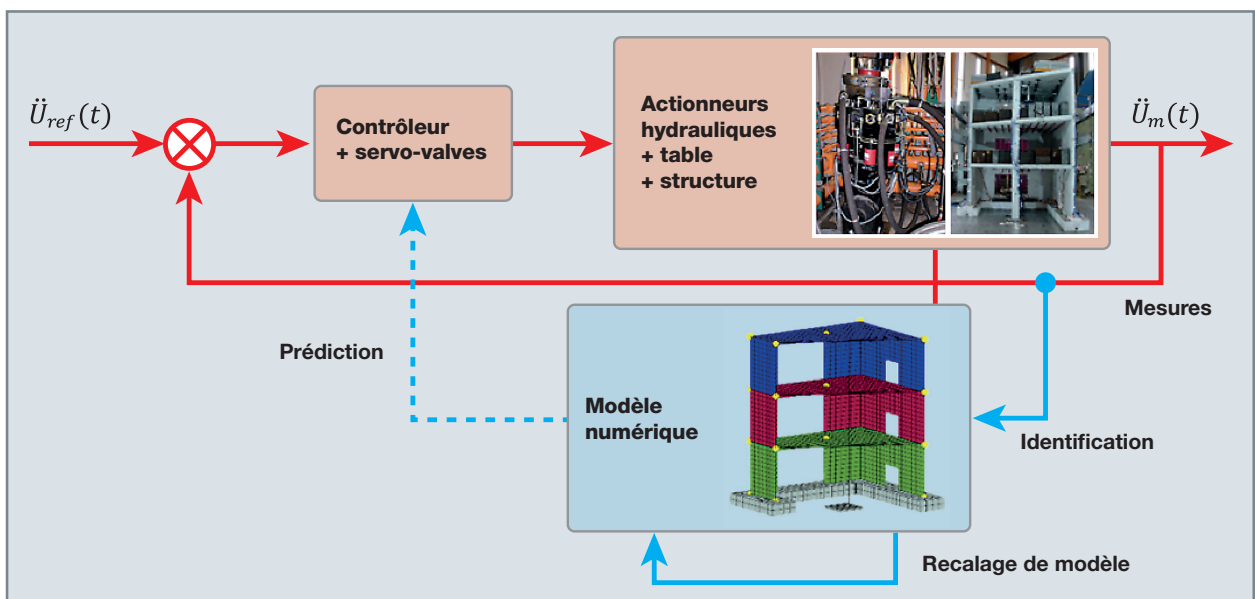


Fig. 164. Stratégie proposée pour la conduite d'essais sur table vibrante avec une part croissante du dialogue expérimental-numérique pour le contrôle des actionneurs.



## Focus sur la modélisation numérique « avancée » des structures en béton armé

Nous abordons, dans la suite, la question de la modélisation numérique avancée des structures en béton armé. Après avoir rappelé les principaux phénomènes ayant lieu dans un béton soumis à un chargement cyclique, l'attention est portée sur plusieurs approches de modélisation possibles. Nous discutons ensuite de certaines techniques modernes de modélisation fine (à haute-fidélité) de la réponse du béton sous chargement cyclique (lois de comportement), ainsi que les méthodes numériques à mettre en place pour s'en servir dans un calcul de structure.

### Approches de modélisation disponibles

La simulation du comportement non linéaire des structures de génie civil est essentielle dans la phase d'évaluation et réévaluation sismique des bâtiments en béton armé (dans le contexte civil, industriel et nucléaire). L'utilisation de modélisations non linéaires est recommandée par plusieurs guides de réévaluation. Ces approches de modélisation non linéaires permettent de représenter les phénomènes physiques concernés dans le processus de ruine d'une structure soumise à un chargement sismique et d'estimer le niveau sismique à la ruine.

### Approches globales et semi-globales

Pour les applications structurelles à grande échelle, il est habituel d'utiliser des modèles dits « globaux » et « semi-globaux ». Ces modèles permettent de représenter le comportement non linéaire du béton, des aciers d'armature et leurs interactions de manière simplifiée, mais souvent exhaustive (et compatible avec les exigences d'un calcul de structure). Dans ces approches, la cinématique des éléments de structure est considérée directement dans la formulation des éléments finis utilisés.

**Approches globales.** Ces méthodes de modélisation reposent sur l'utilisation d'éléments finis de type barre/poutre ou de type plaque/coque. Les premiers sont habituellement utilisés pour représenter le comportement des éléments structurels de type poutre/poteau, les seconds sont employés pour modéliser des éléments structuraux tels que les murs, les voiles et les planchers<sup>8</sup>. Des éléments finis spécifiques sont ensuite utilisés pour assurer les liaisons entre éléments finis avec cinématiques différentes. Le comportement du béton armé (on ne distingue pas entre le béton et

8. Concernant les éléments finis de type poutre, ils sont généralement formulés dans le cadre de la théorie des poutres d'Euler ou dans le cadre de la théorie de Timoshenko. Dans le premier cas, l'hypothèse est que les sections transversales restent droites et perpendiculaires à la fibre moyenne, tandis que, dans le second cas, elles restent droites, mais pas forcément perpendiculaires à l'axe neutre.

les armatures) est modélisé explicitement par le biais d'une loi de comportement reliant la déformation généralisée à la contrainte généralisée correspondante (effort normal, effort tranchant, moment fléchissant). Ces lois peuvent être fondées sur des observations phénoménologiques ou bien établies à partir des théories de la plasticité ou de la mécanique de l'endommagement. Ces approches de modélisation assurent d'obtenir des informations sur le comportement structurel global, mais elles sont par nature simplifiées et spécialisées (en termes de géométrie, de section, de pourcentage d'aciers, de type de sollicitation), et ne permettent pas d'avoir des informations fines concernant le processus de fissuration (exemples : ouvertures de fissure, orientation des fissures).

**Approches semi-globales.** Les modèles de poutres « multi-fibres » et de plaques « multi-couches » appartiennent à cette famille de modèles. Dans le cas de l'élément poutre « multi-fibre » (voir fig. 166), par exemple, la cinématique de l'élément de structure est encore représentée *via* des éléments finis de type poutre, tandis que leur comportement mécanique est obtenu en représentant, d'une part, explicitement un certain nombre de sections transversales de la poutre et, d'autre part, les interactions entre les sections transversales *via* des lois de comportement unidimensionnelles pour les différents éléments constituant le composite béton armé (béton et barres d'armature). Cela conduit à une réduction sensible des temps de calcul par rapport à une modélisation plus fine fondée sur l'utilisation d'éléments finis volumiques (lois de comportement tridimensionnelles, cf. section suivante), tout en gardant une partie de la richesse de description du comportement qu'ils peuvent fournir. Il existe de nombreux modèles globaux et semi-globaux dans la littérature et plusieurs codes de calcul en mettent à disposition des utilisateurs (exemple : Cast3M). La figure 167 montre une illustration de la simulation de la maquette « SMART 2013 » [12] par des modèles semi-globaux.

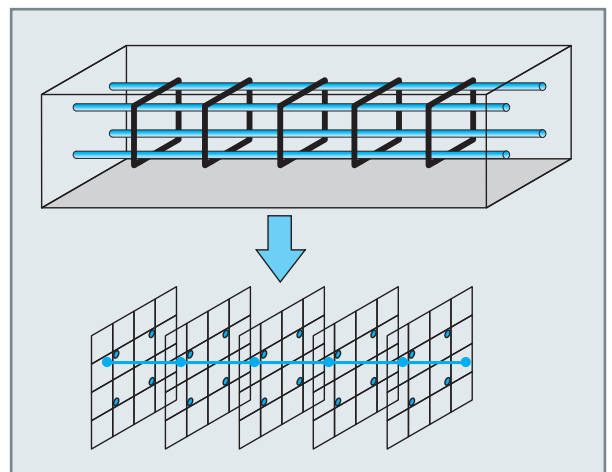


Fig. 166. Illustration du principe de base des éléments finis multi-fibres.

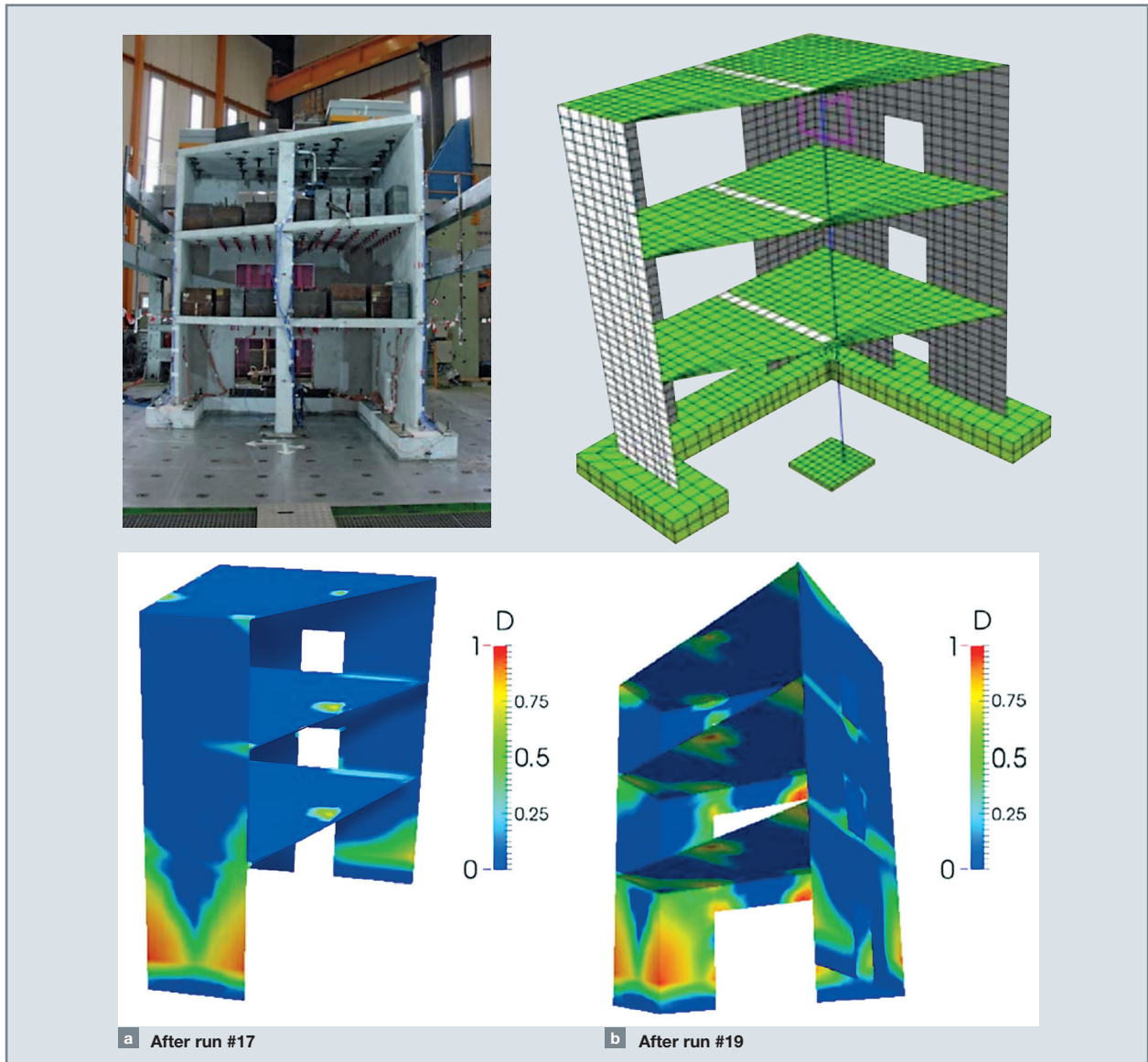


Fig. 167. Modélisation semi-globale. Simulation de la réponse sismique de la maquette « SMART 2013 » [12] à l'aide d'une modélisation coques multi-couches pour les voiles. Vue de la maquette sur la table AZALÉE (plateforme TAMARIS), maillage d'éléments finis et cartes d'endommagement. Les réponses du béton et des barres d'armature ont été supposées non linéaires.

### Approches de modélisation locales

Dans ces approches, des éléments massifs ou volumiques sont utilisés pour le béton, avec des lois de comportement tensorielles (tridimensionnelles). Les aciers peuvent être modélisés avec des éléments volumiques, mais sont plus souvent représentés avec des éléments linéiques en fonctionnement uniaxial. La première représentation impose de gérer explicitement l'interface acier-béton (par exemple, *via* des éléments d'interface, éventuellement avec des lois de comportement non linéaire adaptées), tandis que, dans le second cas, la compatibilité cinématique entre l'acier et le béton est typiquement représentée *via* des relations cinématiques discrétisées à l'aide de multiplicateurs de Lagrange.

Ce type de représentation permet d'obtenir une description fidèle de la géométrie de la structure et met en œuvre, pour le béton, des modèles de comportement locaux assez complexes.

L'application de ces modèles pour simuler l'intégralité d'une structure en béton armé demeure cependant très problématique pour plusieurs raisons : la pertinence physique et la difficulté de calibrer les lois de comportement utilisées pour représenter le comportement du béton (et possiblement de l'interface acier-béton) ou les temps de calcul souvent prohibitifs. Ce dernier aspect devient encore plus important lorsque l'hétérogénéité du béton est considérée explicite-

ment dans le modèle en définissant certaines de propriétés mécaniques du matériau *via* des lois de distribution probabilistes (leur définition et calibration représentent un sujet de recherche à part entière). Dans ce cas, plusieurs dizaines (voire centaines) de calculs sont nécessaires afin de parvenir à la caractérisation de la réponse structurale en termes statistiques.

Des temps CPU élevés ne dérivent pas simplement de la complexité des lois de comportement ou de la taille des systèmes linéaires à résoudre. En effet, l'utilisation de lois adoucissantes (par exemple, celles développées dans le cadre de la mécanique de l'endommagement) dans le cadre de la méthode des éléments finis conduit à une dépendance « pathologique » au maillage utilisé pour discrétiser la structure (une solution unique ne peut pas être trouvée). Cela implique la nécessité d'utiliser des méthodes de régularisation (limites de localisation) pour identifier une solution numérique indépendante du maillage. Même avec les approches les plus simples et les moins rigoureuses sur le plan théorique (par exemple, la régularisation énergétique), cela peut conduire à utiliser des maillages assez raffinés, notamment en 3D. Le nombre d'éléments et de degrés de liberté peut vite devenir très élevé. Par conséquent, les temps de calcul peuvent donc être extrêmement importants et incompatibles avec les contraintes d'une utilisation courante de ces modélisations (en particulier dans le cadre de calculs dynamiques).

Ces contraintes ont motivé, au cours du temps, une activité de recherche majeure concernant le développement de techniques numériques permettant de coupler plusieurs niveaux de finesse de modélisation, réduisant ainsi les temps CPU. Les méthodes de *zooming* en sont un exemple (voir par exemple [13]). Leur application dans le cadre de calculs dynamiques est cependant assez rare.

---

### Modélisation avancée du béton

Autour des techniques de modélisation fine de la fissuration des bétons se développent des activités de recherche très intenses. Elles visent à améliorer la représentativité physique des lois de comportement, réduire les effets parasites associés aux techniques de régularisation classiquement utilisées et à développer des méthodes numériques pour optimiser les solveurs utilisés dans les calculs de structure.

#### Lois de comportement tridimensionnelles

En plus des aspects qu'une loi de comportement doit prendre en compte pour représenter finement la réponse mécanique du béton sous chargement monotone (perte de rigidité et adoucissement, dissymétrie du comportement en traction et en compression, anisotropie induite par le chargement, effets d'échelle...), la simulation du comportement du matériau sous chargement cyclique (comme dans le cas

d'un séisme) impose de considérer des phénomènes spécifiques tels que la progressivité de l'effet unilatéral (reprise de rigidité au passage en compression à la suite d'un chargement endommageant en traction) et les déformations résiduelles (lors du déchargement, le matériau ne retourne pas à un état de contraintes/déformations nulles), ainsi que les effets hystérétiques (souvent associés au frottement entre les lèvres des fissures et à une dissipation énergétique potentiellement importante). D'autres aspects à considérer sont la dilatance en compression (si le régime de fonctionnement de la structure considérée le nécessite), de même que l'augmentation de résistance à la traction en fonction du confinement.

Pour représenter l'ensemble de ces phénomènes, plusieurs lois de comportement macroscopique ont été proposées dans la littérature [14] [15]. Ces modèles sont typiquement formulés dans le cadre de la mécanique de l'endommagement, de la théorie de la plasticité ou couplent ces deux cadres théoriques. La mécanique de l'endommagement isotrope ou anisotrope permet de représenter aisément la perte de rigidité associée à la dégradation du matériau. Dans ces approches, une variable d'endommagement scalaire ( $d \in [0,1]$ ) ou tensorielle (d'ordre deux  $\mathbf{D}$ , ou supérieure) est introduite pour décrire la dégradation des propriétés élastiques associée au processus de fissuration.

Dans ce contexte, l'effet unilatéral peut être considéré *via* la modification de l'énergie libre du modèle en introduisant différentes décompositions (en parties positive et négative, décomposition spectrale) des tenseurs des contraintes et des déformations. Cependant, aucune déformation résiduelle (irréversible) ne peut être considérée. La théorie de la plasticité permet d'introduire cet ingrédient dans la formulation. Par ailleurs, si l'on associe les effets hystérétiques à un glissement frottant par une incompatibilité géométrique des surfaces des fissures, ce cadre théorique peut également servir pour décrire ce phénomène. La figure 168 illustre la réponse uniaxiale de deux formulations disponibles dans le code de calcul par éléments finis Cast3M.

#### Méthodes de régularisation

Il est bien connu que, lorsque le matériau s'adoucit, comme dans le cas des formulations continues développées dans le cadre de la mécanique de l'endommagement, la solution du problème d'équilibre n'est plus unique (bifurcation de la solution) et plusieurs solutions peuvent être obtenues. Dans le cadre de la méthode des éléments finis, cela conduit à une dépendance pathologique au maillage utilisé pour discrétiser le domaine de calcul. De plus, il est démontré théoriquement l'existence de solutions avec une dissipation nulle lors de la localisation.

Plusieurs techniques ont été proposées dans la littérature pour résoudre ce problème et retrouver une réponse indé-

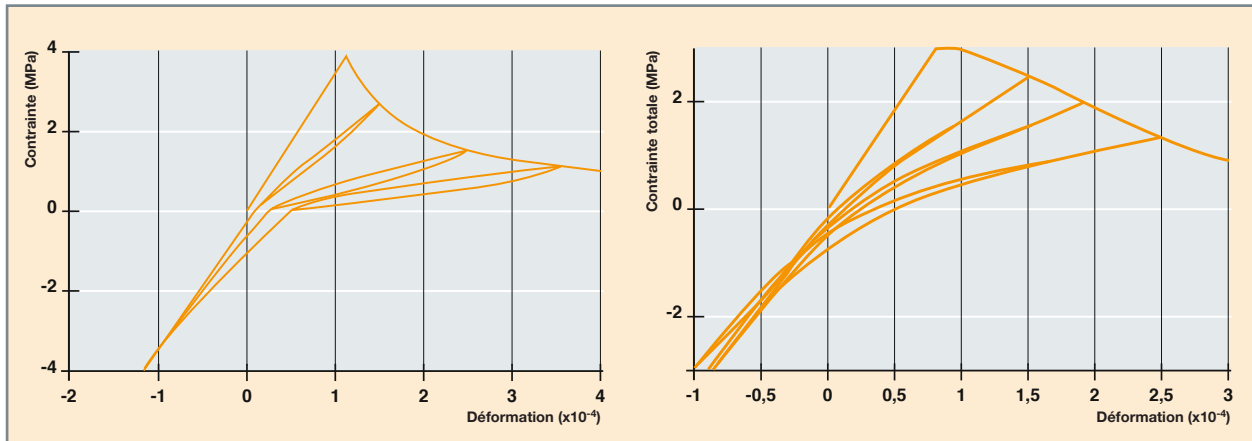


Fig. 168. Réponses uniaxiales des lois de comportement proposées dans [14] [15]. Mise en évidence de la progressivité de l'effet unilatéral et des phénomènes hystérétiques sous chargement cyclique.

pendante du maillage. Citons les méthodes dites non locales intégrales, les méthodes dites à gradient, la méthode *phase-field* et, plus récemment, la méthode *Lip-field*. Toutes ces méthodes introduisent une longueur interne/caractéristique  $l_c$  dans la formulation numérique. D'un point de vue physique, cette longueur caractéristique peut être reliée à la taille de la zone dans laquelle les microfissures, précurseurs d'une macrofissure, se forment. Au niveau numérique, cette longueur conduit à étaler la dissipation sur une zone de taille plus grande qu'une couche d'éléments finis (ce qui est le cas des méthodes dites locales).

#### Méthodes de régularisation classiques

**Régularisation énergétique.** La régularisation énergétique consiste à modifier les paramètres de la loi de comportement (typiquement, l'énergie de fissuration) pour obtenir une dissipation élémentaire qui soit indépendante de la taille de l'élément fini. Le fait de représenter une dissipation surfacique (celle liée à la fissuration localisée) par une dissipation volumique *via* une loi de comportement développée dans le cadre de la méthode des milieux continus, introduit naturellement une longueur caractéristique (proportionnelle à la taille de l'élément fini) dans la formulation. Il s'agit d'une approche simple à mettre en œuvre et très utilisée dans la pratique du calcul de structure. En raison de son coût de calcul très faible, elle représente souvent la seule méthode applicable lors de la simulation de structures 3D complexes.

**Méthode non locale intégrale.** Les formulations non locales intégrales [16] sont largement utilisées en vertu de leur simplicité de mise en œuvre et de leur robustesse numérique. Selon ces formulations, l'évolution des variables représentant la non-linéarité du matériau (par exemple, l'endommagement) est pilotée par une variable non locale obtenue par une moyenne pondérée du champ local correspondant sur le domaine  $\Omega$ . Ce type d'approches est facilement adaptable

aux modèles couplant endommagement et plasticité ou bien à l'endommagement anisotrope. La limite principale de ce genre d'approche pour mener des calculs de structure est le temps CPU lié au calcul des grandeurs non locales. Dans le cadre d'un calcul par la méthode des éléments finis, l'implémentation classique de cette approche implique une double boucle sur les points d'intégration du maillage avec accès aux routines implémentant la loi de comportement, la première fois pour calculer les grandeurs locales et la seconde pour intégrer la loi de comportement après avoir calculé les grandeurs non locales *via* une procédure *ad hoc*. De plus, elle présente certaines pathologies (initiation de l'endommagement en avance de la pointe de fissure, interaction de points de part et d'autre d'une fissure nouvellement créée) qui requièrent des traitements.

**Méthode du gradient implicite.** La régularisation par gradient est similaire à la précédente. Simplement, cette fois-ci, les grandeurs non locales sont calculées par la résolution d'une équation d'Helmholtz. Cette dernière peut être obtenue comme la troncature du développement de Taylor de l'approche intégrale non locale [17]. D'un point de vue numérique, cette approche présente l'avantage évident de permettre une résolution de l'équation d'Helmholtz en parallèle de l'équation d'équilibre *via* des schémas monolithiques ou partitionnés. Néanmoins, la condition aux limites [13] est artificielle et ne possède pas de signification physique à proprement parler.

**Méthodes variationnelles.** En parallèle de ces approches, des formulations variationnelles de la rupture et de l'endommagement ont vu le jour [18] [19]. La méthode la plus connue est certainement la méthode *phase-field* (ou « champs de phase » en français) [19] [20]. Dans ce cas, on cherche à minimiser par rapport à  $(\mathbf{u}, d)$  un potentiel énergétique écrit convenablement. Le champ d'endommagement solution est



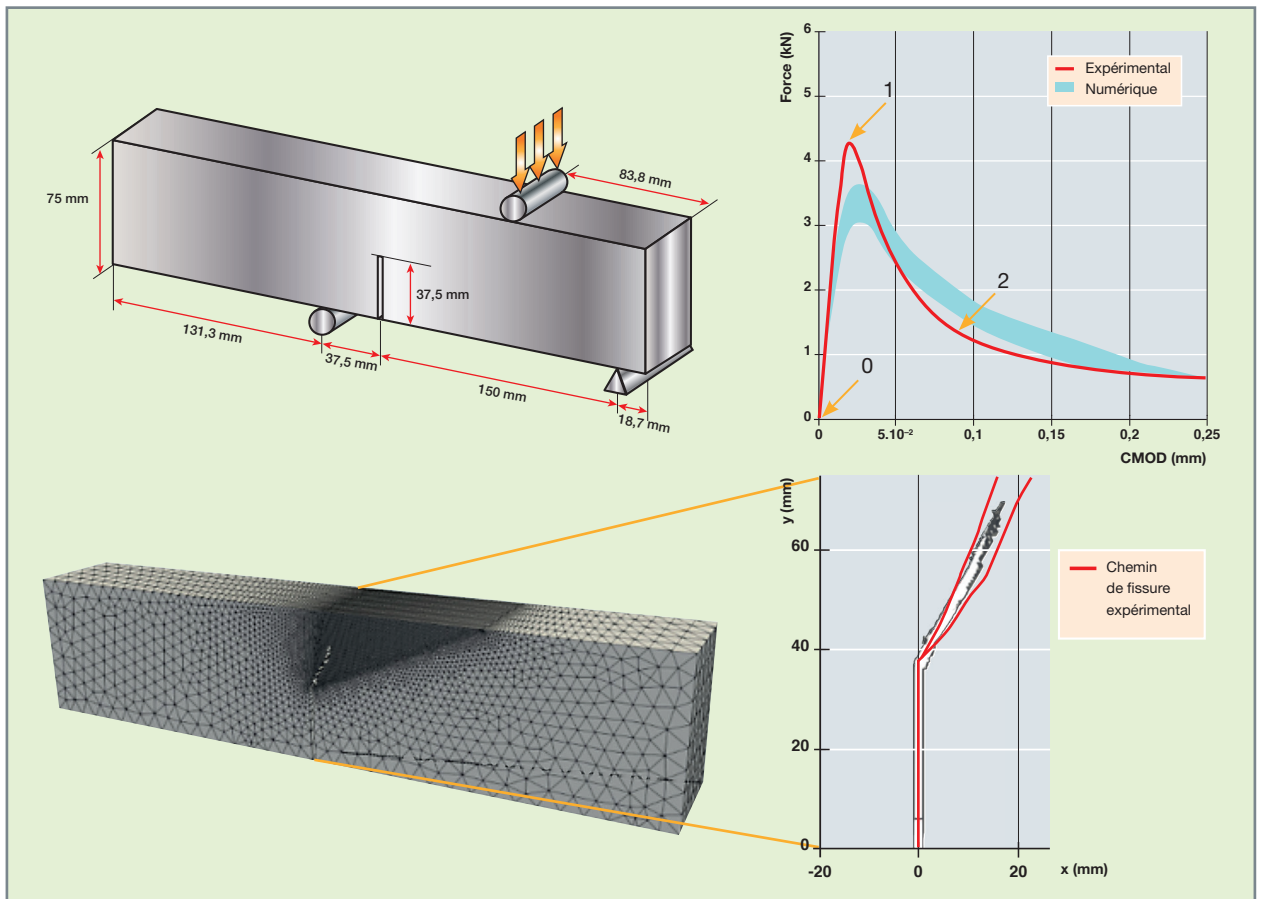


Fig. 169. Méthode eikonale à gradient implicite. Essai de flexion trois points avec ouverture de fissure en mode mixte : géométrie et conditions aux limites, comparaison entre les réponses numériques et expérimentales, comparaison entre les chemins de fissuration expérimentaux et numériques (dans le post-traitement des résultats, les éléments finis dont la valeur maximale de la composante principale majeure de l'endommagement dépasse 0,9999 ne sont pas affichés) [23].

donc recherché tel que  $d \in [0,1]$  et que la condition d'irréversibilité  $d \geq 0$  soit respectée. Le champ de déplacement  $\mathbf{u}$  doit respecter les contraintes d'admissibilité usuelles.

Dans sa formulation la plus classique, cette approche conduit à résoudre une équation d'Helmholtz pour le calcul de  $d$  avec une condition aux limites de Neumann sur le gradient de la variable d'endommagement. Le problème à résoudre présente de nombreuses analogies avec les méthodes à gradient. De plus, il partage avec ces dernières les mêmes critiques concernant la signification physique de la condition aux limites et ses implications numériques. L'imposition de la contrainte d'irréversibilité de l'endommagement représente un autre aspect délicat dans ces formulations. Dans la plupart des modèles, elle n'est pas introduite de manière explicite, mais elle est considérée *via* une fonction d'histoire [20]. Cela simplifie fortement la formulation numérique du problème, mais semble affecter les propriétés de convergence de la méthode.

### Méthodes de régularisation avancées

Plusieurs techniques de régularisation « avancées » ont été développées pour réduire les limitations illustrées précédemment. Dans la suite, l'attention est portée brièvement sur deux formulations récentes co-développées par le CEA, la méthode eikonale [21] [22] [23] (qui appartient à la famille des formulations « point par point ») et la méthode *Lip-field* [24] (qui appartient à la famille des formulations variationnelles).

**Méthode eikonale (intégrale et à gradient).** Dans les théories non locales intégrales classiques, les interactions non locales entre les points matériels sont contrôlées par la distance euclidienne entre eux. Cependant, cela conduit à des interactions non physiques à proximité de zones fortement endommagées, de trous et de fissures. Dans les simulations, cela se traduit par une diffusion parasite et non physique de l'endommagement. Des améliorations aux méthodes originales ont été proposées pour répondre à ces limitations et

décrire plus précisément les processus de localisation des déformations dans les milieux adoucissants. Parmi les contributions présentes dans la littérature, beaucoup proposent une évolution de la longueur interne fondée sur des considérations phénoménologiques ou micro-mécaniques. La formulation non locale eikonale [21] fournit une nouvelle interprétation des interactions non locales évolutives : l'on suppose que l'endommagement déforme l'espace dans lequel les distances d'interaction sont calculées. Dans le cadre de la méthode non locale intégrale, les distances d'interaction entre les points matériels sont obtenues en résolvant une équation eikonale isotrope indépendante du temps (une équation d'Hamilton-Jacobi stationnaire) avec une fonction métrique riemannienne dépendante de l'endommagement.

Les propriétés de régularisation de la méthode eikonale intégrale ont été étudiées par différents auteurs (voir, par exemple, [22]). Comme illustré par ces auteurs, la prise en compte des interactions évolutives au cours du processus d'endommagement permet naturellement de représenter une transition progressive endommagement-fissure (à la fin du processus d'endommagement  $d = 1$  dans un seul élément fini). L'utilisation de cadre mathématique/physique dans un calcul non linéaire par la méthode des éléments finis est cependant assez ardue, et cela principalement en raison des temps CPU nécessaires pour la résolution du problème eikonale pour chaque point d'intégration du maillage (où l'endommagement est calculé) par un algorithme *ad hoc*. La version à gradient de la méthode eikonale [17] [23] permet de surmonter ce problème et conduit à des temps CPU comparables avec la formulation à gradient implicite classique. La figure 169 montre la première application en 3D [23] de cette approche en considérant la loi d'endommagement anisotrope proposée par [26]. Les temps de calcul sont réduits sensiblement par rapport à la formulation intégrale.

**Méthode *Lip-field*.** Moës et Chevaugnon [24] ont introduit dernièrement une nouvelle façon d'éviter les localisations parasites. L'idée est d'imposer une régularité de Lipschitz sur les variables internes responsables de l'adoucissement. La régularisation de Lipschitz impose une régularité sur le champ d'endommagement qui est donc appelé *Lip-field*. Le CEA a récemment co-développé la première formulation *Lip-field* dans le cadre de la mécanique de l'endommagement anisotrope [25]. Dans ce modèle, la contrainte de régularité est imposée sur une fonction scalaire d'une variable scalaire d'endommagement cumulé  $\lambda$  (agrégant les contributions des différentes composantes du tenseur d'endommagement), tandis que la loi de comportement fait figurer directement la variable d'endommagement tensorielle. La figure 170 illustre un cas d'application simple de cette formulation. On observe que la variable d'endommagement cumulé  $\lambda$  et toutes les composantes du tenseur d'endommagement respectent la contrainte de régularité (compte tenu du caractère anisotrope du modèle, la composante de  $\mathbf{H}$  dans la direction orthogonale à la direction du chargement reste unitaire pendant tout le calcul).

#### Transition endommagement – fissuration

Jusqu'à présent, nous nous sommes intéressés à des méthodes de modélisation développées dans le cadre de la mécanique des milieux continus (modèles d'endommagement, plasticité, endommagement-plasticité). Il est bien connu, cependant, que le processus de fissuration du béton (et des matériaux quasi fragiles en général) est extrêmement complexe [27]. Il inclut une phase initiale caractérisée par la présence de microfissures distribuées dans un volume de matière de taille finie, puis certaines microfissures coalescent progressivement jusqu'à la formation d'une fracture (discontinuité cinématique).

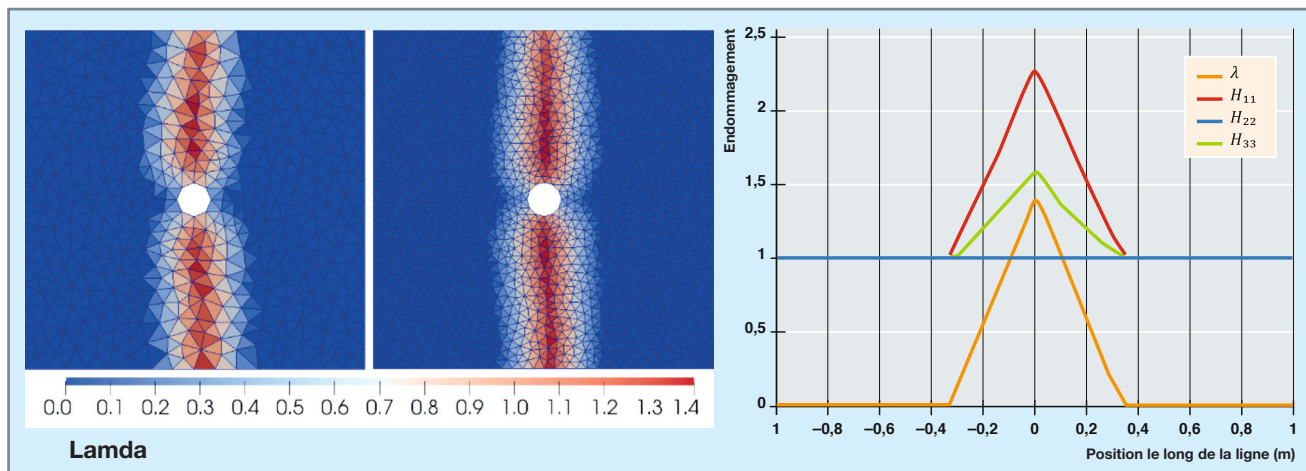


Fig. 170. Approche *Lip-field* appliquée à l'endommagement anisotrope [25]. Simulation de la propagation d'une fissure dans une plaque trouée. Mise en évidence du caractère anisotrope de l'endommagement (les composantes principales du tenseur  $\mathbf{H}$  évoluent différemment, mais respectent toutes la contrainte de régularité).

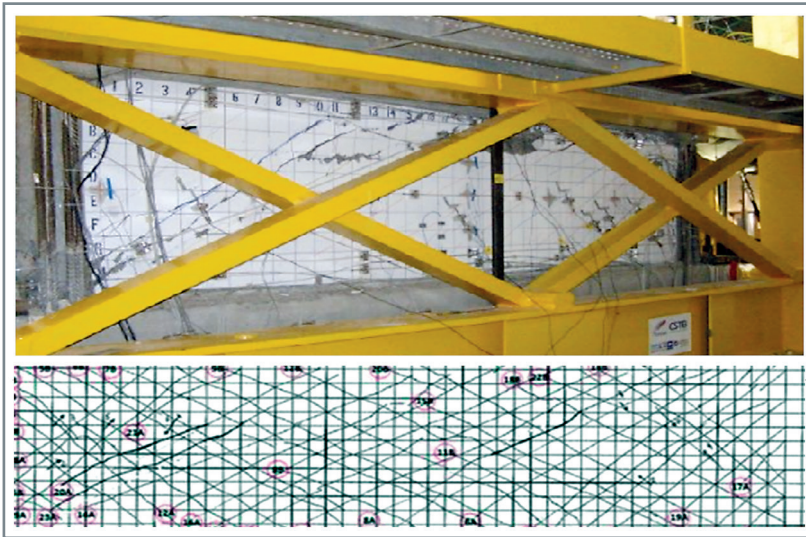


Fig. 171. Multi-fissuration d'un voile en béton armé sous chargement de cisaillement cyclique (projet national ceos.fr).

Compte tenu de cette évidence, il semble judicieux de se placer dans le contexte de la mécanique de l'endommagement (champs de déplacement continu, dissipation d'énergie volumétrique) pour décrire la phase de microfissuration et dans le contexte de la mécanique de la rupture (champs de déplacement discontinu, dissipation localisée) lorsqu'une discontinuité cinématique est formée (une surface de discontinuité cinématique est introduite de manière explicite dans le modèle).

#### Méthodes des discontinuités fortes

Plusieurs modèles (modèles de fissures cohésives, modèles à cinématique enrichie) et formulations numériques ont été élaborés dans la littérature pour modéliser la fissuration de manière explicite. Le point commun de ces formulations est de considérer explicitement la discontinuité de déplacement associé à l'apparition d'une fissure (le champ de déplacement devient discontinu). Pour les applications auxquelles nous nous intéressons, compte tenu de sa faible intrusivité en termes de programmation, la « méthode des éléments

finis enrichis » (EFEM) [28] présente un avantage évident par rapport aux autres méthodes. Dans les formulations EFEM classiques, une seule fissure par élément fini est considérée. Peu de formulations permettant de considérer deux discontinuités fortes non orthogonales ont été proposées dans la littérature (voir, par exemple, [29]). Cette amélioration permet cependant de représenter des

processus de fissuration relativement complexes, comme ceux qui ont lieu dans les structures soumises à des chargements cycliques (voir fig. 171).

#### Transition endommagement-fissure

La transition « continu-discontinu » reste un sujet de recherche ouvert. Plusieurs approches qui réalisent une transition d'une description implicite de la fissuration à une description explicite de la fissuration ont été proposées (voir, par exemple, [29] [30] ; cf. fig. 172). Kakarla *et al.* [29], par exemple, ont proposé une formulation qui permet de simuler la transition entre endommagement anisotrope (formulation micro-plan) et discontinuités fortes multiples dans le cadre de la méthode EFEM. Dans les modèles micro-plans, le comportement du matériau est obtenu en discrétisant les directions de l'espace selon un nombre fini de plans élémentaires. Des lois d'endommagement simples sont écrites micro-plan par micro-plan et le tenseur des contraintes est calculé par intégration sphérique (en 3D) ou circulaire (en 2D) des contributions élémentaires. Cette approche permet de

considérer naturellement l'anisotropie de l'endommagement et représente une solution alternative à l'utilisation de modèles d'endommagement avec des variables d'endommagement tensorielles. Par rapport à ces modèles, il est cependant plus difficile de reproduire des comportements élémentaires réalistes et les coûts computationnels peuvent être élevés (soit en temps CPU, soit en occupation de mémoire pour le stockage des variables internes du modèle).

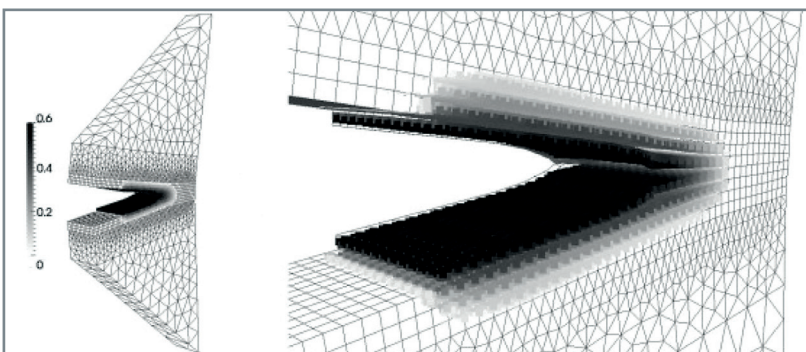


Fig. 172. Transition endommagement non local à gradient – fissure cohésive [30].



Les applications de ces approches en mécanique des structures en béton armé sont pratiquement absentes, mais des nombreux travaux de recherche sont en cours. Cela est lié non seulement à des difficultés de calcul, mais surtout aux difficultés théoriques associées à leur formulation, en particulier quand des modèles non locaux sont considérés pour décrire la phase initiale d'endommagement diffus [30].

**Ioannis POLITOPOULOS, Giuseppe RASTIELLO,  
Pierre-Étienne CHARBONNEL et Darius SEYEDI,**  
*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*

### ► Références

- [1] C. MENUN and D. KIUREGHIAN, *Journal of Structural Engineering*, 126(4), 2020, 467-473.
- [2] *Eurocode 8 : Design of structures for earthquake resistance, Part 1*, EN 1998-1, 2004.
- [3] R.J. GIBERT, *Vibrations des structures*, Eyrolles, p. 662-664, 1988.
- [4] I. POLITOPOULOS and C. FEAU, "Some aspects of floor spectra of 1DOF nonlinear primary structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36, 2007, 975-993, 2007.
- [5] I. POLITOPOULOS, "Floor spectra of MDOF nonlinear structures", *Journal of Earthquake Engineering*, 14(5, 726-742), 2010.
- [6] I. POLITOPOULOS, "A review of adverse effects of damping in seismic isolation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37, 447-465, 2008.
- [7] J.P. WOLF, P. OBERNHUEBER and B. WEBER, "Response of a nuclear plant on aseismic bearings to horizontally propagating waves", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 11, 483-499, 1983.
- [8] I. POLITOPOULOS and N. MOUSSALAM, "Horizontal floor response spectra of base-isolated buildings due to vertical excitation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41, 587-592, 2012.
- [9] P.-E. CHARBONNEL, "Fuzzy-driven strategy for fully automated modal analysis: Application to the SMART2013 shaking-table test campaign", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 152, 107388, doi:10.1016/j.ymssp.2020.107388, 2021.
- [10] M. DIAZ, P.-E. CHARBONNEL and L. CHAMOIN, "Robust energy-based model updating framework for random processes in dynamics: Application to shaking-table experiments", *Computers & Structures*, 264, 106746, doi:10.1016/j.compstruc.2022.106746, 2022.
- [11] M. DIAZ, P.-E. CHARBONNEL and L. CHAMOIN, "A new Kalman filter approach for structural parameter tracking: Application to the monitoring of damaging structures tested on shaking-tables", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 182, 109529, doi:10.1016/j.ymssp.2022.109529, January 2023.
- [12] B. RICHARD, S. CHERUBINI, F. VOLDOIRE, P.-E. CHARBONNEL, T. CHAUDAT, S. ABOURI, and N. BONFILS, "SMART 2013: Experimental and numerical assessment of the dynamic behavior by shaking table tests of an asymmetrical reinforced concrete structure subjected to high intensity ground motions", *Engineering Structures*, 109, 99-116, 2016.
- [13] A. LLAU, L. JASON, F. DUFOUR, and J. BAROTH, "Adaptive zooming method for the analysis of large structures with localized nonlinearities", *Finite Elements in Analysis and Design*, 106, 73-84, 2015.
- [14] B. RICHARD, and F. RAGUENEAU, "Continuum damage mechanics based model for quasi brittle materials subjected to cyclic loadings: Formulation, numerical implementation and applications", *Engineering Fracture Mechanics*, 98, 383-406, 2013.
- [15] M. VASSAUX, B. RICHARD, F. RAGUENEAU and A. MILLARD, "Regularised crack behaviour effects on continuum modelling of quasi-brittle materials under cyclic loading", *Engineering Fracture Mechanics*, 149, 18-36, 2015.
- [16] G. PUAUDIER-CABOT and Z. P. BAŽANT, "Nonlocal damage theory", *Journal of Engineering Mechanics*, 113(10), 1512-1533, 1987.
- [17] R. H. PEERLINGS, R. DE BORST, W. M. BREKELMANS and J. DE VREE, "Gradient enhanced damage for quasi-brittle materials", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 39(19), 3391-3403, 1996.
- [18] M. FRÉMOND and B. NEDJAR, "Damage, gradient of damage and principle of virtual power", *International Journal of Solids and Structures*, 33(8), 1083-1103, 1996.
- [19] B. BOURDIN, G. A. FRANCFORT and J. J. MARIGO, "The variational approach to fracture", *Journal of Elasticity*, 91, 5-148, 2008.
- [20] C. MIEHE, M. HOFACKER and F. WELSCHINGER, "A phase field model for rate-independent crack propagation : Robust algorithmic implementation based on operator splits", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 199(45-48), 2765-2778, 2010.
- [21] R. DESMORAT, F. GATUINGT and M. JIRÁSEK, "Nonlocal models with damage-dependent interactions motivated by internal time", *Engineering Fracture Mechanics*, 142, 255-275, 2015.
- [22] G. RASTIELLO, C. GIRY, F. GATUINGT and R. DESMORAT, "From diffuse damage to strain localization from an Eikonal Non-Local (ENL) Continuum Damage model with evolving internal length", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 331, 650-674, 2018.
- [23] B. R. NOGUEIRA, G. RASTIELLO, C. GIRY, F. GATUINGT and C. CALLARI, "Differential geometry-based thermodynamics derivation of isotropic and anisotropic eikonal non-local gradient (ENLG) damage models using a micromorphic media framework", *Engineering Fracture Mechanics*, 109670, 2023.
- [24] N. MOËS and N. CHEVAUGEON, "Lipschitz regularization for softening material models: the Lip-field approach", *Comptes rendus – Mécanique*, 349(2), 415-434, 2021.
- [25] B. MASSERON, G. RASTIELLO, N. MOËS and R. DESMORAT, "Lip-field regularization of anisotropic damage", *The Seventh International Conference on Computational Modeling of Fracture and Failure of Materials and Structures*, Prague, Czech Republic, p. 234, 2023.



- [26] R. DESMORAT, “Anisotropic damage modeling of concrete materials”, *International Journal of Damage Mechanics*, 25(6), 818-852, 2016.
- [27] A. E. HUESPE and J. Oliver, “Crack models with embedded discontinuities”, *Numerical modeling of concrete cracking*, pp. 99-159, Vienna, Springer Vienna, 2011.
- [28] J. OLIVER, A. E. HUESPE and P. J. SÁNCHEZ, “A comparative study on finite elements for capturing strong discontinuities : E-FEM vs X-FEM”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(37-40), 4732-4752, 2006.
- [29] S. KAKARLA, G. RASTIELLO, B. RICHARD and C. GIRY, “Coupled continuous–discrete formulation based on microplane and strong discontinuity models for representing non-orthogonal intersecting cracks”, *Engineering Fracture Mechanics*, 245, 107565, 2021.
- [30] S. CUVILLIEZ, F. FEYEL, E. LORENTZ and S. MICHEL-PONNELLE, “A finite element approach coupling a continuous gradient damage model and a cohesive zone model within the framework of quasi-brittle failure”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 237, 244-259, 2012.
- [31] V. DOLEAN, P. JOLIVET and F. NATAF, “An introduction to domain decomposition methods : algorithms, theory, and parallel implementation”, *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 2015.
- [32] M. A. BADRI, G. RASTIELLO and E. FOERSTER, “Preconditioning strategies for vectorial finite element linear systems arising from phase-field models for fracture mechanics”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 373, 113472, 2021.
- [33] M. HORI, T. ICHIMURA and K. FUJITA, “Simulation of seismic wave propagation and amplification”, *High-Performance Computing for Structural Mechanics and Earthquake/Tsunami Engineering*, pp. 23-70, Cham : Springer International Publishing, 2016.



## Chutes et impacts

**C**hocs, impacts ou chutes sont des accidents courants et redoutés pour tout type de structure, dont il est nécessaire d'évaluer et anticiper les effets afin d'en limiter les conséquences. Ce genre de sollicitation extrême se caractérise par des déformations structurelles pouvant être globalement ou localement très importantes, bien souvent irréversibles, avec des interactions éventuelles entre différentes pièces, le tout se produisant sur un temps physique très court. La réalisation d'expériences est complexe et coûteuse, d'autant plus que les essais sont nécessairement destructifs, réclamant autant d'éprouvettes ou maquettes que de configurations à tester, et nécessitent des moyens d'essais lourds. Le développement d'outils de calcul revêt alors un caractère fondamental pour le dimensionnement, l'étude du comportement et la démonstration de sûreté de structures soumises à ces chargements dits de « dynamique rapide ». Plusieurs approches existent, depuis les méthodes simplifiées, essentiellement basées sur des modèles empiriques, jusqu'aux simulations numériques à l'aide de codes de calcul dédiés intégrant des modèles complexes. Si les premières sont simples, rapides et faciles à mettre en œuvre, le besoin d'avoir une conception fiable avec des marges raisonnables impliquera la mise en œuvre des secondes, requérant alors des ressources plus conséquentes et une mise en œuvre plus longue et complexe.

Le premier paragraphe du chapitre sera consacré à une description générale de la modélisation des chocs et impacts. L'objet d'intérêt pouvant aussi bien être l'objet impactant que l'impacté, le second paragraphe s'attachera à discuter le cas particulier de la chute d'un emballage de déchets. Enfin, dans le troisième chapitre, les situations où la structure impactée (et non l'objet impactant) est principalement étudiée seront abordées, en développant l'exemple des impacts sur des éléments de génie civil (béton armé).

### La modélisation des chocs et impacts

La première caractéristique de la dynamique rapide est l'échelle de temps des phénomènes qui peut aller de quelques millisecondes à quelques centaines de millisecondes au maximum pour les impacts structurels (hors impact balistique). La seconde particularité est le haut niveau de déformations généralement constaté lors d'un choc ou d'un impact sur une structure, lié aux phénomènes phy-

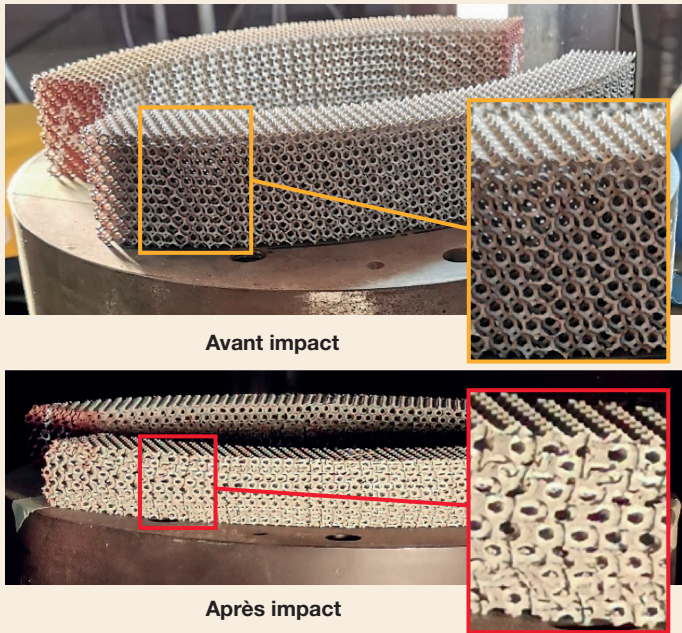
siques fortement non linéaires mis en jeu. La figure 173 (essai de chute sur un amortisseur de choc en mousse métallique obtenu par fabrication additive) est représentative de la brièveté et des fortes non-linéarités de l'impact : l'échantillon écrasé à gauche illustre différents types de non-linéarités (grandes déformations, plastification, contacts multiples...) et la courbe d'effort à droite montre la brièveté – non-linéarité des conditions aux limites (contacts, interaction fluide-structure...).

La résolution des équations de la dynamique par la simulation numérique implique classiquement une discrétisation spatiale (en l'occurrence, par la méthode des éléments finis) et une discrétisation temporelle. En dynamique rapide, la résolution temporelle se fait par un schéma de Newmark particulier : la méthode des différences centrées. Combinée à une discrétisation aux demi-intervalles de temps de la vitesse, elle permet d'exprimer le déplacement et la vitesse à l'instant  $t_{n+1}$  en fonction du déplacement, de la vitesse et de l'accélération à l'instant  $t_n$ . L'état à l'instant courant dépendant uniquement de l'état à l'instant précédent, ce schéma de résolution temporelle des équations de la dynamique est alors dit « explicite ». S'il permet une résolution directe des équations sans itérations, il impose en revanche une condition de stabilité, qui s'exprime sur le pas de temps du calcul. La méthode se montre donc particulièrement bien adaptée à la simulation de phénomènes courts et exhibant de fortes non-linéarités. Elle permet également de mettre en œuvre de gros modèles, et facilite la parallélisation des algorithmes. Le code de calcul EUROPLEXUS [1] dédié à la simulation en dynamique rapide est fondé sur cette méthode.

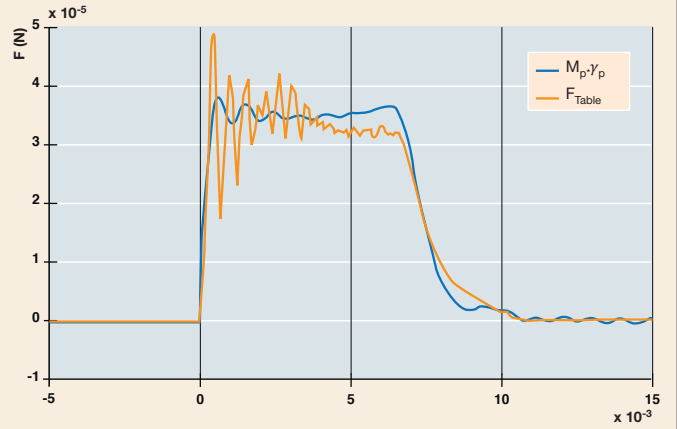
### Lois de comportement des matériaux

Chocs et impacts impliquent des déformations importantes, localement ou globalement. Les structures peuvent plastifier, s'endommager, voire rompre. La prise en compte des non-linéarités matériaux dans les codes de calcul est donc absolument fondamentale. Par ailleurs, le comportement post-élastique varie énormément d'un type de matériau à un autre (voir fig. 174) : les métaux présentent généralement un comportement isotrope de type élasto-plastique avec potentiellement de l'endommagement ; d'autres matériaux, comme le bois, affichent un caractère orthotrope, avec un comportement élastique fragile en traction et un comportement élasto-plastique avec compactage en compression.

### Échantillons avant et après impact



### Force d'impact mesurée (filtrée à 1 kHz)



Chute : M = 380 kg, h = 2 m

Fig. 173. Essais de chute sur amortisseur métallique obtenu par fabrication additive.

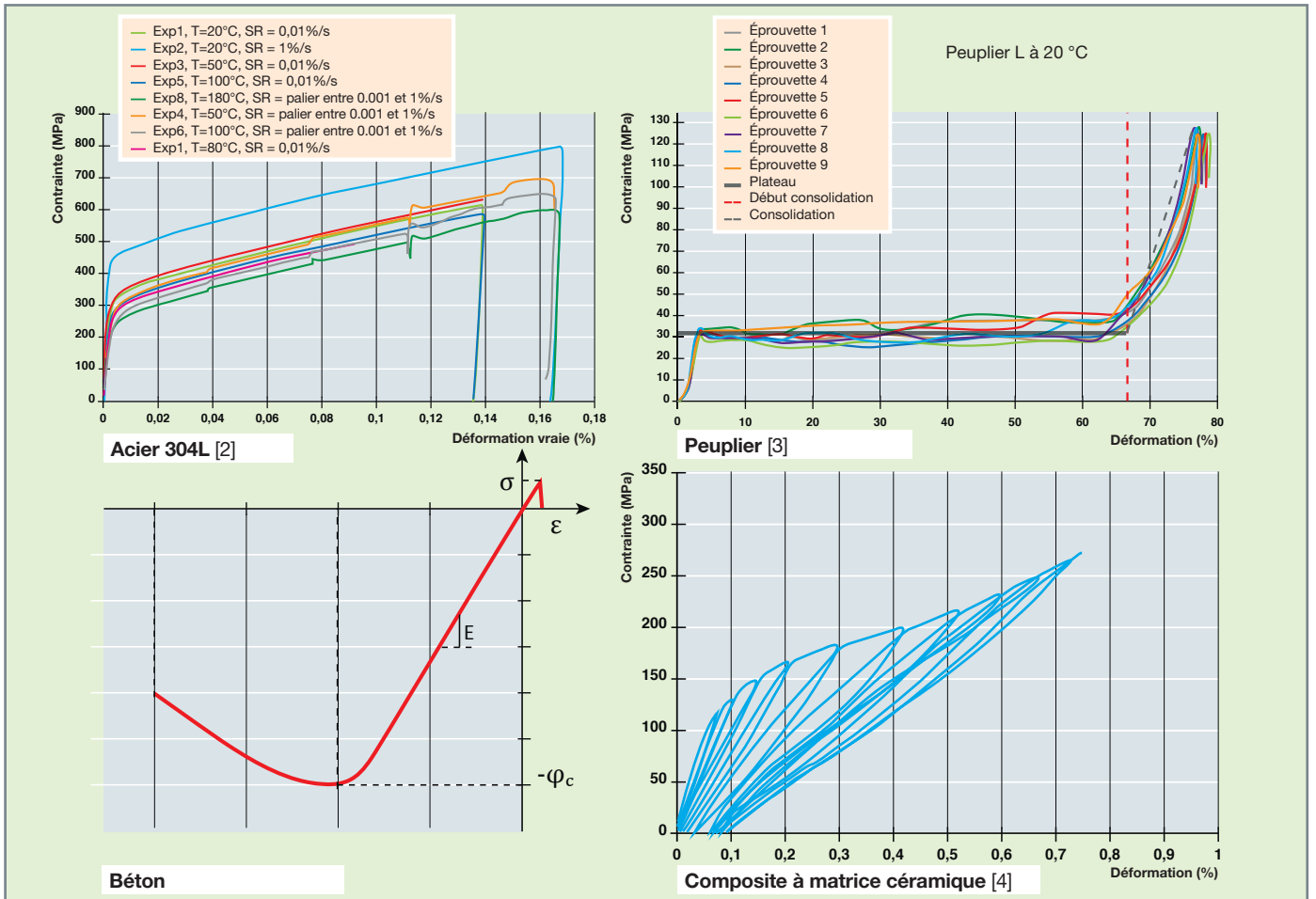


Fig. 174. Quelques exemples de lois de comportement non linéaires pour différents matériaux.



Ces derniers sont particulièrement intéressants pour leurs capacités d'absorption d'énergie et sont d'ailleurs souvent utilisés en tant qu'« absorbeurs » ou « amortisseurs » de choc (par exemple, dans les emballages de transport). Le béton, dont le comportement est encore plus complexe du fait de son hétérogénéité, est abordé de manière détaillée au paragraphe 3 de ce chapitre. Citons également les matériaux composites, constitués d'une matrice et de fibres aux caractéristiques très différentes qui leur confèrent un caractère anisotrope, avec des comportements différents en traction, compression ou cisaillement, et des phénomènes tels que l'endommagement, le délaminage...

Le choix de la loi de comportement matériau et de ses paramètres associés est probablement la partie la plus importante et la plus délicate lors de la mise au point d'un modèle de simulation numérique. Les lois de comportement non linéaires sont nombreuses, variées, parfois complexes, et font constamment l'objet de recherches, aboutissant à de nouveaux modèles ou à des améliorations des modèles existants. L'identification des paramètres d'un modèle peut par ailleurs s'avérer difficile pour les lois les plus sophistiquées. Bien souvent, ces caractéristiques sont inexistantes dans la littérature et nécessitent la mise en œuvre de moyens d'essais spécifiques, comme des barres de Hopkinson (voir encart ci-après).

Pour de nombreux matériaux, l'influence de la vitesse de déformation ( $\dot{\varepsilon}$ ) peut donc être prépondérante dans la simulation de choc ou d'impact. Plusieurs méthodes et/ou modèles permettent de la prendre en compte dans les codes de calcul, sous la forme de lois ou de courbes de type  $\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ . On peut citer quelques exemples ci-dessous, parmi les plus couramment utilisés pour les matériaux métalliques :

- Modèle de Cowper-Symonds :

$$\sigma = \sigma_y \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/p} \right]$$

avec  $\sigma_y$  contrainte d'érouissage statique,  $C$  et  $p$  paramètres du modèle de Cowper-Symonds. On peut trouver des variantes de ce modèle, notamment dans EUROPLEXUS, avec par exemple un coefficient multiplicateur de la contrainte statique dépendant de la vitesse de déformation, mais également de la déformation, ou encore des modèles dédiés à la modélisation des aciers d'armatures.

- Modèle de Johnson-Cook :

$$\sigma = \left[ A + B (\varepsilon_{eq}^p)^n \right] \left[ 1 + c \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_{eq}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] (1 - T^{*m}),$$

avec  $[A + B (\varepsilon_{eq}^p)^n]$  définissant la contrainte d'érouissage,  $c$  et  $\dot{\varepsilon}_0$  paramètres définissant la sensibilité à la vitesse de déformation,  $T^* = \frac{T - T_0}{T_m - T_0}$  avec  $T_0$  température de référence et

### Barres de Hopkinson

Pour des vitesses de déformation élevées (typiquement au-delà de  $100 \text{ s}^{-1}$ ), la caractérisation dynamique de matériaux se fait généralement via des barres de Hopkinson [5] (voir fig. 175), dont le concept date de plus d'un siècle [6]. Un choc sur une barre d'entrée génère une onde incidente qui se propage jusqu'à l'échantillon. Une partie de l'onde est réfléchie et une partie est transmise dans la barre de sortie. La mesure des déformations élastiques des barres permet de déterminer les caractéristiques dynamiques du matériau. Ce concept a été étendu à des barres de Hopkinson fonctionnant en traction, en cisaillement ou en torsion. Au cours de la dernière décennie, les importants progrès dans le domaine de l'imagerie à haute vitesse et des techniques de **mesures plein champ\*** ont ouvert la voie à de nouveaux outils. En effet, des mesures de champs hétérogènes peuvent maintenant être réalisées avec une précision remarquable, si bien qu'ils peuvent être exploités par méthodes inverses pour obtenir les paramètres matériaux constitutifs. On trouve ainsi, dans la littérature récente, de plus en plus de références relatives à la méthode des champs virtuels (*virtual fields method* : VFM) et à l'essai d'impact inertiel analysé par imagerie rapide (*image-based inertial impact* : IBI) [7].

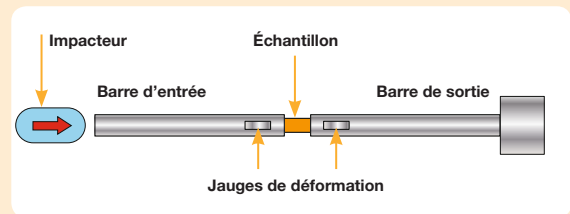


Fig. 175. Principe des barres de Hopkinson.

$T_m$  température de fusion, l'exposant  $m$  définissant la sensibilité à la température. Le modèle complet prend donc également en compte les effets de la température.

- Famille de courbes de points  $(\sigma, \varepsilon)$  pour différentes vitesses de déformation  $\dot{\varepsilon}$  : les courbes sont issues d'essais réalisés à plusieurs vitesses de déformation.

Il existe quelques références dans la littérature fournissant des valeurs de paramètres pour les différentes lois mentionnées ci-dessus, dont certaines proposées dans la documentation EUROPLEXUS, mais la détermination de ces paramètres nécessite généralement la mise en place d'essais dynamiques.

La modélisation de la rupture présente en soi un défi. Parce qu'elle est complexe et nécessite d'être bien caractérisée, elle n'est parfois pas prise en compte : l'ingénieur se contente de vérifier si certains critères de rupture sont atteints ou non et détermine, sur cette base, la tenue mécanique de sa structure au chargement de dynamique rapide.

Dès qu'un critère est atteint, le calcul au-delà de cet instant ne permet donc plus de prédire correctement le comportement de la structure si la rupture n'est pas modélisée. Néanmoins, il est parfois nécessaire d'aller plus loin et d'être donc capable de modéliser la rupture, ou en tout cas de la prendre en compte dans la simulation. À noter que le choix du ou des critères de rupture nécessite déjà une démarche de la part de l'utilisateur, qui va devoir prendre en compte ses objectifs, la nature des matériaux susceptibles de rompre, et les schémas de rupture envisageables, liés au comportement induit par le chargement. Si certains critères sont relativement simples à définir (par exemple, un critère en déformation), d'autres font appel à des modèles beaucoup plus élaborés (comme pour les matériaux composites). Concernant la modélisation de la rupture et de la fissuration à proprement parler, plusieurs méthodes existent, simples ou avancées, qui peuvent varier suivant le type de matériau et de comportement. On peut notamment citer, à titre d'exemple, les méthodes suivantes :

- La méthode par érosion d'élément : quand un critère est atteint dans un élément (par exemple, déformation plastique équivalente maximale ou déformation principale maximale, pression minimale, endommagement critique, valeur de pas de temps minimale, distorsion de l'élément...), l'élément est supprimé du modèle, créant ainsi un « trou » dans le maillage. La méthode est simple, efficace, mais présente un certain nombre d'inconvénients, dont la très forte dépendance au maillage. Il faudra nécessairement utiliser des maillages très fins dans les zones où un critère d'érosion est défini et tenter d'établir une convergence en maillage, pas toujours simple à obtenir ;
- la méthode X-FEM (*extended finite element method*) ou méthode des éléments finis étendus : l'enrichissement des degrés de liberté (déplacements nodaux) permet de représenter la discontinuité due à la fissure, de localiser le front de fissure et de « capter » la singularité en front de fissure. Dans EUROPLEXUS, l'enrichissement est de type « saut » avec une fonction de Heaviside, impliquant la découpe d'un élément traversé par une fissure, complété d'une méthode de diagonalisation particulière de la matrice de masse pour éviter la chute du pas de temps [8]. La représentation de la fissure est quant à elle réalisée par la méthode « *level set* » : la fissure est représentée par l'iso-valeur 0 des fonctions de niveau ou « *level sets* ». La méthode peut cependant présenter des problèmes de stabilité en explicite, et ne donne pas la possibilité de « bifurcations » de fissure ;
- la méthode du champ de phase : la discontinuité liée à la fissuration est approchée par un champ d'endommagement diffus  $d$  qui dépend d'une longueur caractéristique  $l$ . Le matériau est complètement endommagé lorsque le champ  $d$  vaut 1, ce qui donne la position de la fissure. Le

champ d'endommagement est obtenu en minimisant la fonctionnelle d'énergie volumique de fissuration, dépendante de l'énergie de fissuration et de la longueur caractéristique. Cette méthode présente peu de dépendance au maillage pour la modélisation de la fissuration, ce qui en fait son principal atout. Son implémentation a été réalisée dans EUROPLEXUS via une résolution implicite [9], portée ensuite en résolution explicite pour optimiser la méthode.

### Gestion des contacts

Enfin, les problématiques de choc et impact impliquent nécessairement des contacts intermittents ou discontinus entre pièces, qu'il est nécessaire de modéliser facilement et efficacement. Ces contacts étant parfois difficilement prédictibles (voir fig. 176), la définition des surfaces en contact ou pouvant entrer en contact doit pouvoir se faire de manière très globale. Les codes de calcul en dynamique rapide traitent généralement les problèmes de contact en deux temps : une première étape détecte les contacts, puis une seconde calcule les forces de contact pour empêcher la pénétration. C'est ainsi le cas dans EUROPLEXUS, qui propose plusieurs méthodes pour la détection du contact ou du glissement et, pour chacune de ces méthodes, plusieurs approches pour calculer les forces de contact.

Parmi les principales méthodes de détection de contact, on peut notamment citer la technique des éléments maîtres et des nœuds esclaves et la méthode des *pinballs*. La première technique s'appuie sur la recherche, à chaque pas de calcul, d'une éventuelle pénétration des nœuds esclaves à travers les éléments maîtres. Cette technique permet de traiter les situations les plus courantes (voir fig. 177, gauche), mais présente néanmoins quelques limites pour des configurations de contact particulières comme celles illustrées en



Fig. 176. Contacts multiples lors d'un impact sur un tube.

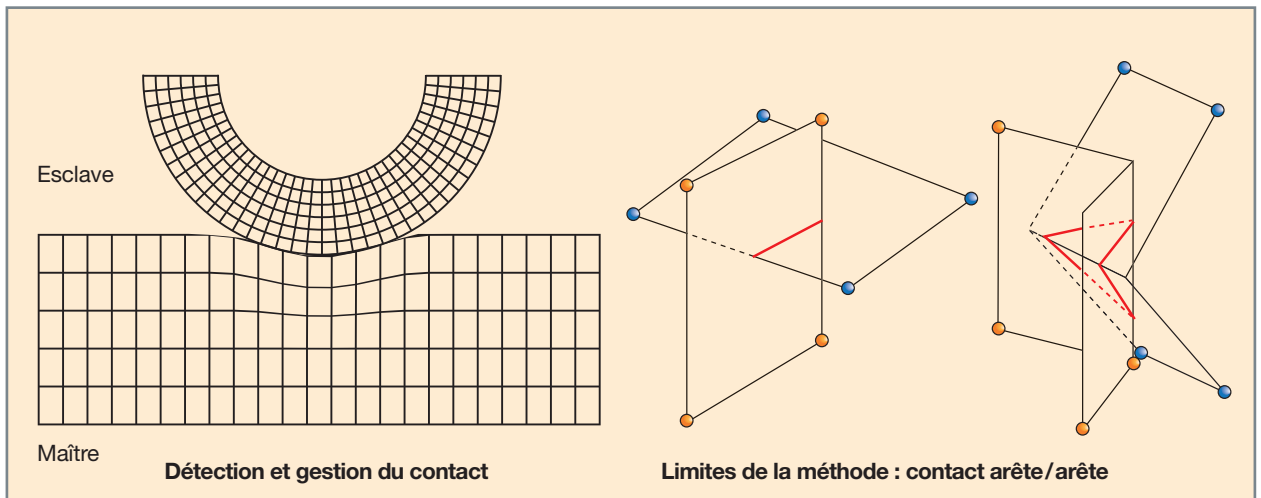


Fig. 177. Détection du contact par la méthode des éléments maîtres et des nœuds esclaves.

figure 177 (droite). À noter que certains codes de calcul proposent des algorithmes avancés qui permettent de détecter des contacts de type arête/arête notamment, mais qui sont généralement nettement plus coûteux en temps CPU. Dans EUROPLEXUS, la méthode des *pinballs*, un peu moins précise pour les situations courantes que la méthode précédente, permet en revanche de détecter le contact dans toutes les situations. La technique consiste à associer à chaque élément fini susceptible d'entrer en contact avec un autre une sphère permettant de rechercher une interpénétration (voir fig. 178). Cette méthode, qui propose plusieurs options pour définir le rayon des sphères (sphère circonscrite, sphère à volume équivalent), est utilisable pour des modélisations 1D, 2D et 3D.

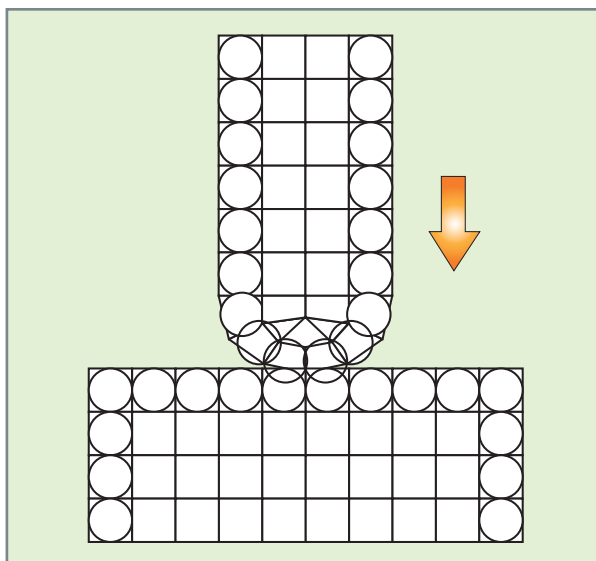


Fig. 178. Détection du contact – Méthode des *pinballs*.

Les forces de contact peuvent être calculées, entre autres, par la méthode des pénalités ou la méthode des multiplicateurs de Lagrange. La méthode des pénalités consiste à introduire une raideur (dite de pénalité), en compression uniquement, entre le nœud esclave et la surface maîtresse pour « résister » à la pénétration. Le calcul de cette raideur, dépendant des caractéristiques matériaux et des dimensions des éléments en contact, peut présenter une difficulté (paramètre « numérique » à calibrer), en particulier dans le cas de contacts entre matériaux ou maillages très différents. La méthode des pénalités est cependant réputée stable et offre un bon compromis entre précision et rapidité. La méthode des multiplicateurs de Lagrange consiste à imposer une condition cinématique sur certains degrés de liberté des nœuds en contact, à savoir l'égalité de leur vitesse au pas  $(n + 3/2)$ . Cette méthode présente l'avantage de ne pas dépendre d'un paramètre numérique (comme c'est le cas pour la méthode des pénalités) et est donc particulièrement fiable et précise. En contrepartie, elle se révèle nettement plus coûteuse en temps CPU.

### Comportement de l'élément impactant : l'exemple de la chute d'un emballage

L'agrément d'un emballage de transport de matières radioactives par les autorités de sûreté requiert de le qualifier vis-à-vis des prescriptions d'épreuves réglementaires établies par l'AIEA [10]. Parmi l'ensemble de ces exigences, le colis doit notamment être capable de résister aux conditions accidentelles de transport qui comportent, entre autres, deux types de chute, à savoir une chute libre de 9 mètres de hauteur sur une surface indéformable et une chute de 1 mètre de hauteur sur un poinçon plat en acier de diamètre 150 millimètres pour les colis de type B (colis permettant de

transporter les substances les plus radioactives, comme les combustibles usés provenant des centrales nucléaires). À l'issue de ces épreuves mécaniques, un incendie de 30 minutes à 800 °C est appliqué à l'emballage. Les règles de l'AIEA préconisent des démonstrations par essais « de manière à subir le dommage maximum » et de vérifier la bonne tenue mécanique et fonctionnelle du colis. Il est alors à la charge du requérant d'utiliser les méthodes de son choix (essais, calculs analytiques, simulations avancées...) pour apporter la démonstration de l'intégrité de son emballage auprès des autorités de sûreté. À noter qu'au cours des dernières années, des agréments (autorisations de transport) sur de nouveaux modèles d'emballages de transports ont été accordés par les autorités de sûreté françaises sur la base de démonstrations mécaniques purement calculatoires (calculs dynamiques basés sur une modélisation robuste et justifiée).

Les emballages de transport sont constitués d'un corps dans lequel vient se loger le contenu radioactif et, en général, de deux capots amortisseurs positionnés à chaque extrémité du corps dont l'intérêt réside dans leur capacité à absorber l'énergie du choc lors d'éventuelles chutes. Ces capots sont généralement constitués de blocs de bois, compte tenu notamment de son efficacité en tant que matériau absorbant (mais également en tant qu'écran thermique) et de son excellent rapport qualité-prix, confinés dans des enveloppes en acier. La conception et la fabrication de ces capots font donc l'objet d'une grande vigilance, puisque c'est essentiellement eux qui vont garantir l'intégrité du colis en cas de chute et son étanchéité à l'issue de l'épreuve d'incendie.

### Un matériau particulier : le bois

Le bois est, du fait de sa structure cellulaire orientée selon la direction longitudinale (L), un matériau orthotrope (voir fig. 179). Les caractéristiques mécaniques dans cette direction sont très différentes de celles observées dans les directions radiale (R) et tangentielle (T). À titre d'exemple, le module d'Young longitudinal peut être, selon les essences considérées, de deux à vingt fois supérieur à celui mesuré dans les deux autres directions (voir fig. 174).

En compression, il est observé, quelle que soit l'essence de bois utilisée, une courte phase élastique, puis une longue phase plastique jusqu'au seuil de consolidation, appelée plateau de compression, au cours de laquelle les porosités se comblent peu à peu et le matériau subit de larges déformations pour une faible variation de contraintes, suivie enfin d'une phase de consolidation qui apparaît lorsque les porosités sont comblées et qui est associée à une rigidification importante du matériau (voir fig. 180) [11]. En traction, le comportement est de type élastique fragile, avec une phase plastique très courte menant rapidement à la rupture (rupture des fibres du bois).

Pour décrire le comportement élastique du bois, neuf caractéristiques élastiques sont nécessaires : trois modules d'Young ( $E_L$ ,  $E_R$ ,  $E_T$ ), trois modules de cisaillement ( $G_{LR}$ ,  $G_{RT}$ ,  $G_{TL}$ ), trois coefficients de Poisson ( $\nu_{LR}$ ,  $\nu_{RT}$ ,  $\nu_{TL}$ ). L'identification de ces paramètres nécessite plusieurs essais quasi statiques. Cependant, le tracé des constantes élastiques en fonction de la densité et selon la nature de l'essence (résineux ou feuillu) met en évidence une augmentation de leurs valeurs lorsque la densité s'accroît [12], qui est particulièrement vraie pour le balsa [3]. Plusieurs modèles prédictifs ont donc été bâtis sur cette constatation, permettant de calculer les caractéristiques mécaniques d'un bois en fonction de sa

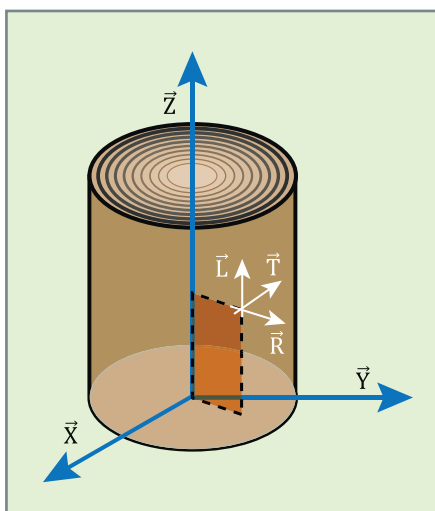


Fig. 179. Schéma des directions d'orthotropie du bois idéalisé.

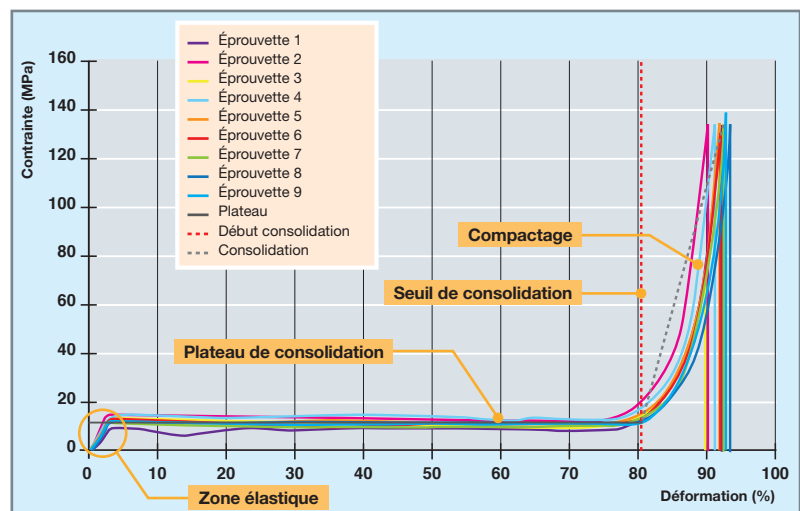


Fig. 180. Essai de compression dans le sens longitudinal à 20 °C sur du balsa de densité 150 kg/m<sup>3</sup> [3].



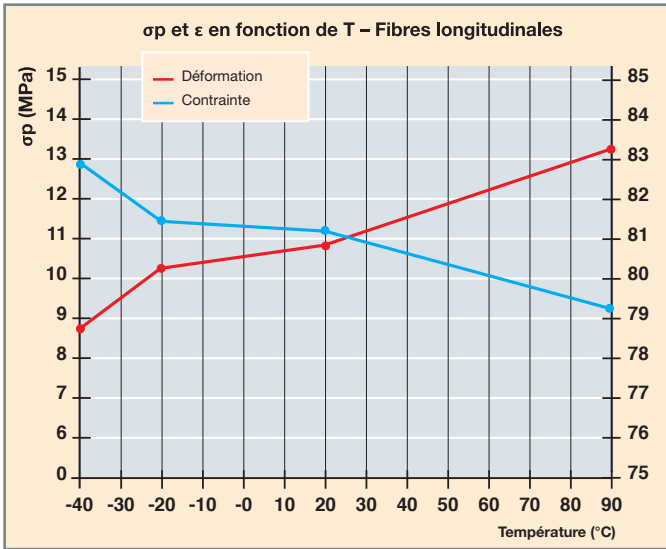


Fig. 181. Évolution des caractéristiques du seuil de consolidation ( $\epsilon_c$ ) et du plateau de compression ( $\sigma_p$ ) en fonction de la température [3].

densité relativement à celle d'un bois standard (résineux ou feuillu). Des modèles existent aussi pour estimer la contrainte maximale (plateau de compression) [13], permettant d'obtenir cette valeur en fonction des caractéristiques de la matière ligneuse (masse volumique de 1 500 kg/m<sup>3</sup>, contrainte limite axiale de 350 MPa) et de la masse volumique du bois considéré. Cette caractéristique permet notamment d'évaluer l'énergie absorbée lors de l'écrasement d'une section de bois. Enfin, d'autres paramètres, comme le taux d'humidité ou la température, peuvent influencer notablement sur le comportement du bois. Il existe quelques modèles avancés dans la littérature qui prennent en compte ces deux paramètres. Cependant, les exigences de fabrication imposent de prendre en compte un bois sec, avec un taux d'humidité inférieur à 15 %, contrainte également appliquée aux tests de R&D réalisés sur éprouvettes ou de validation des lots de bois approvisionnés pour la fabrication d'un capot. Concernant la température, des essais réalisés sur différentes essences ont démontré son effet sur le comportement du bois, en particulier sur la phase de consolidation. On peut notamment citer l'exemple du balsa dont le seuil de consolidation ( $\epsilon_c$ ) augmente avec la température, alors que le plateau de consolidation ( $\sigma_p$ ) diminue avec celle-ci (voir fig. 181 [3]).

### Les méthodes de pré-dimensionnement

Le processus de conception d'un emballage passe généralement par une étape de pré-dimensionnement, suivie d'une étape de simulations par éléments finis, avant de valider sa tenue par des essais de chute<sup>9</sup> sur maquettes éventuelle-

9. À noter qu'en décembre 2020, ORANO a obtenu, pour son nouvel emballage TN EAGLE, un premier agrément pour cinq ans et pour la première fois sur la base d'une démonstration principalement numérique.

ment à échelle réduite. Le pré-dimensionnement des capots amortisseurs a ainsi pour objectif d'évaluer, entre autres, leurs dimensions principales (hauteur, diamètre, essence de bois, forme des blocs, orientation des fibres), sur la base des configurations de chute de 9 mètres de hauteur (chute verticale, horizontale ou oblique), ou encore d'estimer l'épaisseur minimale de la plaque d'acier pour éviter la perforation en configuration de chute sur poinçon (de 1 mètre de hauteur). Les données d'entrée nécessaires sont la géométrie du corps de l'emballage (diamètre et longueur), la masse maximale de l'ensemble (corps et capots), les configurations de chute (type, hauteur, inclinaison), et les caractéristiques du matériau absorbant, en l'occurrence du bois (contrainte limite  $\sigma_y^L$  et seuil de consolidation  $\epsilon_c$ ). Plusieurs méthodes sont proposées dans le *Guide DM2S sur l'intégrité mécanique des colis de transport de matières radioactives sous chutes* (troisième version) [14].

Le pré-dimensionnement des épaisseurs de bois des capots se fait en considérant une déformation admissible  $\epsilon_a$  (par exemple :  $0,5\epsilon_c$ ) pour éviter que le bois n'atteigne son seuil de consolidation  $\epsilon_c$ , ce qui entraînerait un pic d'accélération potentiellement dommageable. La hauteur de bois (pour la chute verticale) et son épaisseur radiale (pour la chute horizontale) peuvent alors être approchées en prenant l'hypothèse que l'amortisseur absorbe toute l'énergie cinétique initiale. Cette hypothèse est pénalisante, car, dans ce cas, on ne prend pas en compte la participation des tôles métalliques qui constituent également le capot amortisseur de chocs et qui participent activement à l'absorption de l'énergie. Les épaisseurs sont ensuite vérifiées pour la chute oblique. À noter que les épaisseurs résiduelles radiales de bois après chute doivent permettre d'éviter un impact sur un élément rigide/robuste du corps de l'emballage, tel que les tourillons, oreilles de manutention ou d'arrimage.

La figure 182 présente quelques modèles utilisés pour évaluer les épaisseurs de bois suivant les configurations. Si l'exercice est très simple pour la chute verticale et relativement aisé pour la chute horizontale, la vérification en chute oblique est plus ardue, l'estimation de l'énergie absorbée par le bois nécessitant la formulation de la contrainte limite du bois dans la direction de la chute et une approximation de la surface de contact entre le capot et le sol.

Pour le pré-dimensionnement du système de fixation (vis + taraudages) retenant les différents couvercles et tapes sur le corps de l'emballage, il est nécessaire d'évaluer la décélération maximale subie par le corps de l'emballage et amortie par les capots tels que pré-dimensionnés. Des méthodes simplifiées sont également décrites dans [14] pour évaluer cette donnée d'entrée fondamentale.

Pour la configuration de chute sur poinçon (chute du colis d'une hauteur de 1 mètre sur un poinçon cylindrique de 150 millimètres de diamètre considéré comme indéfor-

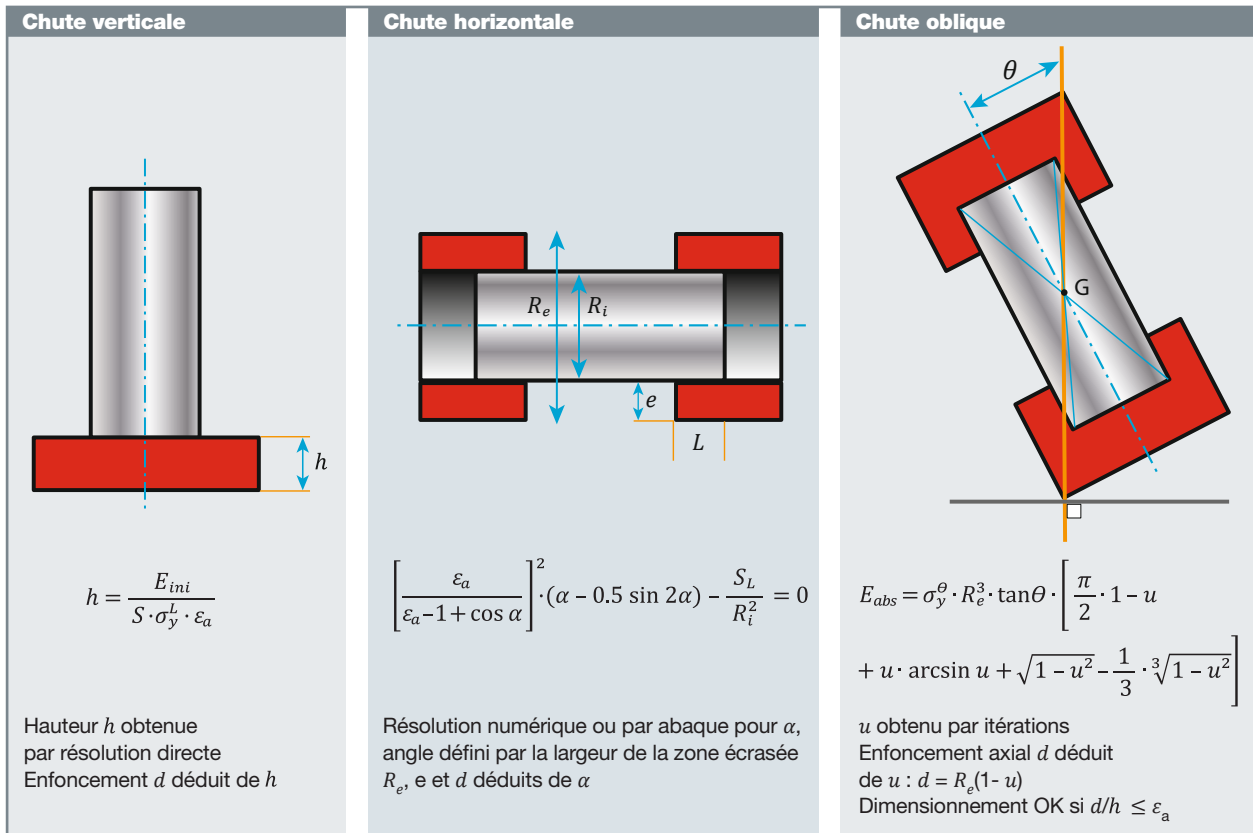


Fig. 182. Méthodes simplifiées de pré-dimensionnement des capots pour les chutes réglementaires [15].

mable), particulièrement agressive, l'AIEA [16] préconise, en première approche, d'utiliser la formule suivante pour pré-dimensionner l'épaisseur de la virole externe ( $t$  épaisseur de la tôle en centimètres,  $W$  masse du colis en kilogrammes,  $S$  résistance à la traction du matériau en pascals, soit  $R_m$ ) :

$$t = 2148,5 \left( \frac{W}{S} \right)^{0,7}$$

Il est généralement nécessaire de renforcer les capots à l'aide d'un dispositif anti-poinçonnement, très souvent constitué d'une plaque en acier (voir fig. 183) dont l'épaisseur est à déterminer.

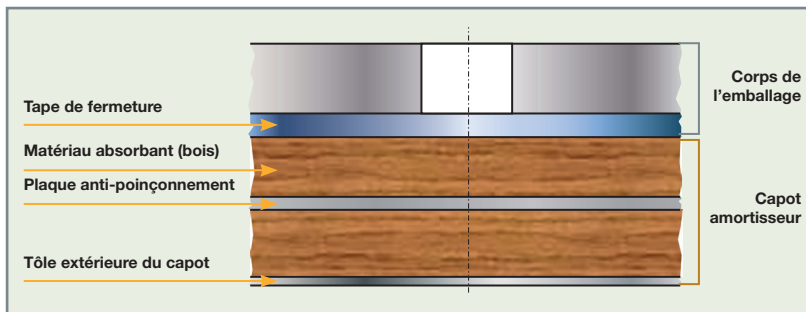


Fig. 183. Section partielle d'un emballage de transport.

L'étude des plaques impactées par des projectiles est un problème complexe qui suscite depuis très longtemps l'intérêt des ingénieurs et chercheurs. De nombreux travaux associés à de nombreuses campagnes d'essais, notamment au CEA, ont été menés sur le sujet, conduisant à l'établissement d'un certain nombre de formules empiriques pour déterminer l'énergie critique nécessaire à la perforation d'une plaque. On peut ainsi citer, parmi les plus simples, mais offrant une prédiction conservatrice satisfaisante, la formule établie par le BRL (*Ballistic Research Laboratory*) :  $E = 1,44 \times 10^9 \times h_0^{1,4} \times d_p^{1,5}$ , avec  $h_0$  épaisseur de la plaque et  $d_p$  diamètre du poinçon (unités SI), ou encore celle proposée par Lepareux *et al.* [17] :  $E = 1,42 \times 10^9 \times h_0^{1,5} \times d_p^{1,5}$ , très similaire, établie sur la base d'une série d'essais à basse vitesse sur des plaques encastrées en acier 304L impactées par des projectiles à bout plat, et avec un domaine de validité bien établi (le domaine de validité de la formule BRL n'est pas connu).

Cependant, un essai réalisé au CEA sur une configuration proche d'essais de chute sur poinçon (chute d'une hauteur de 1 mètre sur poinçon circulaire d'une plaque en acier 316L collée entre deux

blocs de balsa et libre aux bords) semble indiquer que ces conditions réduisent la capacité d'absorption d'énergie de la plaque, incitant à utiliser une formule encore plus conservatrice dans le cadre d'un pré-dimensionnement, par exemple comme celle établie par Lepareux *et al.* pour l'énergie absorbée localement :  $E_D = (0,35 \pm 0,03) \times 10^9 \times h_0^{1,5} \times d_p^{1,5}$  (unités SI). L'amélioration des formules existantes voire le développement de nouveaux modèles plus adéquats, afin d'affiner le pré-dimensionnement, nécessitent une analyse portant notamment sur l'influence des conditions aux limites de la plaque aux bords (libre, encadrée...) et sur ses faces (libres ou au contact d'un autre matériau, tel le bois), qui s'appuierait sur des investigations numériques validées ponctuellement par quelques essais.

### La simulation numérique pour la conception

Une fois le pré-dimensionnement réalisé, le concepteur va ensuite utiliser des outils de simulation avancés pour tester et valider le dimensionnement de son emballage de transport suivant les différentes configurations de chute. Comme indiqué précédemment, le code de calcul en dynamique rapide EUROPLEXUS dispose de toute la batterie de fonctionnalités nécessaires à ce type de simulations :

éléments finis (éléments volumiques, coques, poutres...), lois de comportement non linéaires (plasticité, endommagement, rupture...) pour de nombreux types de matériaux, algorithmes de gestion du contact, etc. De nombreux travaux ont permis de démontrer la capacité d'EUROPLEXUS à modéliser le comportement d'ensemble d'un emballage avec des capots constitués de bois lors de chutes dans des temps CPU très raisonnables. La figure 184 illustre la simulation d'une chute oblique d'un emballage : les quatre vues correspondant à quatre instants différents montrent bien la chronologie de l'événement, avec un premier impact sur le petit capot, suivi d'un basculement du corps et d'un second impact sur le grand capot. On visualise en particulier les grandes déformations des blocs de bois, synonymes de l'absorption de l'énergie du choc, et les divers contacts mis en jeu.

Les configurations de chute étudiées répondent aux exigences de la réglementation des transports de matières radioactives et doivent permettre de prendre en compte les situations les plus pénalisantes. Ainsi, pour une chute axiale, les calculs sont généralement réalisés avec les caractéristiques des matériaux amortisseurs prises à  $-40^\circ\text{C}$  pour maximiser le plateau de contrainte et donc le pic de

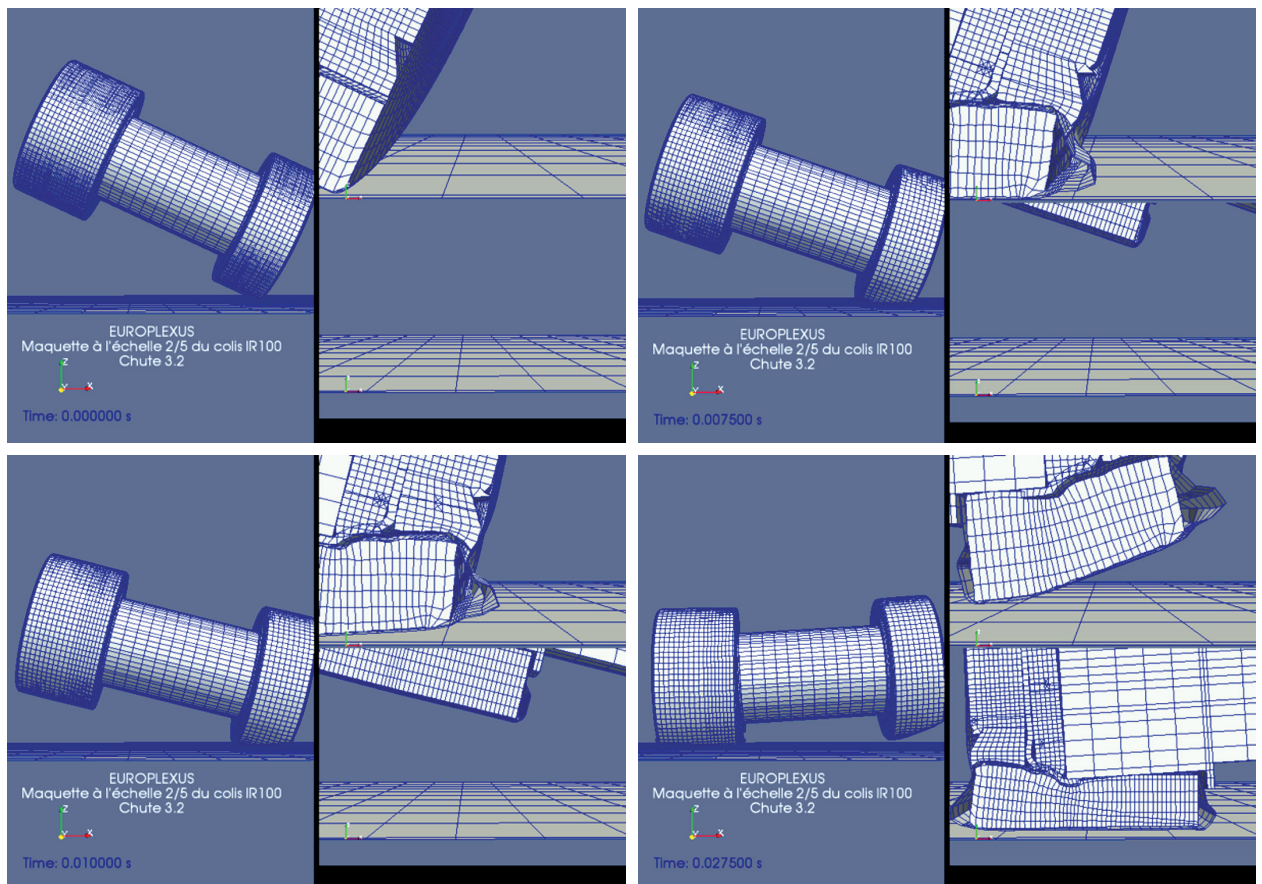


Fig. 184. Simulation avec EUROPLEXUS de la chute oblique d'un emballage de transport.



décélération à l'impact. À l'inverse, les calculs sont également faits en considérant une température de + 80 °C (valeur maximale de la plage de températures en conditions normales de transports) afin d'obtenir un matériau amortisseur moins robuste. Toujours dans le but de balayer les configurations les plus pénalisantes, le guide DSND n° 13/DR de l'ASND [18] impose d'appliquer dans les modèles un effort de pré-serrage maximal vis-à-vis des incertitudes de l'outil et des coefficients de frottement pour les vis de fixation des capots amortisseurs, le but étant d'essayer de casser les vis. Inversement, il faut également réaliser des simulations en appliquant un effort de pré-serrage minimal vis-à-vis des mêmes incertitudes, afin d'augmenter le risque de décollement du couvercle et donc de rupture du confinement. Enfin, la chute avec « fouettement » (premier impact avec angle, suivi d'un basculement rapide du colis générant un second impact) doit être étudiée suivant différents angles. Cet effet peut entraîner une augmentation significative de l'accélération et des dégradations de l'emballage par rapport à une chute purement horizontale. Les calculs peuvent se faire par exemple tous les 5°, puis sont affinés avec des simulations tous les 2,5°, avec un premier impact côté couvercle ou côté fond.

Parmi les derniers développements réalisés pour compléter les modèles disponibles dans EUROPLEXUS, il est intéres-

sant de considérer ici le problème de la modélisation de la perforation dans la configuration de la chute sur poinçon. Des investigations numériques mettant en œuvre une loi de comportement dédiée à la modélisation du bois couplée à une technique érosive des éléments finis pour simuler la perforation ont permis de montrer que le processus d'érosion des éléments, reposant sur un critère de rupture simple, donne des résultats satisfaisants lorsque la perforation du bois se produit dans le sens des fibres. Cependant, ce processus a été mis en défaut dans d'autres situations, notamment lorsque la perforation du bois ne se produit pas selon l'axe des fibres (cas de l'impact oblique). Dans ce cas, les éléments endommagés par cisaillement ne devraient pas être éliminés, car, même endommagés, ils restent en mesure, après consolidation, de résister à l'effort exercé par le poinçon. Pour pallier ce problème, un processus de décohésion des mailles évitant ainsi la disparition du bois endommagé a été introduit dans EUROPLEXUS [19] et validé sur différents cas tests (voir fig. 185). Ce nouveau modèle améliore les résultats de la chute sur poinçon oblique puisqu'il conduit bien à la consolidation des éléments de bois situés sous le poinçon. Cependant, malgré la présence de liaisons dédiées à la recherche d'éventuels contacts entre les différents morceaux de bois, l'algorithme de gestion du contact fondé sur la méthode des éléments maîtres et des nœuds esclaves reste encore à améliorer pour ce type de problème.

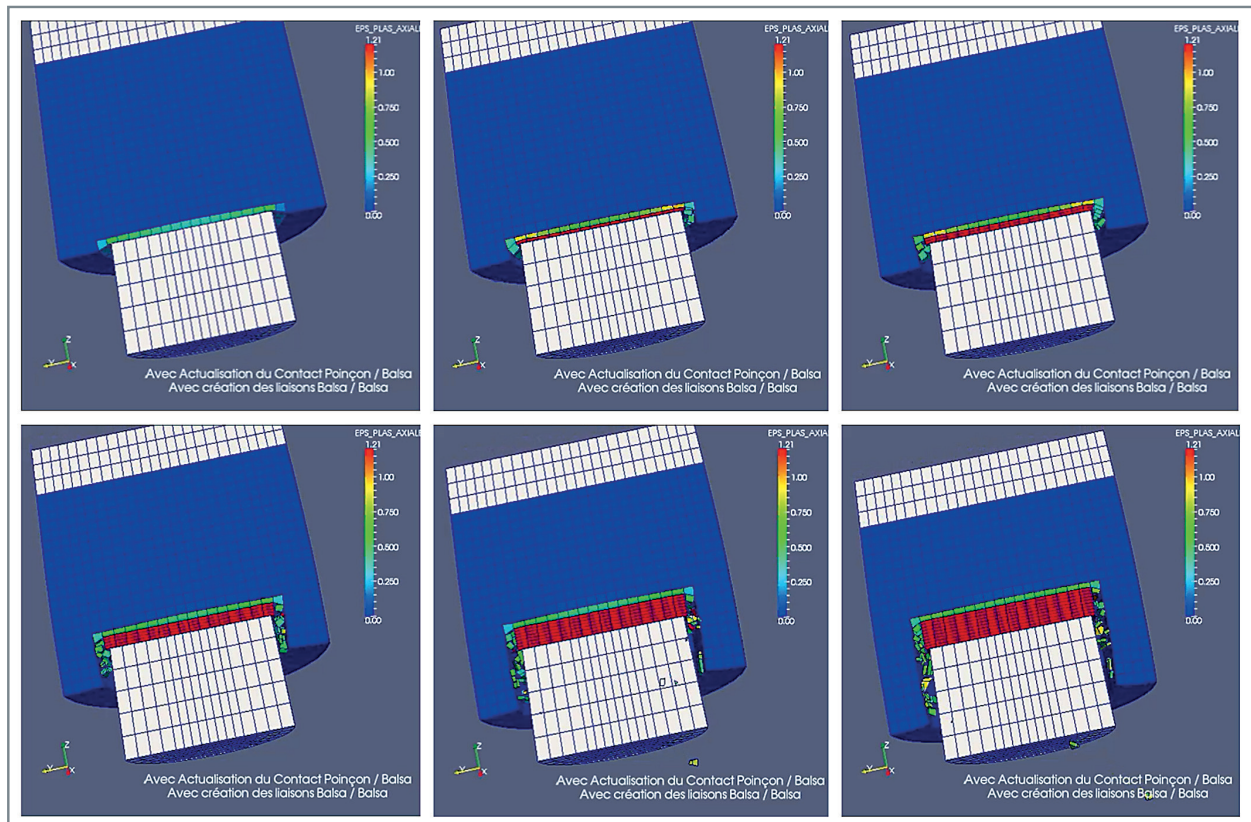


Fig. 185. Simulation du processus de décohésion lors d'un impact sur bois [19].



## Essais de chute et similitude

La démonstration de la tenue d'un colis soumis aux essais réglementaires de chutes passe systématiquement par la réalisation d'un certain nombre d'essais. Pour des raisons de coût et de mise en œuvre, les essais concernant les colis de grande taille sont généralement réalisés sur des maquettes à échelle réduite (voir fig. 186), ce qui implique la démonstration auprès des autorités de sûreté de la représentativité des essais, ainsi qu'un certain nombre de choix dans la conception de la maquette du colis, qui ne peut être parfaitement représentative. La maquette est nécessairement constituée des mêmes matériaux que l'emballage réel (hors contenu). L'objectif étant d'être représentatif du comportement mécanique de l'emballage, il faut respecter les niveaux de contrainte atteints au cours de l'essai. De plus, la hauteur de chute des essais réglementaires de l'AIEA doit être respectée pour la maquette. Par conséquent, on se place *de facto* dans une loi de similitude dite « en vitesse ». L'ensemble des règles de mise à l'échelle dans le cas de la similitude « en vitesse » peut être résumé dans le tableau 7,  $\lambda$  étant le rapport de similitude ( $\lambda < 1$ ), typiquement  $\lambda = 1/3$  ou  $1/2$ .

La loi de similitude en vitesse présente un certain nombre de limites, liées à l'impossibilité de respecter simultanément toutes les grandeurs d'intérêt. Par exemple, l'accélération varie comme  $1/\lambda$  d'après le tableau 7, mais l'accélération de la pesanteur reste constante et les contraintes de pesanteur varient alors comme  $\lambda$ . Cependant, dans le cas d'essais de chute, les contraintes dues à la pesanteur sont négligeables devant celles générées par l'impact (plusieurs centaines de g). On peut également mentionner l'effet de la vitesse de la déformation : affectée d'un rapport de similitude de  $1/\lambda$ , celle-ci sera d'autant plus importante que l'échelle de la maquette sera faible (d'où la nécessité de s'en tenir à des

échelles raisonnables). Néanmoins, les effets de la vitesse de déformation restent généralement limités. De même, indépendamment de la vitesse de déformation, le fait d'avoir des pièces de plus petite taille peut influencer sur leurs caractéristiques mécaniques, en particulier sur les propriétés moyennes et minimales garanties : cet effet doit être évalué en comparant les caractéristiques des matériaux utilisés pour la maquette avec les valeurs minimales garanties retenues pour le dimensionnement de l'emballage à l'échelle 1. Enfin, certains éléments de la maquette ne sont pas nécessairement disponibles à échelle réduite (vis, tôles, joints). Pour ces raisons, le dimensionnement de la maquette devra donc être adapté pour rester le plus représentatif possible et chacun des choix devra être justifié.

Par ailleurs, les essais de chute réalisés dans le cadre de la réglementation des emballages de transports nécessitent une représentativité de la maquette pour une plage de températures des matériaux qui couvre en général l'intervalle  $[-40\text{ °C}, +80\text{ °C}]$ . La valeur de  $+80\text{ °C}$  représente la température maximale atteinte sur l'emballage en conditions normales de transport. Sur cette plage de températures, les caractéristiques mécaniques des matériaux peuvent varier et la maquette doit donc prendre en compte ces variations. Deux possibilités se présentent :

- Réaliser les essais en température. Cette solution est relativement facile à mettre en œuvre pour les températures positives, mais plus compliquée dans le cas de températures négatives ;
- réaliser une maquette avec des matériaux adaptés. Il est possible de réaliser une maquette avec des matériaux amortisseurs représentatifs d'une température différente (matériau plus dur pour une température équivalente plus basse).

Le choix des matériaux utilisés pour la maquette doit justifier que celle-ci présente des caractéristiques mécaniques plus faibles ou égales à celles de l'emballage échelle 1 du dossier de sûreté. Plus généralement, il faut justifier que la maquette possède, au plus, la même capacité d'absorption d'énergie que l'emballage échelle 1 sur la plage de températures et au rapport d'échelle près. Il est donc nécessaire de réaliser une sélection des approvisionnements des matériaux de la maquette, en fonction des caractéristiques mécaniques et des épaisseurs disponibles. La même démarche sera réalisée sur le choix de la classe, des dimensions et même du nombre de vis servant aux différents systèmes de fixation (couvercle, tôle, capot...).

Tableau 7.

Règles de mise à l'échelle dans le cas de la similitude en vitesse.	
Dimension	Rapport de similitude
Déplacement	$\lambda$
Vitesse	1
Accélération	$1/\lambda$
Masse volumique	1
Masse	$\lambda^3$
Poids	$\lambda^3$
Force	$\lambda^2$
Temps	$\lambda$
Contrainte	1
Déformation	1
Contrainte de pesanteur	$\lambda$
Vitesse de déformation	$1/\lambda$

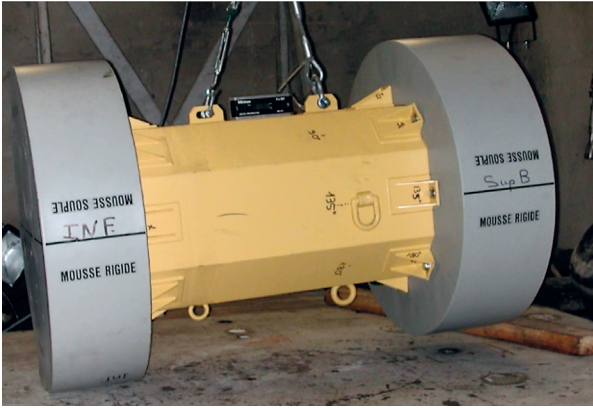


Fig. 186. Exemple de maquette d'emballage à l'échelle 2/5.

### Bilan

Pour les emballages de transport, c'est le comportement de l'élément impactant qui est l'objet d'étude. Constitués d'un corps dans lequel viennent se loger un contenu et des capots amortisseurs chargés d'absorber l'énergie du choc lors d'éventuelles chutes, les colis doivent être qualifiés vis-à-vis des prescriptions d'épreuves réglementaires. Leur conception passe par une étape de pré-dimensionnement, suivie d'une étape de simulations par éléments finis avant de valider la tenue par des essais de chute sur maquettes éventuellement à échelle réduite. Chaque étape a ses propres spécificités et défis, parmi lesquels le choix de la loi de comportement représentative du matériau bois, la représentativité des approches simplifiées pour le pré-dimensionnement, les techniques de modélisation de la perforation et de la rupture des éléments par simulation et la similitude (géométrie, chargement, matériaux) des essais représentatifs. Les développements réalisés aujourd'hui permettent de disposer d'une méthodologie complète pour atteindre les exigences réglementaires imposées.

## Comportement des structures de génie civil sous impact

### Contexte

L'évaluation du comportement mécanique des structures de génie civil sous choc est essentielle, car ce type de sollicitations peut conduire à des désordres significatifs tant sur la résistance que sur la fonctionnalité résiduelle de l'ouvrage (perte de résistance, apparition de fissures, perte d'étanchéité...). Les sollicitations peuvent avoir deux origines : accidentelle (chutes de charges par exemple) ou malveillante (crashes d'avions, explosions...). Dans le cas des enceintes de confinement de centrales nucléaires, la chute d'avion est ainsi prise en compte dans le dimensionnement selon la règle fondamentale de sûreté (RFS) 1.2.a [20] qui définit les principes généraux relatifs à la protection contre les agres-

sions externes et en particulier les risques liés aux chutes d'avions, même si les événements de 2001 ont conduit à étendre les cas à étudier. Ces règles impliquent notamment de considérer les conséquences de la chute d'un avion selon des configurations jugées représentatives des différentes catégories d'avions de l'aviation générale. Le chargement à prendre en compte est alors représenté par une force en fonction du temps (voir fig. 187).

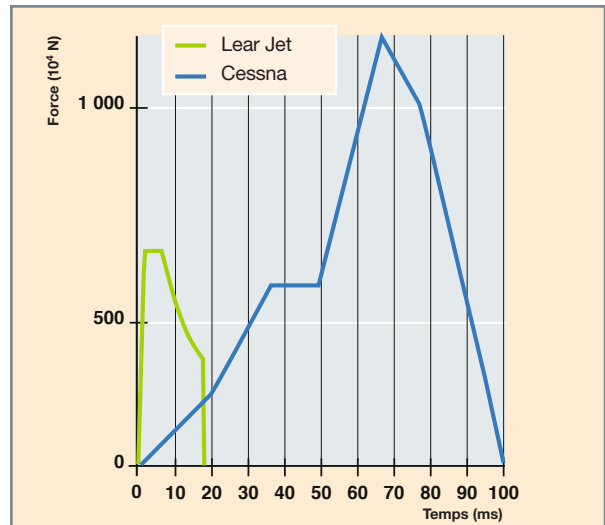


Fig. 187. Force d'impact des avions Lear Jet et Cessna [21].

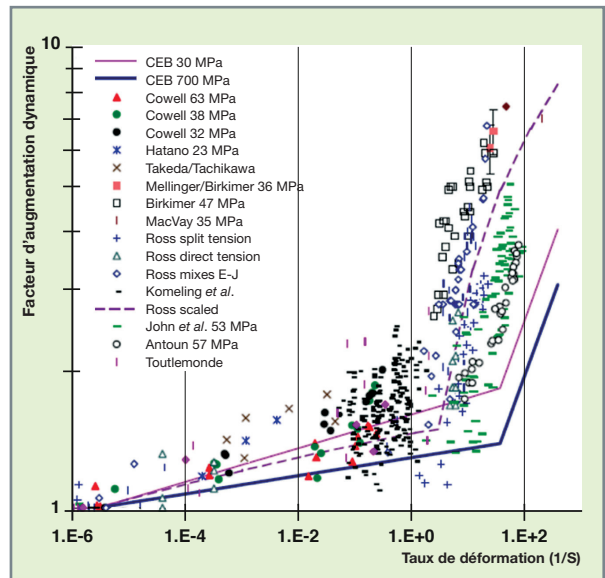


Fig. 188. Effet de la vitesse de sollicitation sur la résistance en traction du béton. Le facteur d'augmentation dynamique (*dynamic increase factor*) est défini comme le rapport entre la résistance en traction dynamique et la résistance en traction quasi statique (égal à 1 pour les faibles vitesses de sollicitation) [22].

Prédire le comportement d'une structure de génie civil sous impact est un problème ardu. Cette difficulté vient du problème lui-même (mécanique dynamique et interaction entre deux structures – l'impacteur et la cible) couplé à la com-

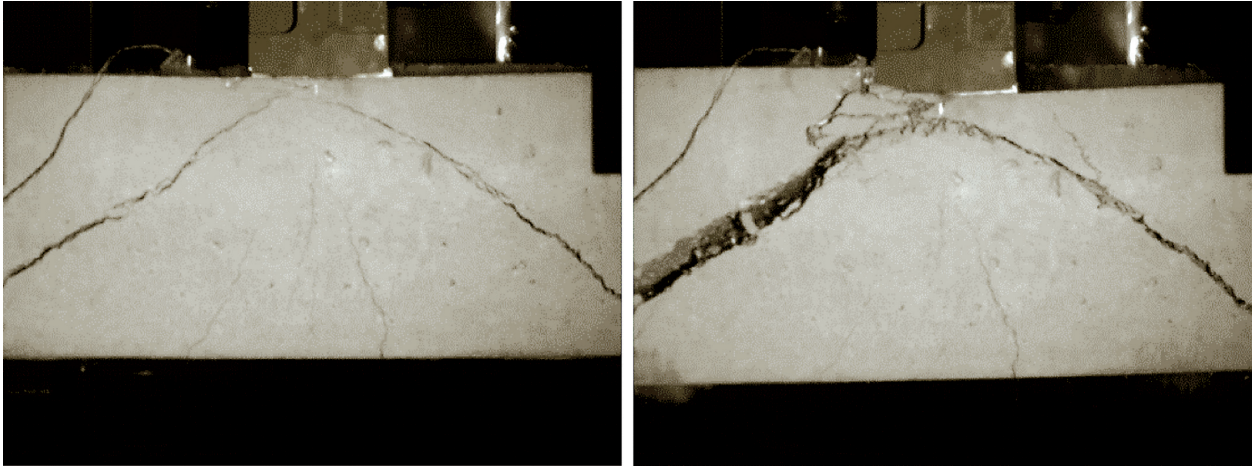


Fig. 189. Exemple de fissuration d'une poutre en béton armé sans renfort transversal sous l'effet de la chute d'un projectile.

plexité du comportement du béton sous choc. En plus de ses caractéristiques intrinsèquement complexes (comportement dissymétrique en traction-compression, transition fragile-ductile avec le confinement, comportement unilatéral...), le matériau présente, en dynamique, une résistance qui dépend de la vitesse de sollicitation (phénomène particulièrement marqué en traction, moins en compression ; voir fig. 188).

La prédiction du comportement mécanique d'une structure en béton armé sous choc passe donc classiquement par le triptyque modélisation-simulation-expérimentation à des échelles différentes. Expérimentalement, la caractérisation peut se faire à l'échelle du matériau (évaluation de la résistance en traction en fonction de la vitesse de sollicitation ; voir fig. 188), de l'éprouvette de laboratoire (faciès de fissuration ; voir fig. 189) ou même à échelle de la structure réelle (détermination d'un chargement de référence ou cas test de validation ; voir fig. 190).

Numériquement, le degré de raffinement du modèle dépend de la nature de l'information recherchée, comme cela sera discuté dans la suite.



Fig. 190. Impact à 215 m/s d'un F-4 (19 t) contre un bloc de béton de 469 t posé sur coussin d'air [23].

## Évaluation de la réponse sous impact par la modélisation

### Classification des chocs

Afin d'adapter les modèles de béton sous sollicitation rapide, une distinction entre chocs « mous » et chocs « durs » a rapidement été nécessaire. La première distinction de Eibl [24] propose de décrire le choc mou comme étant un choc où le déplacement de la cible est faible par rapport à celui du projectile. Il s'agit d'une description intuitive où le projectile s'écrase contre une cible rigide, comme constaté sur les essais d'impact d'avion (figure 190) [23]. Mathématiquement, le choc mou permet de découpler le projectile de sa cible [24] et les premières modélisations de la force d'impact d'un avion sur une structure s'appuient sur cette constatation [25].

Plus tard, pour mieux distinguer la notion de choc dur, Kœchlin [26] a proposé une représentation simple permettant de classer les chocs. Celle-ci s'appuie directement sur une description locale à l'aide des contraintes de rupture de la cible et du projectile. À l'instant du choc, la cible est soumise à une contrainte  $\sigma$  à deux composantes, l'une venant de la vitesse du projectile et l'autre du matériau du projectile :

$$\sigma = \sigma_p + \rho_p V_0^2,$$

où  $\sigma_p$  est la contrainte de rupture du projectile,  $\rho_p$  la masse volumique du projectile et  $V_0$  sa vitesse.

Kœchlin définit la séparation choc dur/choc mou par la droite  $\sigma = \sigma_c$  avec  $\sigma_c$  la contrainte de rupture de la cible (voir fig. 191). On observe ainsi qu'à très haute vitesse d'impact, tout choc est dur.

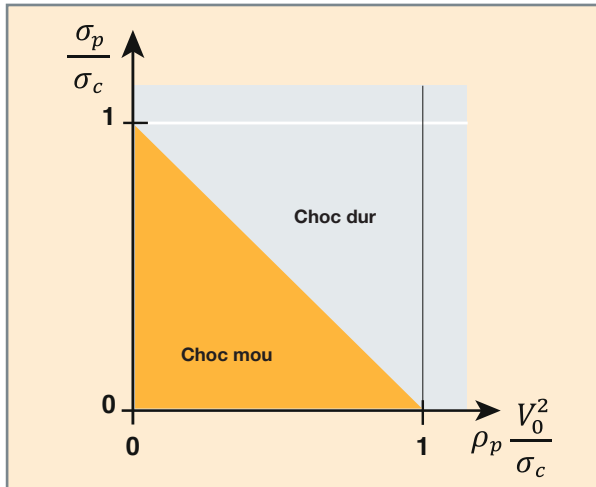


Fig. 191. Classification des chocs durs et mous, adaptée de [26].

### Description schématique du comportement sous impact

Lors d'un choc, la structure en béton peut être soumise à différentes sollicitations dont les conséquences (fissuration, écaillage, perforation) sont résumées à partir de constatations expérimentales dans la figure 192. La structure peut ainsi être soumise :

- À une pression sous le projectile qui peut conduire à l'écrasement du béton ;
- à des tensions en périphérie de l'impacteur qui peuvent provoquer l'émission de morceaux de béton et la formation d'un cratère ;

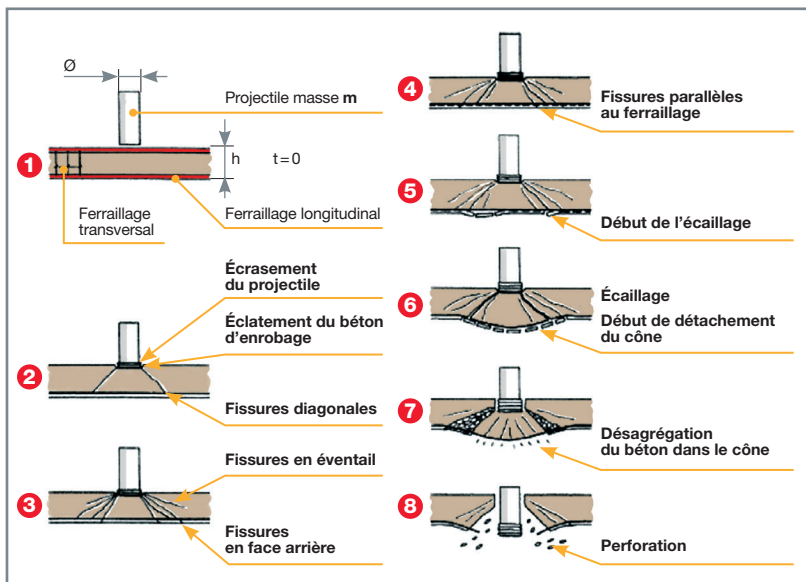


Fig. 192. Scénario de perforation sous choc mou obtenu expérimentalement d'après les essais Meppen [27].

- à des tensions en face arrière sous l'impacteur (par réflexion de l'onde de compression) qui peuvent provoquer un écaillage ;
- à des contraintes de cisaillement qui peuvent conduire à la création d'un bouchon de béton, à la suite d'une fissuration oblique ; et
- à un moment de flexion qui crée des fissures orthogonales à la paroi.

Des outils prédictifs de complexité variable sont alors développés en fonction de la quantité d'intérêt locale ou globale recherchée. Ces méthodes visent notamment à comprendre la réponse du système, pour le pré-dimensionnement ou pour dégager rapidement des ordres de grandeur dans l'analyse du problème. Ils permettent aussi de limiter le recours à des calculs complexes, par nature plus coûteux.

### Approches empiriques

Les approches empiriques permettent de caractériser des grandeurs d'intérêt locales à partir d'une relation simple. Elles sont fondées sur l'analyse d'un ensemble de résultats expérimentaux de référence pour calculer notamment la profondeur de pénétration, l'épaisseur limite d'écaillage ou l'épaisseur de juste perforation. À titre d'illustration, la formule CEA-EDF relie l'épaisseur de juste perforation  $e$  à un ensemble de caractéristiques géométriques, matériaux et de l'impacteur [28] :

$$\frac{e}{d} = 0.82 \frac{M^{0.5} V_0^{0.75}}{\rho_c^{0.125} f_c^{0.375} d^{1.5}}$$

avec  $d$  le diamètre du projectile,  $M$  sa masse,  $V_0$  la vitesse d'impact du projectile,  $\rho_c$  la masse volumique du béton et  $f_c$  sa résistance en compression (unités SI). Si ces formules empiriques sont d'utilisation directe, et permettent ainsi de caractériser rapidement un comportement donné, elles doivent être utilisées avec précaution. En effet, la représentativité de ces lois, nombreuses (formule de Petry, loi de NRDC... [29]), n'est garantie que sur le domaine d'application sur lequel elles ont été construites (vitesse d'impact, caractéristiques du béton et de l'impacteur notamment). Elles n'ont donc pas vocation à être utilisées en dehors de ce domaine. Par ailleurs, elles ne fournissent aucune information sur le comportement de la structure.



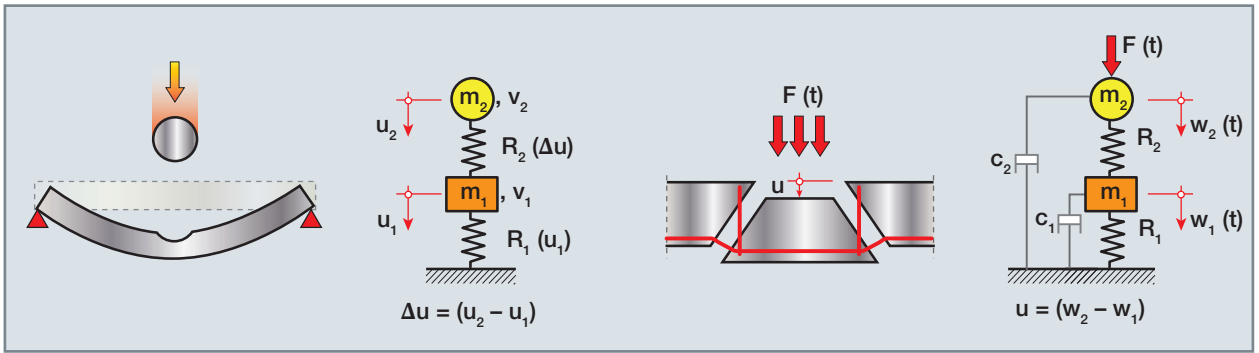


Fig. 193. Système masse-ressort pour la représentation d'un *hard impact* (à gauche) et modèle simplifié pour le poinçonnement d'une dalle (à droite) [30].

### Approches phénoménologiques

Pour aller plus loin, des approches phénoménologiques peuvent être développées. Elles consistent à remplacer le problème physique mécanique par un système masse-ressort représentatif. Dans le modèle CEB [30] par exemple, la réponse sous impacts « durs » (exemple des impacts de missile) introduit deux degrés de liberté. Dans cette configuration, le ressort  $R_2$  représente le comportement local de la structure avec prise en compte des effets de vitesse. Le comportement global est représenté par le ressort  $R_1$  [31] (voir fig. 193, gauche). Le poinçonnement d'une dalle peut également être représenté par ce type d'approches (voir fig. 193, droite). Le ressort  $R_2$  représente les déformations dues à la création d'un cône de poinçonnement, tandis que  $R_1$  caractérise les déformations de flexion du reste de la dalle. La résolution analytique de ces systèmes différentiels permet ensuite de caractériser l'évolution temporelle des degrés de liberté (évolution du déplacement en fonction du temps par exemple), fournissant ainsi une information plus riche que les approches empiriques. Néanmoins, aucune information n'est obtenue sur le comportement local (dégradation mécanique éventuelle) et la calibration des paramètres du modèle peut nécessiter le recours à des calculs éléments finis plus complexes.

### Approches fines

Lorsqu'une information fine sur le comportement mécanique est nécessaire ou lorsque le domaine d'applicabilité des approches simplifiées est dépassé, le recours à des calculs plus fidèles devient nécessaire. Ces calculs, par nature complexes et plus coûteux numériquement, fournissent en contrepartie une richesse d'informations remarquable (évolution des déplacements, de la dégradation mécanique, distribution des contraintes et des déformations...). Ils peuvent générale-

ment être réalisés selon deux formalismes : les éléments discrets et/ou les éléments finis. La méthode des éléments discrets est une méthode sans maillage dans laquelle la structure est représentée par l'intermédiaire de poutres (*lattice model*) ou de particules en interaction. L'enjeu scientifique sur ce type de modélisation réside notamment dans la génération des géométries et la prise en compte des interactions (loi de comportement des poutres, contact entre particules [32]). Un exemple d'application à une poutre en béton armé testée sur la plateforme RESEDA du CEA et modélisée avec le logiciel EUROPLEXUS est présenté dans la figure 194. La simulation permet ici d'accéder à la fissuration de la structure caractéristique.

Pour des raisons de coût de calcul ou de facilité d'utilisation, la méthode des éléments finis peut être préférée pour modéliser le comportement mécanique des structures en béton armé sous impact. Dans ce cas, la structure est classiquement discrétisée en un maillage dont les déplacements nodaux sont les inconnues du problème. L'un des enjeux majeurs est alors de proposer une loi de comportement adaptée à la réponse du béton sous sollicitation dynamique. Plusieurs solutions sont disponibles, parmi lesquelles celles

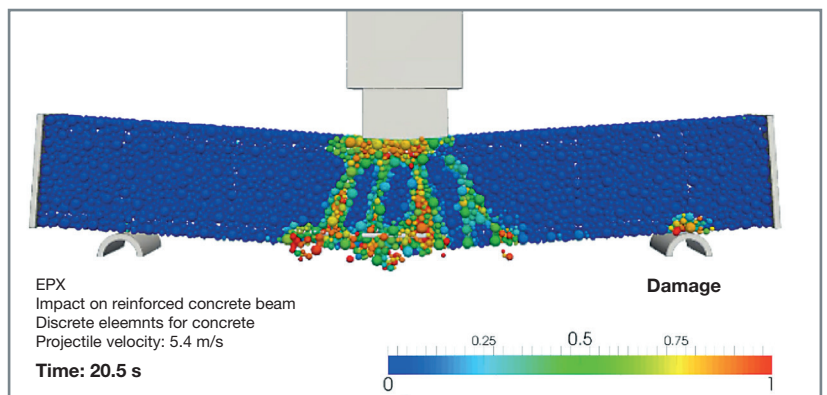


Fig. 194. Simulation d'un impact sur une poutre en béton armé utilisant la méthode des éléments discrets pour le béton. Calcul EUROPLEXUS [1] [33].

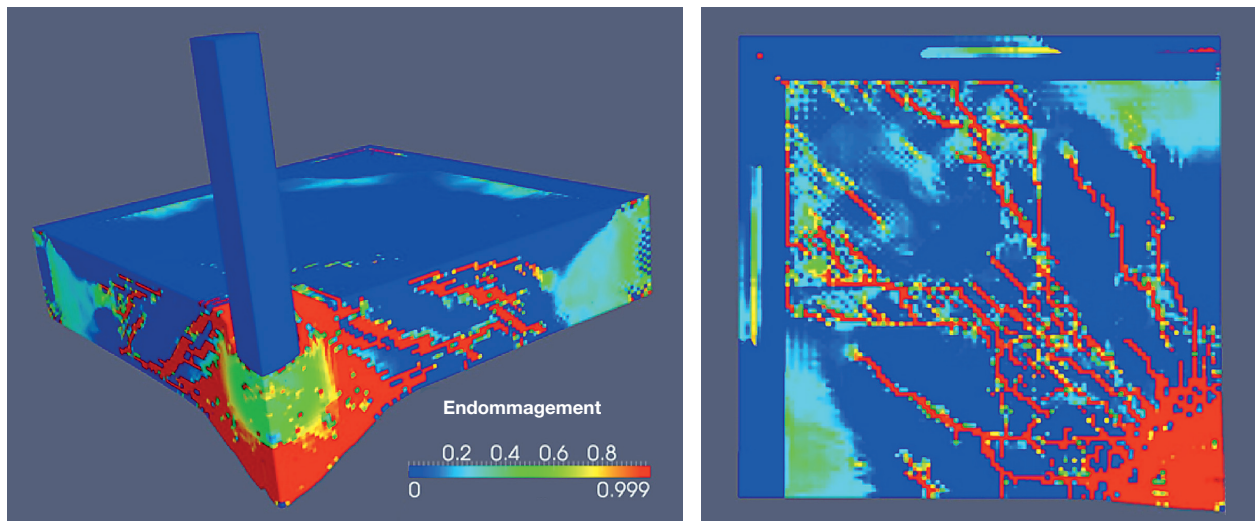


Fig. 195. Illustration de l'endommagement d'une dalle sous impact (calcul DPDC avec EUROPLEXUS).

des codes de calcul références du domaine : modèle élasto-plastique K&C (Karagozian et Case) et Winfrith » de [34], modèle élasto-plastique RHT (Riedel, Hiermaier et Thoma) dans [35], modèle élasto-plastique CONC-V3 de [36] ou modèle élasto-plastique endommageable DPDC dans EUROPLEXUS [1]. Pour ce dernier, le comportement du béton est représenté par un modèle de plasticité avec endommagement lorsque les contraintes principales sont de compression et par un modèle d'endommagement orthotrope lorsque les contraintes principales sont de tension. Le modèle d'endommagement orthotrope permet la refermeture des fissures et le contact entre leurs faces supposées rugueuses. La plasticité est complétée par de la viscoplasticité permettant de prendre en considération l'effet de la vitesse de déformation sur les propriétés mécaniques du matériau. Sous ces conditions, il devient possible de reproduire finement le comportement mécanique de structures sous impact (voir fig. 195).

Néanmoins, l'utilisation des éléments finis, et plus particulièrement des modèles d'endommagement, nécessite une attention particulière autour des problématiques scientifiques suivantes :

- La localisation des grandeurs d'intérêt : une fois atteinte la partie adoucissante de la loi de comportement (après le pic de contrainte en figure 196 et associée au développement de la fissuration), les déformations tendent à se localiser dans des bandes d'éléments. Par conséquent, leur distribution devient dépendante du maillage, conduisant à simuler, dans le cas d'un maillage infiniment fin, une rupture sans dissipation d'énergie physiquement irréaliste. Ce phénomène, bien connu, peut être traité en introduisant un limiteur de localisation dans la formulation du modèle. Plusieurs solutions sont disponibles : régularisation énergé-

tique [37], méthodes non locales intégrales [38], second gradient [39] ou régularisation dynamique dans le cas de chargements rapides, en introduisant un effet retard sur l'endommagement [40].

- L'érosion des éléments endommagés consiste à supprimer les éléments du modèle lorsqu'ils ont atteint une dégradation mécanique élevée (voir fig. 196). En effet, les éléments trop déformés (associés à une perte de rigidité marquée à la suite de leur endommagement par exemple) ralentissent significativement le calcul. Cette opération nécessite de définir un critère d'érosion adapté qui peut s'appuyer sur différentes quantités [41] : déformation équivalente maximale, contrainte de cisaillement maximale, endommagement proche de 1, énergie de fracturation

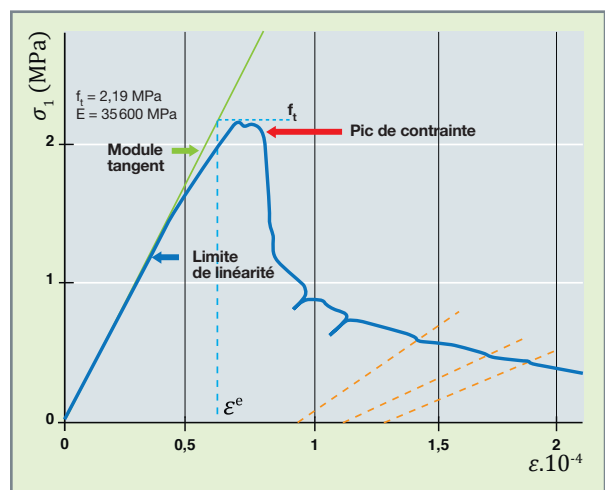


Fig. 196. Courbe contrainte-déformation du béton lors d'un essai de traction (adapté de [42]).

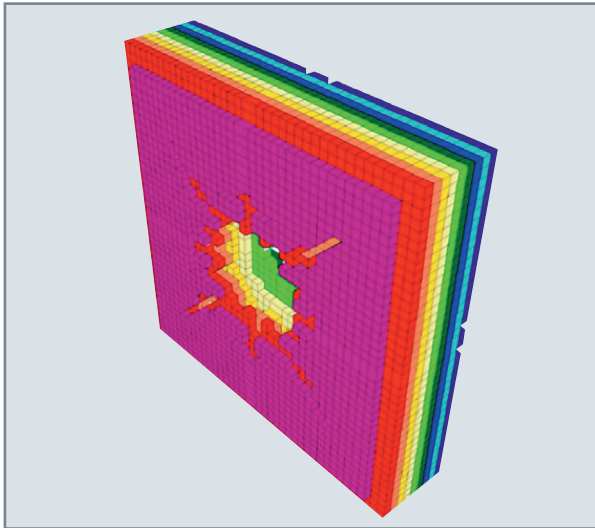


Fig. 197. Illustration d'un calcul avec érosion sur une dalle soumise à une explosion en son centre.

consommée... Les questions de la représentativité du critère et de ses conséquences sur les résultats du calcul (dépendance au maillage notamment) doivent alors être regardées avec attention.

## Bilan

L'étude du comportement mécanique des structures en béton armé sous sollicitation dynamique est essentielle, mais repose sur l'estimation de phénomènes complexes. Ainsi, le choix de la méthode doit se faire en fonction des grandeurs d'intérêt et de la richesse de l'information recherchées (non-perforation, évolution des déplacements, force maximale ou description fine de la dégradation mécanique par exemple). Dans les approches les plus raffinées, la modélisation requiert le développement de modèles prenant notamment en compte les spécificités du béton (adoucissement, effet de la vitesse de déformation sur les propriétés matériaux...) et des sollicitations appliquées (par exemple, refermeture de fissures, orthotropie...). La simulation à l'échelle des structures suppose également un traitement adapté de la localisation et la gestion des éléments fortement déformés (érosion). L'ensemble reste coûteux et nécessite des ressources informatiques importantes, impliquant l'emploi de la parallélisation. Pour des besoins intermédiaires, des alternatives aux calculs haute-fidélité existent, permettant d'accéder à l'information requise pour un coût plus raisonnable. Parmi elles, les formules empiriques s'appuient sur l'analyse de bases expérimentales plus ou moins riches, dans un domaine de validité qui doit être spécifié. Les approches phénoménologiques simplifiées (système masse-ressort) reposent sur la résolution d'équations différentielles et peuvent présenter un bon compromis, même si leur calibration peut s'avérer complexe. Dans ce cadre, la DES participe au développement de l'ensemble de

ces stratégies, complétées par le recours à l'expérimentation, qui reste incontournable, à la fois pour nourrir les lois de comportement et pour valider les développements numériques à l'échelle structurelle.

**Claire GAUTHIER,**

*Direction des Programmes Énergies*

**Fabienne BLIARD, Xavier DELAUNE, Ludovic JASON,**

*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*

**et Thierry DELON,**

*Direction des projets de démantèlement,*

*de service nucléaire et de gestion des déchets*

## ► Références

- [1] EUROPLEXUS, *A Computer Program for the Finite Element Simulation of Fluid-Structure Systems under Transient DYNAMIC Loading – User's Manual*, CEA & EC/JRC, [www-epx.cea.fr](http://www-epx.cea.fr), 2021.
- [2] A. MAUREL, M. FONTAINE, S. THIBAUD, G. MICHEL ET J.-C. GELIN, « Modélisation thermo-élasto-viscoplastique de comportement de l'acier inoxydable 304L – Applications à l'usinage grande vitesse », 18<sup>e</sup> Congrès français de mécanique, Grenoble, 2007.
- [3] *Rapport des essais de compression en température de différentes essences de bois utilisées dans les capots des emballages de transport du CEA*, rapport CEA – DSN/STMR/LEPE/EMBAL/NOT0007, indice 02 du 23 juillet 2018.
- [4] E. RACLE, *Comportement d'un composite à matrice céramique en fatigue et mise en place d'indicateurs d'endommagement par émission acoustique*, thèse, INSA Lyon, 2014.
- [5] T. NICHOLAS, "Tensile testing of materials at high rates of strain", *Experimental Mechanics*, 21(5), 177-185, May 1981.
- [6] B. HOPKINSON, "A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets", *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 213, 437-456, 1914.
- [7] P. BOUDA, *Méthode des champs virtuels pour la caractérisation du comportement dynamique de matériaux métalliques sous chargement purement inertiel*, thèse, université polytechnique Hauts-de-France, 2019.
- [8] R. PELÉE DE SAINT MAURICE, *Extension de l'approche X-FEM en dynamique rapide pour la propagation tridimensionnelle de fissure dans des matériaux ductiles*, INSA Lyon, 2014.
- [9] T. LI, *Gradient Damage Modeling of Dynamic Brittle Fracture, Variational Principles and Numerical Simulations*, thèse de l'École polytechnique, 2016.
- [10] *Règlement de transport des matières radioactives*, édition de 2018, prescriptions de sûreté particulières n° SSR-6 (Rev. 1), normes de sûreté de l'AIEA.
- [11] C. ADALIAN, *Comportement du bois en compression dynamique multiaxiale, application à la simulation de crash de conteneurs*, thèse, université de Bordeaux I, 1998.
- [12] D. GUITARD, *Mécanique du matériau bois et composites*, Cépadués éditions, 1987.

- [13] P. FRANÇOIS, *Plasticité du bois en compression multiaxiale, application à l'absorption d'énergie mécanique*, thèse, université de Bordeaux I, 1992.
- [14] X. DELAUNE, L. BORSOI et T. LAPORTE, *Guide DM2S sur l'intégrité mécanique des colis de transport de matières radioactives sous chutes* (3<sup>e</sup> version), rapport CEA, DM2S/SEMT/DYN/RT/12-018/A.
- [15] T. DELON, « Pré-dimensionnement mécanique des capots amortisseurs de l'emballage TN 17 T », note transnucléaire, référence 5552-B-13, révision 1 du 04 février 1998.
- [16] *Advisory material for the IAEA regulations for the safe transport of radioactive material*, specific safety guide n° SSA-26, IAEA, 2012 edition.
- [17] M. LEPAREUX, P. JAMET, P. MATHERON, J.-L. LIEUTENANT, J. COUILLEAUX and D. DUBOELLE, "Experimental and Numerical Studies of Impacts on Stainless Steel Plates Subjected to Rigid Missiles at Low Velocity", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 115, pp. 105-112, 1989.
- [18] *Guide DSND n° 13 à destination des concepteurs des modèles de colis pour la conception des assemblages vissés*, indice 0 du 9 octobre 2020.
- [19] F. BLIARD, *Modélisation de la perforation du bois avec EUROPLEXUS : Mise en œuvre d'un processus de décohésion des éléments reposant sur un critère de rupture*, rapport CEA, DM2S/SEMT/DYN/NT/14-019/A.
- [20] Autorité de sûreté nucléaire, ASN, « Règle fondamentale de sûreté n° I.2.a », 1980.
- [21] J.-L. COSTAZ, « Confinement, enceintes », *Techniques de l'ingénieur*, 1997.
- [22] L.J. MALVAR, C.A. ROSS, "Review of strain effects for concrete in tension", *ACI Materials Journal*, 95, 6, 1998.
- [23] T. SUGANO, H. TSUBOTA, Y. KASAI, N. KOSHIKA, S. ORUI, W.A. VON RIESEMANN, D.C. BICKEL and M.B. PARKS, "Full-scale aircraft impact test for evaluation of impact force", *Nuclear Engineering and Design*, 140, pp. 373-385, 1993.
- [24] J. EIBL, "Soft and hard impact", *Proc. FIP Congress, The Concrete Society, Concrete for hazard protection*, Edinburgh, Scotland, September 1987, pp. 175-186, 1987.
- [25] J.D. RIERA, "Stress analysis of structures subjected to aircraft impact forces", *Nuclear Engineering and Design*, 8, 415-426, 1968.
- [26] P. KECHELIN, *Modèle de comportement membrane-flexion et critère de perforation pour l'analyse de structures minces en béton armé sous choc mou*, thèse de doctorat de l'université Pierre-et-Marie-Curie, Paris VI, 2007.
- [27] W. JONAS, E. RÜDIGER, M. GRIES, H. RIECH and H. RÜTZEL, "Kinetische grenztragfähigkeit von stahlbetonplatten", rapport technique RS 162, Hochtief AG, 1982.
- [28] C. BERRIAUD, A. SOKOLOVSKY, R. GUERAUD, J. DULAC and R. LABROT, "Local behaviour of reinforced concrete walls under missile impact", *Nuclear Engineering and Design*, 45, pp. 457-469, 1978.
- [29] W. SHIU, *Impact de missiles rigides sur structures en béton armé : analyse par la méthode des éléments discrets*, université Joseph-Fourier, Grenoble I, 2008.
- [30] CEB (Comité euro-international du B2ton), "Concrete structure under impact and impulsive loading", *Bulletin d'Information*, n° 187, 1988.
- [31] F. DELHOMME, *Étude du comportement sous impact d'une structure pare-blocs en béton armé*, université de Savoie, 2005.
- [32] A. RIMA, *Étude du comportement des ancrages chevillés dans les ouvrages de génie civil des installations nucléaires françaises*, thèse de l'École normale supérieure de Paris-Saclay, 2021.
- [33] A. MASUREL, *Modélisation mixte éléments discrets/éléments finis de la dégradation de structures en béton armé sous impact sévère*, thèse de l'université Grenoble-Alpes, 2015.
- [34] LS-DYNA, <https://www.lstc.com/products/ls-dyna>, 2021.
- [35] AUTODYN, <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-autodyn>, 2021.
- [36] RADIOSS, <https://www.altair.com/radioss/>, 2021.
- [37] A. HILLERBERG, M. MODÉER and P.E. PETERSON, "Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements", *Cement and Concrete Research*, 6, pp. 773-792, 1976.
- [38] G. PIGNAUDIER-CABOT and Z.P. BAZANT, "Nonlocal Damage Theory", *Journal of Engineering Mechanics*, 113, 1512-1533, 1987.
- [39] R. PEERLINGS, R. DE BORST, W. BREKELMANS and J. DE VREE, "Gradient-enhanced damage for quasi-brittle materials", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 39, 3391-3403, 1996.
- [40] R. DESMORAT, M. CHAMBERT, F. GATJUNG and D. GUILBAUD, "Delay-active damage versus non-local enhancement for anisotropic damage dynamics computations with alternated loading", *Engineering Fracture Mechanics*, 77, pp. 2294-2315, 2010.
- [41] B.M. LUCCIONI, G.F. ARÁOZ and N.A. LABANDA, "Defining Erosion Limit for Concrete", *International Journal of Protective Structures*, 4, 3, pp. 315-340, 2013.
- [42] M. TERRIEN, « Émission acoustique et comportement mécanique post-critique d'un béton sollicité en traction », *Bulletin de liaison du LCPC*, 1980.



## Onde de choc et effets sur les structures

**P**armi les accidents redoutés dans les réacteurs nucléaires figurent les événements déclenchant une onde de surpression ou de dépression brutale dont la propagation peut générer des dégâts mécaniques majeurs sur les structures, notamment sur les barrières de confinement. Les scénarios de type propagation d'onde de choc sont pris en compte dans le dimensionnement mécanique des structures en fonction de leur probabilité d'occurrence (qui reste cependant faible) et des risques associés.

Pour les REP (réacteurs à eau pressurisée), on cite forcément l'accident de perte de réfrigérant primaire (APRP, voir encart ci-après).

Un deuxième exemple d'onde de choc intervient en cas d'« accident grave » consécutif à la défaillance des systèmes de protection et de sauvegarde à la suite d'un accident de fonctionnement de type APRP ou RIA par exemple. Le cœur peut entrer en fusion [2]. Il peut alors y avoir une interaction violente entre le combustible métallique fondu et l'eau de refroidissement du circuit primaire, avec une vaporisation quasi instantanée et massive de l'eau. C'est ce qu'on appelle une explosion de vapeur, dont l'onde de choc générera de fortes contraintes mécaniques sur les structures. Le but est alors de s'assurer de l'intégrité de l'enceinte de confinement pour contenir la radioactivité émise.

### L'accident de perte de réfrigérant primaire

Un APRP se produit lors de l'apparition d'une brèche sur le circuit primaire pressurisé à 155 bars. Outre la perte d'eau pouvant conduire à l'échauffement des crayons de combustible, cette rupture déclenche une onde de dépressurisation brutale (~1 ms) qui se propage dans le circuit primaire et soumet les tuyauteries, les structures internes de la cuve et les assemblages combustibles à des efforts hydrauliques importants (dépression). Le référentiel APRP français utilisé pour la conception et le dimensionnement des REP (fondé sur le *Code of Federal Regulation* 10 CFR 50.46 américain, augmenté de diverses évolutions) repose sur la démonstration du refroidissement pérenne du combustible [1]. Celle-ci implique, entre

autres, l'analyse de la tenue des structures internes de cuve et des assemblages combustibles, en fonction du type de brèche (position, aire, temps d'ouverture). Il est donc nécessaire de vérifier que les contraintes mécaniques générées sur les composants primaires restent limitées pour que les déformations résultantes n'empêchent pas le refroidissement du cœur par les moyens de sauvegarde et continuent de garantir l'étanchéité du confinement. La modélisation de l'APRP et de ses effets mécaniques présente plusieurs défis d'envergure, dont celui de la taille du modèle. Il s'agit ici d'être capable de représenter une onde de décompression qui prend naissance au point de rupture d'une tuyauterie, parfois à une certaine distance du cœur, et qui va se propager *via* les différentes canalisations et jusqu'au cœur. Il est donc nécessaire de modéliser le cœur et ses internes, mais également le réseau de tuyauteries et ses bifurcations, soit le circuit primaire principal complet. Pour cela, on mixe une modélisation 1D utilisée pour représenter le réseau de tuyauteries avec une modélisation 3D utilisée pour représenter la cuve et ses internes, avec des éléments de jonction 1D/3D pour raccorder les deux modélisations.

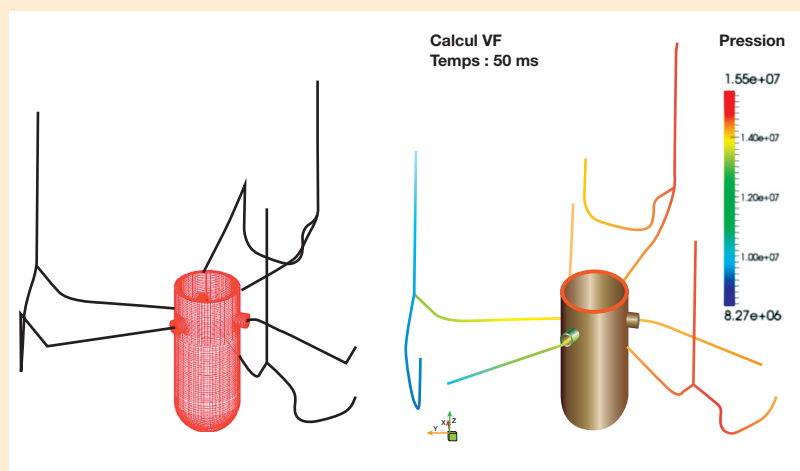


Fig. 198. Modélisation EUROPLEXUS de l'APRP : modèle à gauche, pressions à  $t = 50$  ms à droite.

Enfin, sous certaines conditions, des mélanges détonants peuvent se produire dans un réacteur : dans un REP, en cas d'échauffement et d'oxydation des gaines de combustible en alliage de zirconium, de l'hydrogène est libéré, pouvant causer une explosion au contact de l'oxygène de l'air. C'est ce qui s'est produit à Fukushima en 2011 (cf. zoom « Modélisation de l'explosion d'hydrogène dans une enceinte de confinement » p. 219).

Un autre exemple concerne les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium : en cas de contact entre le sodium et l'eau, une réaction explosive peut se déclencher. À ces scénarios de type explosion, il faut malheureusement ajouter les actes de malveillance, bien souvent menés à partir d'explosifs solides conventionnels, et dont il convient de modéliser les effets souvent dévastateurs.

Pour des raisons évidentes, l'utilisation de la simulation est indispensable pour l'étude de ces types d'accident, et elle présente alors un double défi : il faut tout d'abord modéliser l'onde de choc générée et sa propagation dans les fluides (gaz et/ou liquide), pour pouvoir ensuite évaluer les effets mécaniques sur les structures (déformations, rupture). Pour simuler correctement ces phénomènes, il est donc nécessaire d'avoir des outils dédiés à la dynamique rapide (formulation explicite) capables de modéliser les fluides, les structures et les interactions entre fluides et structures (IFS). Le code EUROPLEXUS [3] dispose de ces différentes fonctionnalités qui sont présentées dans le paragraphe « Des structures, des fluides et des interactions », p. 204 ci-après. Par ailleurs, afin de modéliser de plus en plus finement et de plus en plus efficacement les phénomènes, des outils complémentaires sont nécessaires et font l'objet de développements spécifiques dans ce code. Quelques-unes de ces méthodes avancées sont décrites dans le paragraphe « Des fonctionnalités spécifiques et complémentaires », p. 209. Enfin, le paragraphe « De la validation à l'utilisation industrielle », p. 214 apporte des éléments de validation des méthodes de modélisation de certains des scénarios de type propagation d'onde de choc mentionnés ci-dessus, fondés notamment sur des expériences.

## Des structures, des fluides et des interactions

La modélisation des accidents générant une onde de choc avec des effets mécaniques potentiellement graves est le cœur du code de calcul EUROPLEXUS. En effet, ce logiciel en formulation explicite dédié à la dynamique rapide, dispose des fonctionnalités suivantes :

- Des éléments finis (EF) pour représenter les structures (mais également les fluides), couplés à des lois de comportement matériaux permettant de représenter notamment les métaux, le béton... jusqu'à la rupture. Utilisés pour

modéliser les structures, les éléments finis sont des mailles qui peuvent se déformer (degrés de liberté en translation et rotation aux nœuds) en fonction des contraintes calculées aux points d'intégration (voir fig. 199b). La matière est attachée à la maille, qui a une masse constante. Ce sont des éléments dits « lagrangiens » ;

- des volumes finis (VF) pour représenter les fluides (compressibles et non visqueux), couplés à des équations d'état permettant de représenter gaz et liquides. Les volumes finis sont des mailles qui ne se déforment pas (pas de degrés de liberté aux nœuds), mais la matière peut transiter au travers de celles-ci (voir fig. 199c), via le calcul de vitesses, pressions, énergies internes et densités au centre des mailles. Ce sont des éléments dits « eulériens », qui permettent de résoudre les équations d'Euler (dynamique des écoulements compressibles). Il existe également des VF ALE (Arbitrary Lagrange Euler) qui autorisent la déformation (modérée) des mailles en fonction de différents critères, permettant par exemple aux faces des surfaces libres du maillage VF de suivre des conditions aux limites cinématiques ;
- différents types d'algorithmes de couplage permettant de coupler les modélisations fluides et structures : couplage de base de type ALE ou couplage de type frontières immergées. Dans le premier cas (méthode ALE), les maillages lagrangiens et eulériens doivent être congruents (frontières communes, avec maillages conformes ou non conformes), et la méthode implique une déformation lissée du maillage VF pour suivre la déformation du maillage EF (voir fig. 200a). Dans le second cas (méthode des frontières immergées), les maillages lagrangiens et eulériens (ou ALE) sont distincts et superposés (voir fig. 200b). Dans les deux cas, la structure lagrangienne constitue un obstacle au déplacement de fluide dans les mailles eulériennes et le fluide eulérien constitue un chargement (pression ou vitesses) sur les faces ou nœuds du maillage lagrangien (structure). La description des différents algorithmes disponibles dans EUROPLEXUS est donnée dans [4].

---

### Modélisation des fluides par la méthode des volumes finis

Dans EUROPLEXUS, à l'origine, les éléments finis étaient utilisés pour modéliser aussi bien les structures que les fluides. Les volumes finis dédiés aux fluides ont été développés ultérieurement, au milieu des années 2000 [5], pour des modélisations 2D (plane ou axisymétrique) et 3D (voir fig. 201). L'avantage de la méthode des volumes finis est qu'elle est conservative, ce qui n'est pas le cas en général de la méthode des éléments finis classique. Cela permet de traiter les discontinuités (chocs) de manière satisfaisante. La souplesse et la simplicité de la méthode permettent d'envisager différents

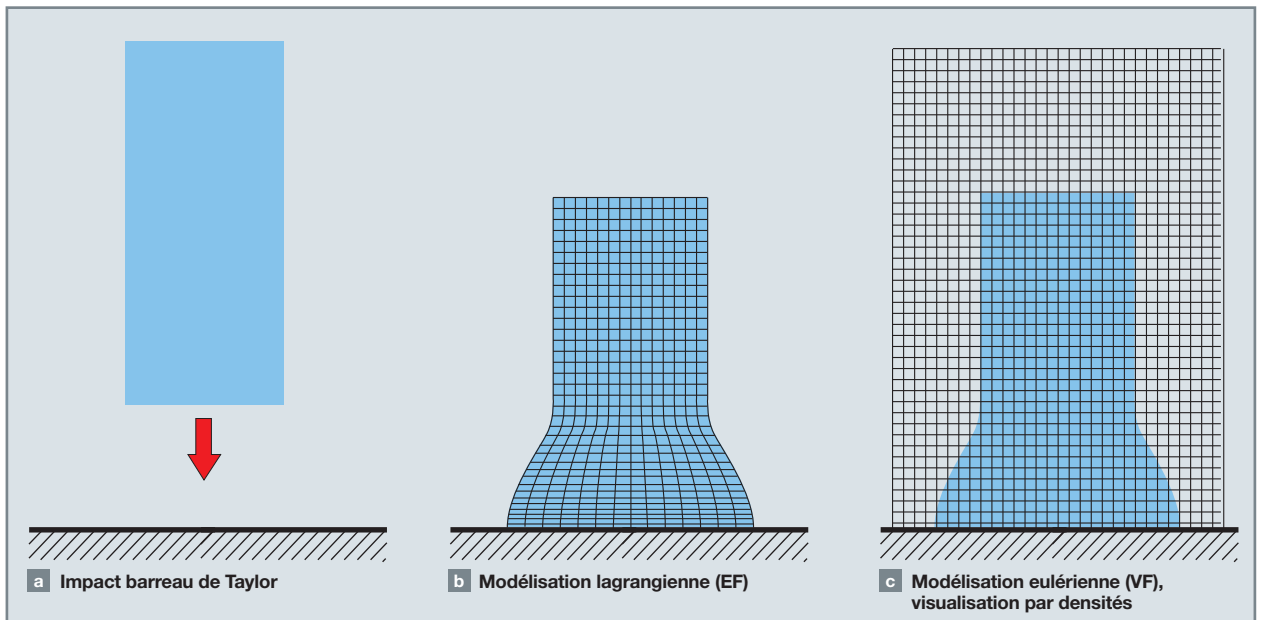


Fig. 199. Comparaison des modélisations lagrangienne (EF) et eulérienne (VF) de l'impact d'un barreau de Taylor.

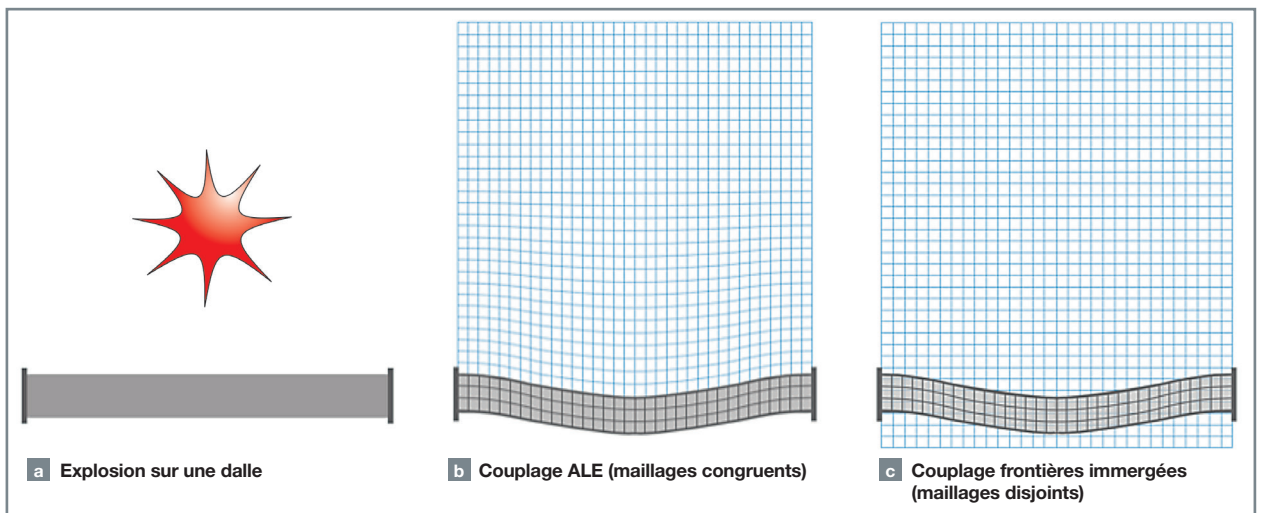


Fig. 200. Méthodes de couplage fluide-structure ALE et frontières immergées.

schémas numériques et solveurs utilisant une précision spatiale et/ou temporelle plus ou moins élevée. Le développement de méthodes de type VF pour la modélisation de l'écoulement, notamment dans les tuyauteries, constitue donc un moyen de contourner certains problèmes pouvant apparaître avec la méthode des éléments finis.

Pour le calcul fluide, on dispose d'un système de trois équations (dites équations d'Euler ou équations de conservation : bilan de masse, bilan de quantité de mouvement et bilan d'énergie) complété (fermé) par la loi d'état du fluide, permettant de déterminer les quatre inconnues calculées au centre des mailles : la densité, la vitesse, l'énergie interne et la pression. Dans la méthode des volumes finis, les équations régissant le fluide sont exprimées sous forme intégrale

sur chaque volume de contrôle. La méthode repose alors sur le principe suivant : dans une maille, le taux de variation des variables associées à l'état du fluide est relié aux flux traversant les frontières de l'élément. Le schéma principalement utilisé dans EUROPLEXUS pour les fluides compressibles est de type « *cell centered* » (voir fig. 201, droite) : le volume de contrôle correspond à chaque élément du maillage et les variables du fluide sont constantes dans la maille. Les flux sont évalués sur les faces de l'élément, calculés à partir des états « gauche » et « droit » de la face considérée obtenus par interpolation des variables associées au fluide. Plusieurs solveurs sont disponibles dans EUROPLEXUS pour le calcul des flux (solveur de Riemann exact ou approché de type Rusanov, HLL, HLLC, *Flux Vector Splitting...*), chacun présentant ses avantages et inconvénients (robust-

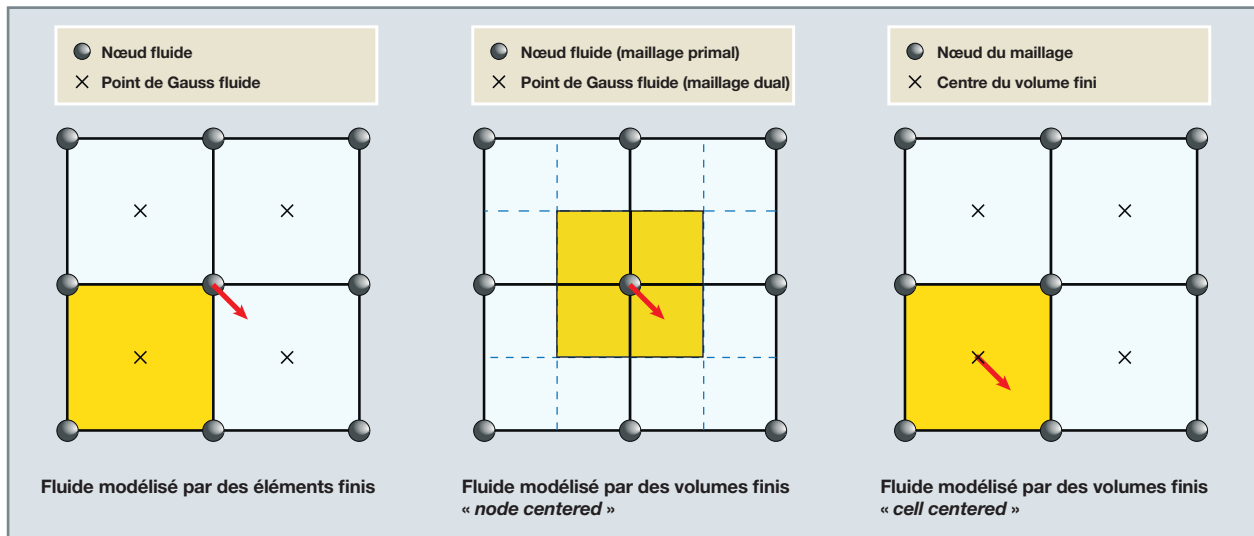


Fig. 201. Différents types de modélisation des fluides dans le code EUROPLEXUS [4].

tesse, précision, diffusion numérique, stabilité...) suivant la problématique étudiée. La discrétisation temporelle se fait quant à elle sur un schéma explicite, impliquant un pas de temps soumis à une condition de stabilité de type CFL (Courant-Friedrichs-Lewy), le pas maximal correspondant au rapport de la longueur caractéristique du volume de contrôle et de la vitesse maximale de propagation dans le fluide (somme de la vitesse du fluide et de la célérité du son dans le fluide). À noter que les schémas de résolution spatiale et temporelle sont aujourd'hui disponibles à l'ordre 1 et à l'ordre 2 (précision accrue).

### Modélisation des fluides dans les tuyauteries par des éléments 1D

Une des spécificités d'EUROPLEXUS est la librairie d'éléments 1D dédiés à la modélisation du fluide dans les tuyauteries. Initialement développés en formulation de type éléments finis, ils sont également disponibles en formulation de type volumes finis depuis les années 2010 [6]. On a ainsi des éléments de type « tube » pour modéliser le fluide contenu dans une tuyauterie rigide (pouvant être de section variable), des éléments de type « cavité » pour modéliser le raccordement de tuyauteries sur des réservoirs, ou encore de type « bifurcation » pour la jonction de tuyauteries (cellule 3D fictive) [7], des éléments permettant de modéliser les pertes de charge (régulières dues à la friction ou localisées du fait de la présence de singularités), les conditions aux limites et impédances... Ce sont typiquement ces éléments (quelques exemples en figure 202) qui sont utilisés pour modéliser le réseau de tuyauteries d'un circuit primaire dans le cadre de l'étude d'un APRP. Plus récemment [7], des éléments mixtes EF/VF ont été développés en couplant les éléments de tuyauterie VF listés ci-dessus avec des éléments EF structu-

rels de type poutre : ils permettent ainsi de modéliser l'écoulement d'un fluide dans une tuyauterie flexible, qui peut donc se déformer sous l'effet de la pression ou du mouvement du fluide. Ces éléments mixtes sont notamment utilisés pour la modélisation de phénomènes de type fouettement de tuyauterie. Pour compléter la panoplie, des éléments de jonction 1D/3D sont proposés pour raccorder une modélisation 1D et une modélisation 3D. Tous ces éléments ont fait l'objet de nombreux cas-tests de vérification et validation (tube à choc, explosion de vapeur, fouettement de tuyauterie, coup de bélier, test de Simpson...).

### Modélisation de l'interaction fluide-structure

Pour les modèles 3D, en cas d'interaction entre le fluide et la structure, deux maillages coexistent : le maillage EF pour la structure et le maillage VF (ou EF) pour le fluide. Les interactions entre les deux maillages sont résolues *via* des algorithmes de couplage de type ALE ou frontières immergées. Comme indiqué précédemment, le couplage ALE implique que fluide et structure aient des maillages congruents (conformes ou non conformes). La résolution VF est alors de type ALE : au lieu d'avoir une grille fixe (formulation eulérienne), la grille ALE peut être mobile, avec des nœuds, aux frontières du maillage fluide, qui suivent les déformations du maillage EF de la structure. La méthode ALE présente l'avantage d'être simple, rapide et précise. Elle impose cependant d'avoir des maillages congruents pour la structure et le fluide, ce qui peut nécessiter un important travail de préparation, surtout quand le modèle est complexe. Par ailleurs, en cas de grands déplacements, grandes rotations et/ou grandes déformations de la structure, voire de rupture, la méthode se retrouve mise en défaut, car elle ne permet pas de déformer excessivement la grille ALE (voir fig. 203).



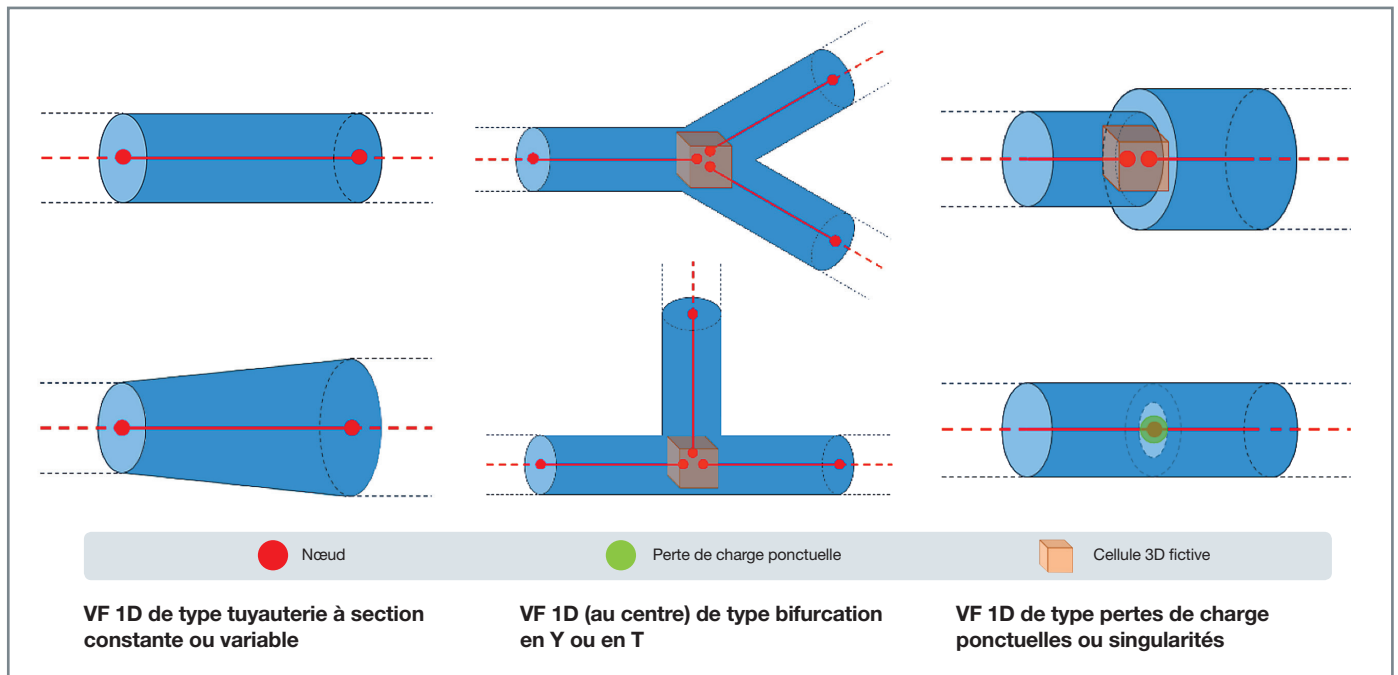


Fig. 202. Exemples de modélisations 1D des tuyauteries disponibles dans EUROPLEXUS.

Simulation du déplacement d'une structure (maillage EF de type coque) animée d'une vitesse de 10 m/s dans un volume de fluide (maillage VF).

Simulation du déplacement d'une structure (maillage EF de type coque) animée d'une vitesse de 10 m/s dans un volume de fluide (maillage VF).

Couplage de type ALE : les mailles du fluide se déforment excessivement, car liées au mouvement du maillage de la structure (mailles distordues en rouge) et stoppent le calcul.

Couplage de type « frontières immergées » : les mailles du fluide ne se déforment pas, le calcul aboutit, le champ de vitesse dans le fluide est similaire à celui obtenu en ALE.

Fig. 203. Comparaison des méthodes de couplage ALE et frontières immergées en cas de grands déplacements [9].

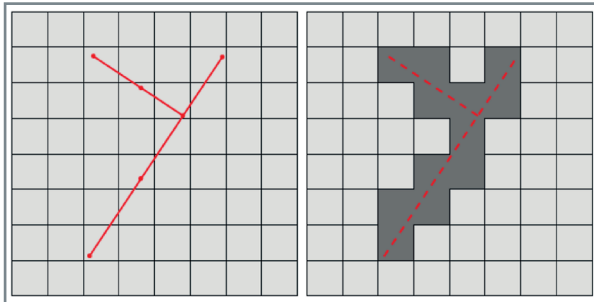
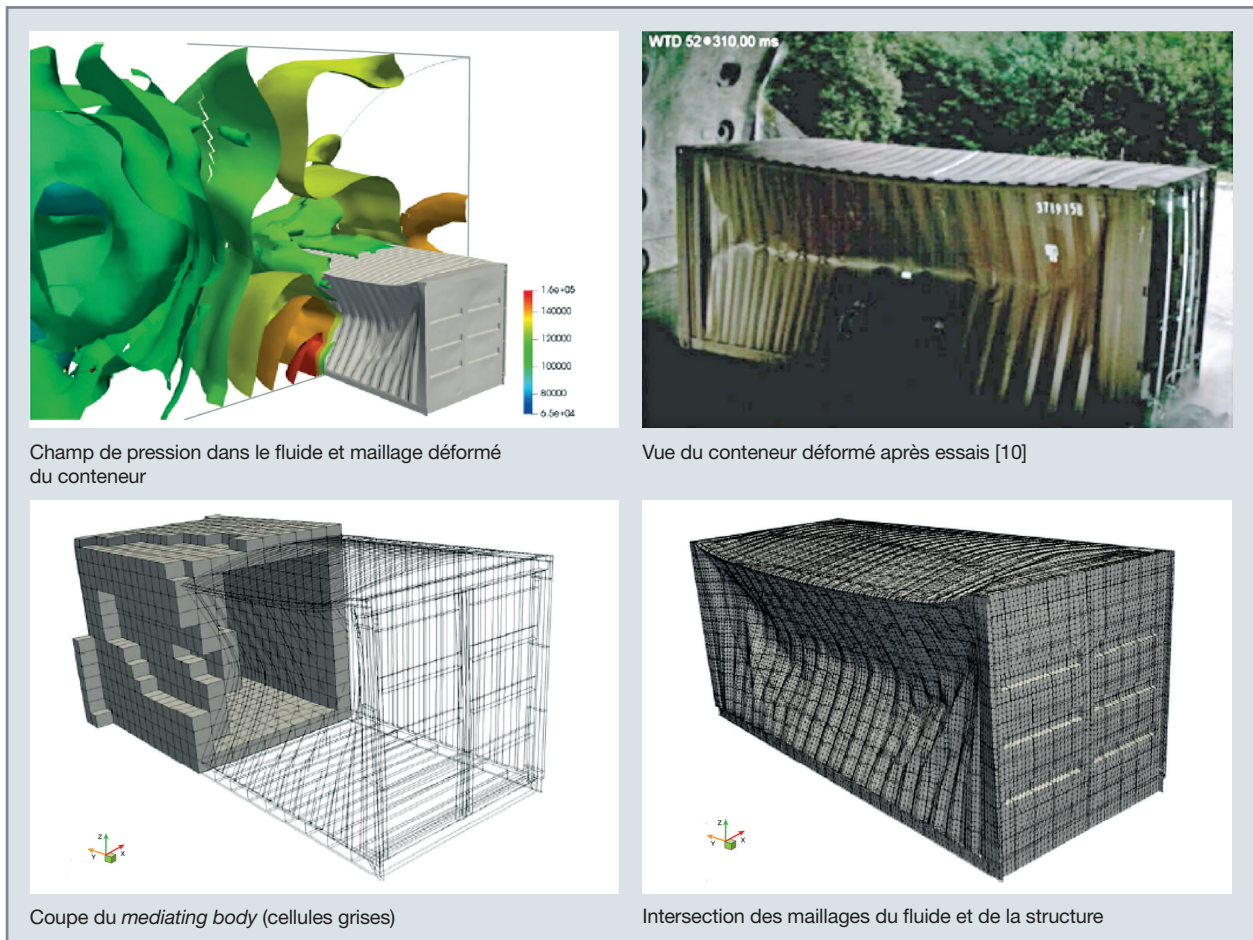


Fig. 204. Construction du *mediating body* dans la méthode de couplage par frontières immergées MBM [8].

Dans ces cas, les méthodes de couplage de type « frontières immergées » revêtent alors tout leur intérêt : d'une part, les maillages de la structure et du fluide étant distincts et superposés, il est nettement plus aisé de construire les deux maillages, surtout si la structure est complexe, et, d'autre part, les grands mouvements ou déformations de la structure sont possibles, de même que la rupture de l'interface. Ces méthodes se révèlent, par ailleurs, efficaces, robustes, et présentent une bonne précision, bien que généralement un peu moins élevée qu'avec le couplage ALE.

Une nouvelle approche de type « frontières immergées » a été récemment introduite dans EUROPLEXUS [8] pour améliorer la précision avec ce type de couplage. Elle repose sur le principe que le fluide et la structure échangent des quantités physiques au travers d'une entité intermédiaire appelée *mediating body*, qui donne son nom à la méthode : *mediating body method* (MBM). La méthode fonctionne avec une formulation VF du fluide, de type eulérienne ou ALE (ce qui permet, par exemple, d'imposer un comportement de type lagrangien à une interface). Le *mediating body* est défini par le volume constitué de toutes les cellules VF intersectées par la surface moyenne de la structure (voir fig. 204). Si, au cours de la simulation, la structure subit de grands déplacements ou de grandes déformations, le volume constituant le *mediating body* est alors ajusté pour toujours enclore la structure. Les cellules du *mediating body* ne sont pas prises en compte dans le calcul fluide, elles sont inactivées. Le « fluide actif » est constitué de toutes les autres cellules VF. Au cours du temps et en fonction du mouvement de la structure, les cellules constituant le *mediating body* peuvent donc changer, passant d'un état inactif à un état actif et inversement. La méthode a été testée et validée sur des cas-tests simples (piston, choc stationnaire oblique, écoulement isentropique



Champ de pression dans le fluide et maillage déformé du conteneur

Vue du conteneur déformé après essais [10]

Coupe du *mediating body* (cellules grises)

Intersection des maillages du fluide et de la structure

Fig. 205. Application de la méthode de couplage par frontières immergées MBM à la simulation des effets d'une explosion sur un conteneur [8].

dans un canal présentant une bosse...), puis appliquée à un cas industriel correspondant aux effets d'une explosion sur un conteneur positionné dans un tunnel (voir fig. 205).

La méthode a également l'avantage de pouvoir prendre en compte la rupture de la structure, ce qui n'est pas possible par les méthodes traditionnelles de type ALE. Elle se prête donc particulièrement bien à la modélisation des effets d'une onde de choc sur une structure, en particulier si la structure est complexe, comme une cuve et ses internes, et si les déplacements et/ou déformations sont importants.

## Des fonctionnalités spécifiques et complémentaires

La modélisation des phénomènes de propagation d'onde de choc avec interaction fluide-structure, au-delà des formulations de type éléments finis pour les structures, volumes finis (préférentiellement) pour les fluides et des algorithmes de couplage fluide-structure, nécessite le développement de modèles et outils complémentaires, en particulier pour adresser le comportement spécifique des fluides (gaz, liquides, changement de phase, mélanges réactifs...), mais également pour répondre à la problématique de la taille des modèles et tenter de l'optimiser sans perdre en précision. Enfin, si les ondes de choc se propagent à une vitesse élevée, on peut cependant avoir, dans certaines configurations, des écoulements bas Mach (nombre de Mach inférieur à 1), pour lesquels les schémas conçus pour la modélisation des fluides compressibles ne sont pas adaptés, nécessitant le développement de schémas spécifiques.

### Modélisation des fluides : des lois de comportement spécifiques

Les matériaux fluides sont définis par une équation d'état, qui relie les variables d'état du fluide (pression, densité, énergie interne et température). À titre d'exemple, la loi d'état d'un gaz parfait est :

$$P = (\gamma - 1) \cdot \rho \cdot e$$

avec  $P$  la pression,  $\rho$  la masse volumique,  $e$  l'énergie interne par unité de masse et  $\gamma$  la constante adiabatique. La loi d'état d'un liquide (parfait ou visqueux) peut être écrite sous forme analytique :

$$P = P_{ini} + (\rho - \rho_{ini}) \cdot c^2,$$

avec  $P_{ini}$  la pression et la  $\rho_{ini}$  densité du fluide dans son état initial,  $c$  la vitesse du son. Dans EUROPLEXUS, la loi d'état générique de type *stiffened gas* (multi-composants) est couramment utilisée pour représenter tout aussi bien les gaz que les liquides :

$$P = (\gamma - 1) \cdot \rho \cdot (e - q) - \gamma \cdot P_{inf},$$

avec  $\gamma$  une constante empirique pour les liquides,  $P_{inf}$  une constante représentant l'attraction entre molécules (liquides uniquement) et  $q$  une constante. Avec  $q$  et  $P_{inf}$  nulles, on retrouve la loi d'état des gaz parfaits. Pour représenter l'eau en prenant en compte ses deux phases fluides (mélange homogène d'eau liquide et de vapeur), on utilise des tables qui donnent les propriétés thermodynamiques de l'eau sous forme liquide ou vapeur en fonction de la pression et de la température. Cette modélisation est particulièrement indiquée dans le cas de phénomènes pouvant impliquer une vaporisation de l'eau liquide (APRP, coup de bélier...). Elle permet également de modéliser une explosion de vapeur (injection d'énergie).

En complément, EUROPLEXUS dispose aussi de modèles permettant de représenter plusieurs constituants sous différentes phases (liquide ou gazeuse), par exemple pour simuler une explosion dans un réservoir rempli de liquide avec un ciel gazeux, sous la forme de la détente d'une bulle. Enfin, pour modéliser les mélanges réactifs, il existe un certain nombre d'équations d'état spécifiques, entre autres : combustion de l'hydrogène, explosion sodium/eau ou encore la très classique loi d'état de type JWL (Jones-Wilkins-Lee) pour représenter la détonation d'un explosif solide. À titre d'exemple, l'équation d'état JWL donnant l'évolution de la pression  $P$  en fonction de la masse volumique  $\rho$  et de l'énergie interne par unité de masse  $e_{int}$  est :

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \omega \rho e_{int},$$

avec  $V = \frac{\rho_{sol}}{\rho}$ ,  $\rho_{sol}$  étant la masse volumique initiale de l'explosif solide,  $A$ ,  $B$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  et  $\omega$  coefficients de la loi pour un explosif donné.

### Des méthodes pour réduire la taille et le temps de calcul des modèles : AMR et mapping

Les problématiques de type onde de choc présentent deux difficultés :

- D'une part, la particularité de l'onde de surpression, notamment quand elle est issue d'une explosion, est qu'elle présente un front raide très rapide, nécessitant un maillage du fluide très fin pour la capturer et la propager correctement, et donc des temps de calcul élevés, notamment quand on cherche à obtenir les effets post-pic ou lorsqu'on s'intéresse aux effets à distance ;
- d'autre part, l'étude des effets sur les structures environnantes implique un couplage du maillage fluide avec le maillage structurel, lui-même relativement fin pour représenter correctement les modes de déformation pouvant aller jusqu'à la ruine.

Les modèles sont donc généralement très gros, avec un temps de calcul important, nécessitant la mise en œuvre de moyens de calcul lourds, de type HPC. C'est pourquoi des méthodes alternatives pour réduire la taille des modèles et les temps de calcul sont développées en complément de la parallélisation massive des logiciels. Nous en aborderons deux ici. La première, nommée AMR (*adaptive mesh refinement*, soit le raffinement de maillage adaptatif), consiste à lancer sa simulation sur la base d'un modèle constitué d'un maillage relativement grossier qui sera localement raffiné puis éventuellement « déraffiné » au cours du calcul, en fonction de divers critères. La seconde, appelée *mapping*, est une méthode essentiellement utilisée pour la simulation d'explosions.

La méthode AMR introduite dans EUROPLEXUS est de type *h-refinement* non conforme, réputée simple, efficace et robuste : les maillages raffinés sont non structurés, avec des nœuds créés sur les arêtes ou les faces d'éléments qui n'ont pas nécessairement de vis-à-vis (*h* pour « *hanging nodes* »). Le raffinement (ou déraffinement) se fait sur la base de critères ou indicateurs d'erreur. L'indicateur d'erreur peut être défini suivant différentes manières : courbure ou gradient d'une variable, valeur seuil d'une variable, proximité d'une entité physique. Les indicateurs d'erreur dits « classiques » sont fondés sur la courbure ou le gradient des variables standard : courbure ou gradient de la norme du déplacement, de la vitesse ou de l'accélération, gradient de pression ou de densité dans un élément fluide, gradient d'une composante du tenseur des contraintes ou d'une variable d'écroutissage dans un élément de structure.

Deux stratégies de pilotage du raffinement/déraffinement fondé sur un indicateur d'erreur « classique » peuvent être utilisées : en imposant la valeur de l'erreur (ce qui revient à imposer la taille de l'élément) ou en imposant le nombre d'éléments utilisés pour calculer l'erreur. Les indicateurs d'erreur fondés sur les valeurs seuil utilisent également les

variables élémentaires standards : pression ou densité dans un élément fluide, déformation principale, contrainte, déformation ou écroutissage dans un élément de structure. Une valeur seuil minimale est définie pour démarrer le raffinement, ainsi qu'une valeur maximale correspondant à l'atteinte du niveau maximal de remaillage (qui est également à définir). Dans le cas de l'utilisation d'un indicateur d'erreur de type « nuage de points » (proximité d'une entité physique), on peut combiner plusieurs types d'indicateurs spécifiques : indicateurs d'erreur « classiques », indicateurs de type « seuil », tels que définis précédemment, ou encore indicateurs spécifiques liés à l'interaction fluide-structure, au contact, au traçage d'interface entre espèces fluides (VoFiRe)... Ces derniers indicateurs sont principalement fondés sur des relations de distance simples entre les centres d'éléments « esclaves » et les nœuds « maîtres » attachés aux éléments choisis et définissant un « nuage de points ». C'est ce qui permet, par exemple, de déclencher le raffinement dans un fluide à proximité d'une structure ou d'une interface physique (représentée par le nuage de points). Pour chaque indicateur défini, il est nécessaire de définir le nombre maximal de niveaux de raffinement des éléments concernés (voir fig. 206).

À titre d'exemple, des tests d'utilisation de l'AMR pour la simulation d'explosion [11] ont montré que, dans le cas de la détonation d'une charge sphérique de 2 kg de TNT dans l'air, le calcul AMR avec un niveau de raffinement 5 est 40 fois plus rapide que celui fait avec un maillage régulier de finesse équivalente. Par ailleurs, l'AMR permet de réduire, voire d'éliminer, des problèmes d'instabilité numérique qui peuvent apparaître et se développer dans un maillage régulier fin (notamment au voisinage d'un axe de symétrie ou lorsque la direction de propagation est alignée avec la grille de calcul). Enfin, l'indicateur d'erreur qui s'est révélé le plus adapté à la simulation d'explosion est de type gradient de densité.

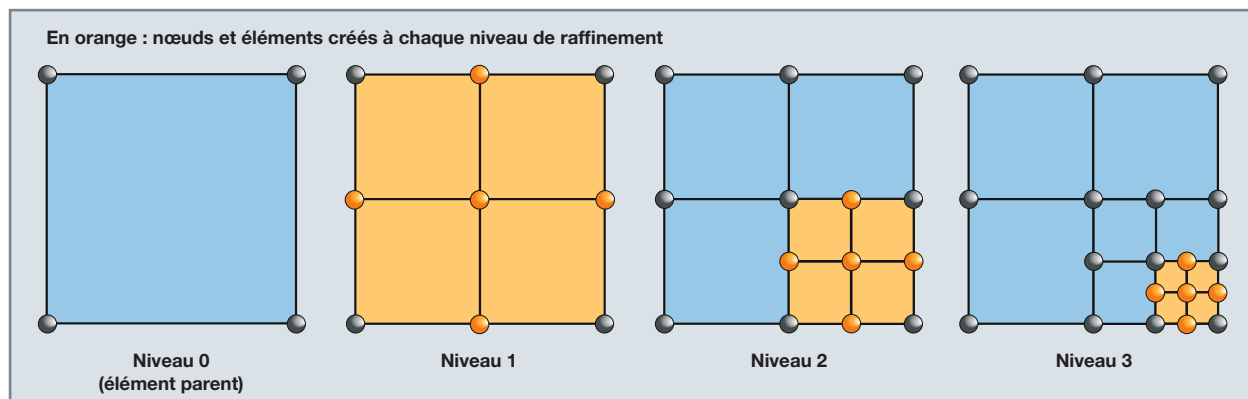


Fig. 206. Niveaux de raffinement de maillage (*h-refinement*).



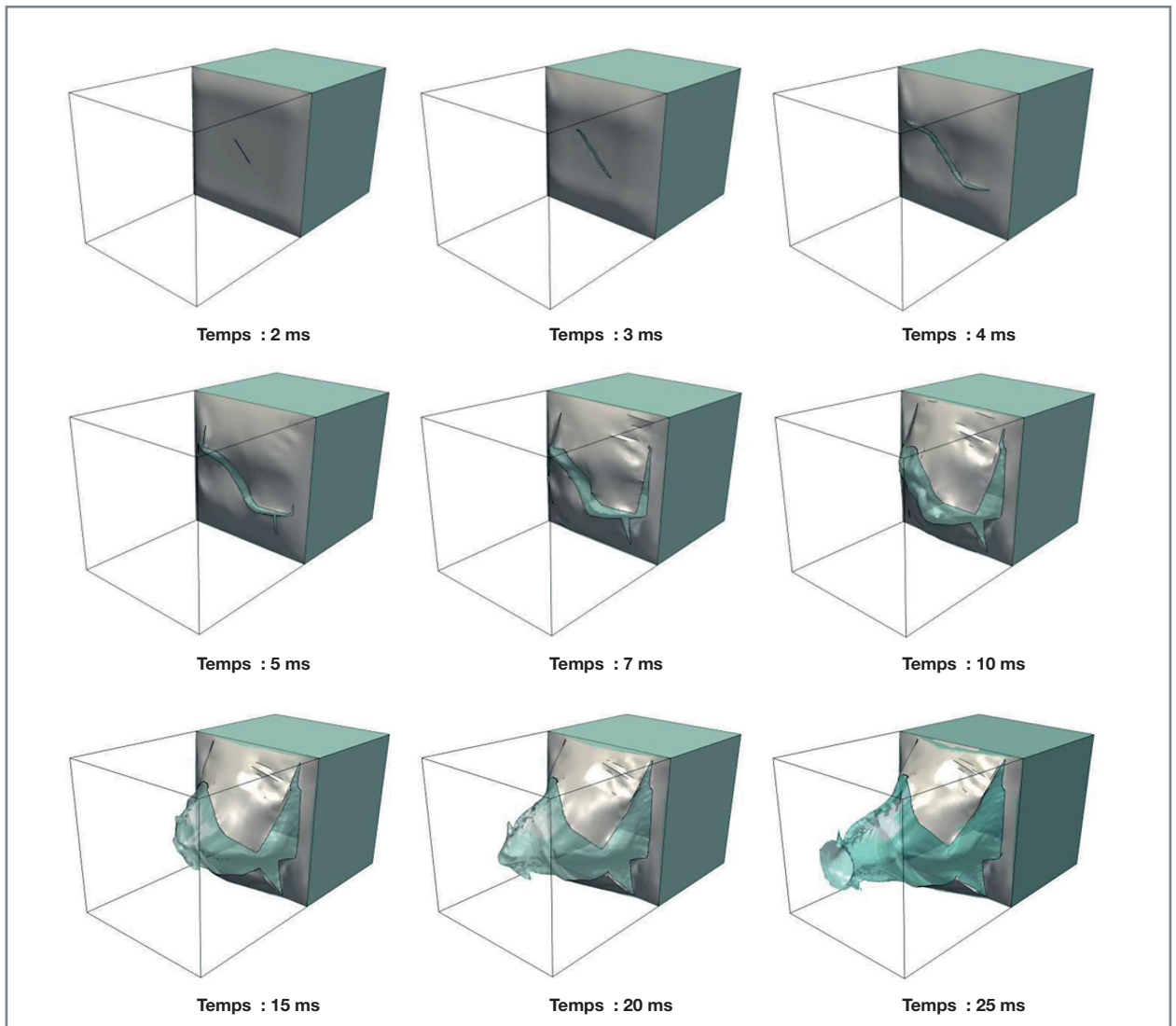


Fig. 207. Étude paramétrique de la rupture d'une plaque soumise à la pression d'un fluide [11].

L'article [12] est un exemple d'application de la méthode AMR utilisée dans le cadre d'une problématique complexe, en l'occurrence la modélisation de la rupture d'un réservoir soumis à un impact. La méthode de résolution présentée illustre la combinaison de plusieurs fonctionnalités disponibles dans EUROPLEXUS : la gestion du transitoire rapide de l'impact, l'interaction fluide-structure, le traçage de l'interface liquide-gaz, la modélisation de la rupture, le tout couplé à l'utilisation de l'AMR, aussi bien pour la structure que le fluide. La méthode AMR utilisée combine un indicateur d'erreur local de type gradient de pression pour la propagation des ondes de surpression et des indicateurs de type proximité pour suivre les différentes interfaces (fluide-structure, eau-air). Une analyse paramétrique sur un cas-test 3D simple (liquide poussé sur une plaque présentant une fissure initiale), mettant en œuvre l'interaction entre un fluide avec interface et une structure qui rompt, a d'abord permis de tester différents paramètres et méthodes numériques (voir

fig. 207 et fig. 208). Puis, sur la base d'un essai d'impact réalisé à l'ONERA, sur un réservoir rempli de fluide et perforé dans sa partie inférieure [13], la confrontation des résultats des simulations aux résultats expérimentaux vient valider la stratégie de modélisation.

Dans le cas de la modélisation d'une explosion, la technique dite du *mapping* permet d'avoir la précision nécessaire pour capturer un pic de pression qui peut être très élevé sur un temps très court (quelques microsecondes) en utilisant, dans un premier temps, un maillage très fin sur une zone limitée. Les résultats obtenus (pression, vitesse, densité) sont ensuite « mappés » sur un second maillage plus grossier, couvrant une zone plus étendue, constituant les conditions initiales du calcul suivant et permettant ainsi de poursuivre la simulation tout en conservant un pas de temps et un temps de calcul raisonnables.

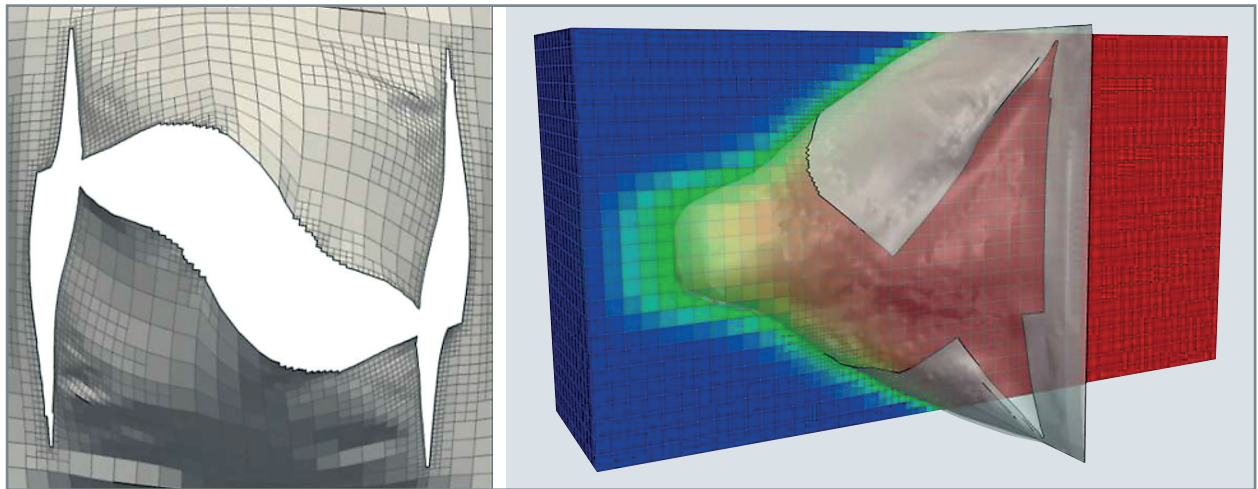


Fig. 208. Rupture de la plaque avec visualisation de l'AMR dans la structure (à gauche) et dans le fluide (à droite) [11].

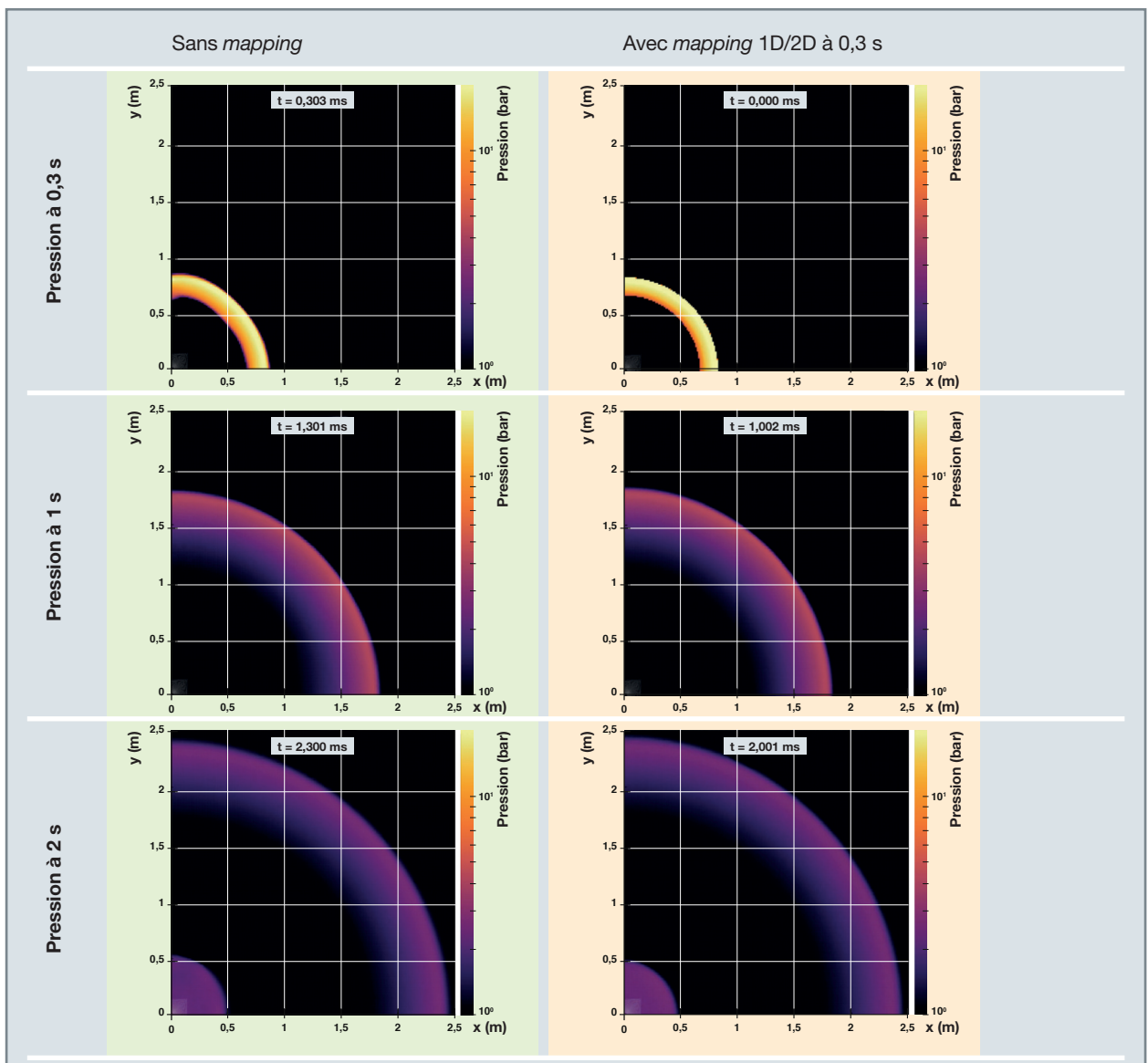


Fig. 209. Propagation d'une onde de surpression : simulation classique à gauche (sans *mapping*), simulation avec *mapping* 1D/2D à 0,3 s à droite.

Des *mappings* successifs peuvent ainsi être enchaînés, pour couvrir toute la zone de propagation de l'onde de choc. À tout moment, une structure peut être introduite dans le maillage, en considérant toutefois qu'elle ne peut être insérée que dans une zone encore non atteinte par l'onde. En cas de charge sphérique, afin d'optimiser la précision des résultats et les temps de calcul, le premier calcul peut être 1D, en utilisant des éléments filaires. Avec ce type de modélisation, il est aisé de mettre le nombre de mailles nécessaire pour obtenir le premier pic de surpression. Les résultats peuvent ensuite être mappés sur un modèle 2D (s'il présente une axisymétrie ; voir fig. 209) ou sur un modèle 3D. De la même manière, en cas de charge cylindrique, le premier calcul peut être 2D, en utilisant des éléments de coque axisymétrique. Ses résultats pourront ensuite être mappés sur un modèle 2D ou 3D.

### Des solveurs différents pour des problématiques variées

Dans certaines applications liées à la sûreté des installations nucléaires, des configurations peuvent présenter des écoulements dont le nombre de Mach est très inférieur à 1. Dans ce cas, la modélisation de ce type de problématique avec un schéma conçu pour la modélisation des fluides compressibles devient inefficace. L'utilisation d'un solveur compressible standard va à la fois présenter des problèmes de performance (liés au fait que la vitesse de propagation des ondes acoustiques est largement supérieure à la vitesse matérielle du fluide, imposant un pas de temps de calcul très petit) et une perte de précision (provenant en partie de la disparité entre vitesse d'onde et vitesse matérielle, mais aussi de la diffusion numérique du schéma). Il est donc nécessaire d'avoir des solveurs spécifiques dédiés à la résolution des problèmes pouvant présenter un régime d'écoulement à faible Mach.

À titre d'exemple, la figure 210 illustre la simulation avec un maillage relativement grossier de l'écoulement d'un fluide

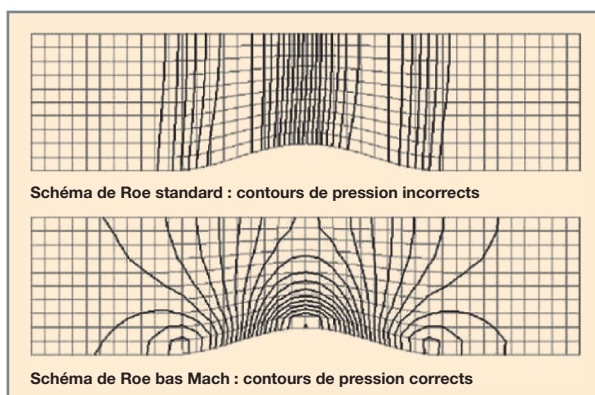


Fig. 210. Simulation d'un écoulement bas Mach dans un canal présentant une bosse : isovaleurs de pression [14].

non visqueux dans un canal présentant une bosse (modélisation 2D), avec un nombre de Mach de 0,01 en entrée. La figure du haut montre qu'un schéma de Roe standard ne permet pas d'obtenir correctement le régime établi de l'écoulement que seul un solveur adapté aux écoulements bas Mach permet d'obtenir (figure du bas).

Plusieurs méthodes permettent d'améliorer les performances et la robustesse des solveurs pour des écoulements lents. Dans EUROPLEXUS, trois techniques sont disponibles :

- Une première approche, fondée sur les travaux de S. Delacherie [14] et utilisant le solveur de Riemann approché HLLC, consiste à introduire un terme anti-diffusif dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement, dépendant du nombre de Mach local. Cette solution permet d'obtenir de bons résultats en nombre de Mach, vitesse d'écoulement et pression, mais incorrects en densité aux très faibles nombres de Mach ( $< 0,01$ ) (voir fig. 211, haut). Cet écart peut être imputable à la correction de la pression faite uniquement sur la quantité de mouvement. L'ajout d'un second terme correctif dans l'équation de l'énergie est une piste d'amélioration.
- La deuxième approche est fondée sur un *splitting* du flux (*flux vector splitting* ou FVS) en une partie convective et une partie acoustique, piloté par le nombre de Mach local. De cette façon, les parties convective et acoustique des équations d'Euler sont découplées et traitées séparément pour les régimes d'écoulement à faible nombre de Mach, tandis que les équations d'Euler complètes sont traitées pour les écoulements transsoniques et supersoniques (pas de *splitting*). Par ailleurs, l'ajout de deux termes anti-diffusifs sur la pression du « flux acoustique », pour les équations de la quantité de mouvement et de l'énergie, permet d'assurer une faible diffusion de ce nouveau schéma (mais le HLLC corrigé reste moins diffusif). Cette solution permet d'obtenir de très bons résultats sur toutes les variables (voir fig. 211, bas). Les deux solveurs modifiés présentent l'avantage d'exhiber une condition de stabilité raisonnable sur le pas de temps et donc des performances compatibles avec des modèles industriels.

Une troisième technique a été récemment introduite dans EUROPLEXUS toujours dans le but d'améliorer la précision, mais en réduisant significativement les temps de calcul. Elle est fondée sur la méthode DEM (*discrete equation method*) [16], bien adaptée aux écoulements diphasiques, à laquelle est couplée une approche de type « compressibilité artificielle » [17] : une vitesse du son artificielle est substituée à la vitesse du son physique ce qui permet de réduire les temps de calcul, les variables calculées étant ensuite corrigées par une transformation isentropique. Cette approche peut être combinée à une méthode anti-diffusive, qui permet de gérer finement les interfaces entre fluides. Comparative-

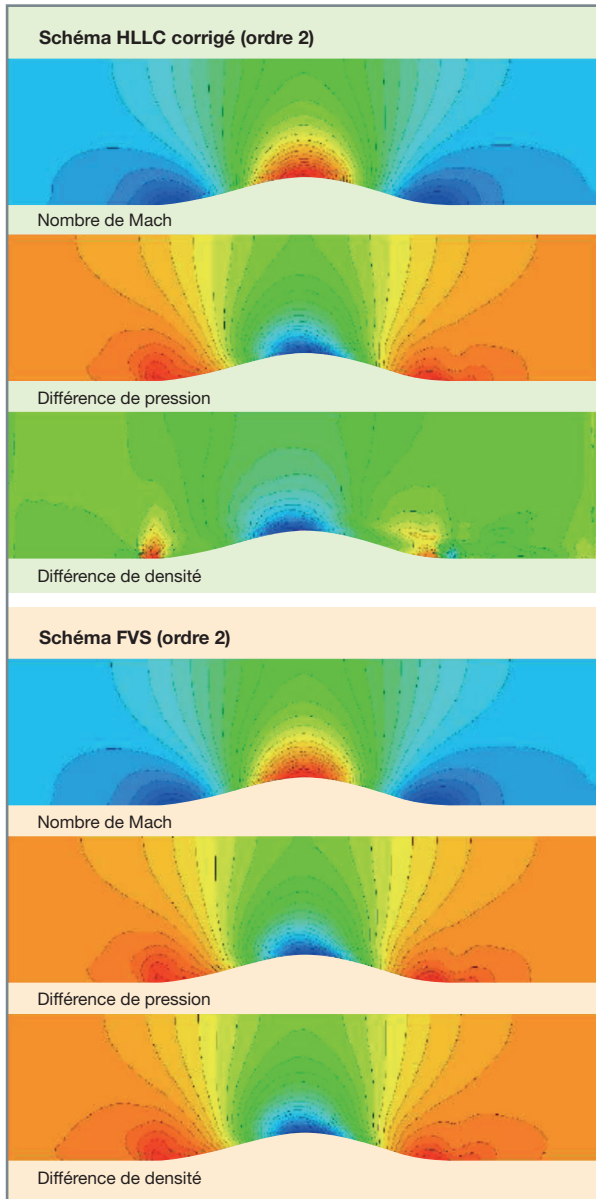


Fig. 211. Simulation avec EUROPLEXUS d'un écoulement à Mach 0,001 dans un canal présentant une bosse [15].

ment aux simulations utilisant la méthode DEM classique, il a été constaté que les temps de calcul sont divisés par trois en utilisant cette nouvelle méthode. La technique est encore à éprouver (robustesse), mais présente un réel potentiel.

## De la validation à l'utilisation industrielle

L'utilisation de la simulation est indispensable pour évaluer la tenue mécanique des composants de réacteurs (y compris l'enceinte) sous l'effet d'une onde de choc, mais cela passe nécessairement par une vérification et une validation rigoureuses de l'ensemble des fonctionnalités développées, en

s'appuyant notamment sur des modèles analytiques quand ils existent et sur une corrélation calculs/essais en particulier pour la validation. Plusieurs expériences sont documentées dans la littérature et sont ainsi utilisées à des fins de qualification des codes. À noter que les essais « simples » (mettant en œuvre un phénomène particulier) sont relativement nombreux, mais que les essais plus complexes (mettant en œuvre un ensemble de phénomènes représentatifs d'un accident) sont nettement plus rares.

### Les essais HDR pour la validation de la modélisation de l'APRP

Une campagne d'essais, dite essais HDR, a été réalisée au début des années 1980 à Karlsruhe en Allemagne sur un réacteur désaffecté. Ces essais avaient pour but de valider des modèles physiques et des algorithmes numériques de codes de calcul dédiés à la modélisation de l'APRP. Ils sont donc encore couramment utilisés à ce titre, notamment pour valider les fonctionnalités développées dans EUROPLEXUS [18]. Le dispositif expérimental de cet essai est composé d'une cuve relativement épaisse munie d'un ajutage de sortie et des tuyauteries d'alimentation (voir fig. 212). Celles-ci permettent de conditionner l'installation aux températures et pressions prescrites. Les équipements internes du réacteur ont été remplacés par une structure

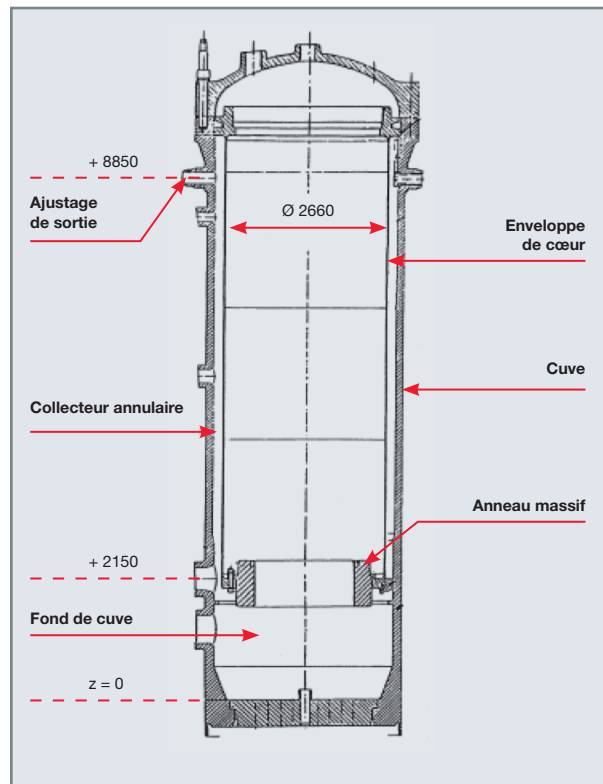


Fig. 212. Géométrie du réacteur HDR utilisé pour les essais (dimensions en mm) [19].



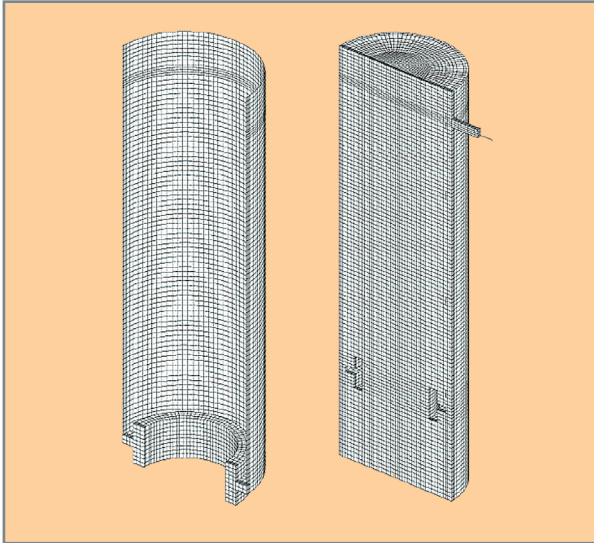


Fig. 213. Maillage de l'essai HDR avec EUROPLEXUS – Structure à gauche, fluide à droite.

équivalente : une enveloppe de cœur flexible, rigidement fixée sous le couvercle de la cuve, à laquelle est attaché un anneau massif et rigide simulant le cœur. La cuve est remplie d'eau au repos, avec une pression initiale de 110 bars. La température varie de 235 °C, dans le fond de la cuve, à 308 °C, dans la partie supérieure. À l'instant initial, la brèche s'ouvre au bout de l'ajutage par la rupture d'une membrane. Plus de 170 capteurs permettent de mesurer la pression, la différence de pression et les déplacements en plusieurs endroits. Ce dispositif expérimental a été modélisé avec EUROPLEXUS (voir fig. 213), avec quelques hypothèses simplificatrices. Par exemple, la cuve, considérée comme rigide, n'est pas représentée.

Sur la figure 214, à titre d'exemple, sont illustrés quelques résultats obtenus avec EUROPLEXUS pour deux types de modélisation du fluide : une modélisation en éléments finis et une modélisation en volumes finis. Pour les pressions comme pour les déplacements, la comparaison avec les résultats d'essais relevés aux capteurs montre que la modélisation de type volumes finis permet d'obtenir des résultats très proches des résultats expérimentaux. Récemment, le dossier de vérification et validation réalisé par les équipes d'EDF et du CEA a montré que les derniers développements réalisés dans EUROPLEXUS améliorent encore les résultats obtenus avec le code.

### Fouettement de tuyauterie : les essais AQUITAINE II

Une brèche (cf. encart « Brèche dynamique » ci-après) sur le circuit primaire peut également générer un fouettement de tuyauterie qui peut causer un impact violent sur son environnement. Les fonctionnalités nécessaires à la modélisation d'une rupture de tuyauterie à haute énergie (RTHE) sont disponibles dans EUROPLEXUS et ont été validées, entre autres, sur la base des essais AQUITAINE II [20]. L'équipement est constitué d'un réservoir d'une grande capacité qui vient alimenter une tuyauterie horizontale qui se finit par un coude à 90° et une portion de tuyauterie verticale (voir fig. 215). Un obstacle rigide et fixe est positionné sous le coude. La tuyauterie et le réservoir sont initialement remplis d'eau à 326 °C et 166 bars. La rupture brutale de la membrane qui ferme l'extrémité libre de la tuyauterie génère, sous l'effet des forces de réaction, un déplacement violent du coude qui vient impacter l'obstacle positionné en dessous et se déformer plastiquement. Plusieurs modélisations du fouettement peuvent être réalisées avec EUROPLEXUS : une modélisation simplifiée 1D ou une modélisation 1D/3D

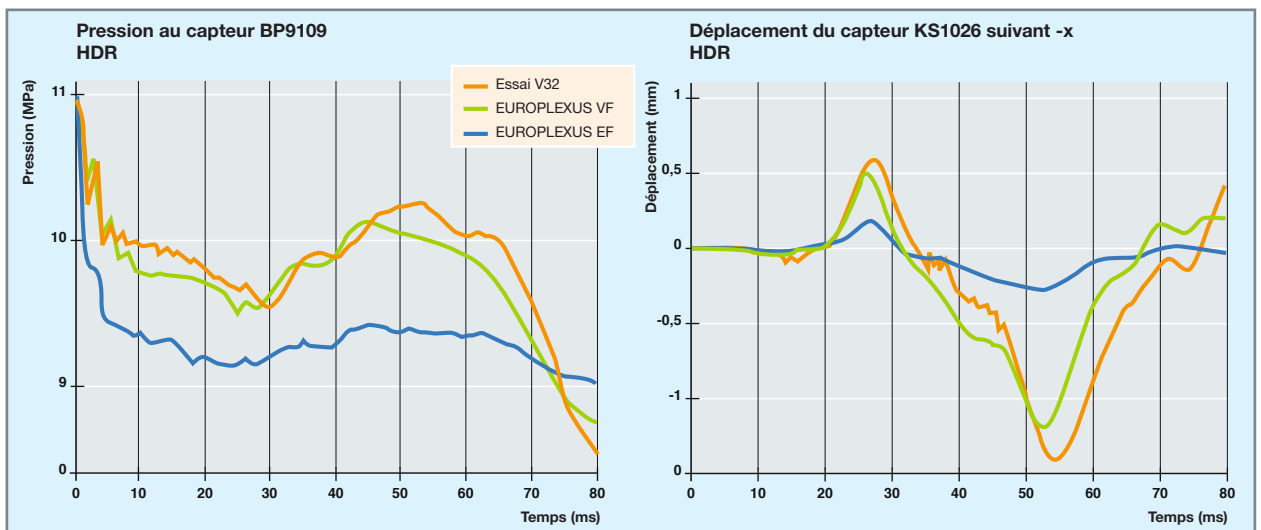


Fig. 214. Modélisation de l'essai HDR avec EUROPLEXUS : comparaison des courbes de pression au capteur BP9109 (à gauche) et des courbes de déplacement au capteur KS1026 (à droite).

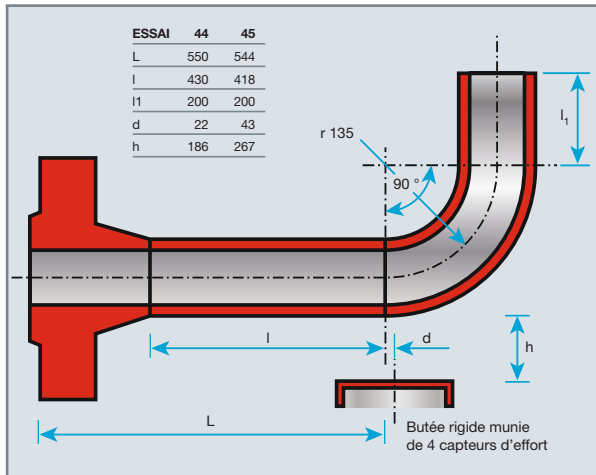


Fig. 215. Essais AQUITAINE II [20].

mixte (voir fig. 216). Bien évidemment, le modèle 1D, s'il prédit correctement le déplacement de la tuyauterie, surestime l'effort d'impact puisqu'il ne permet pas de représenter la déformation de la section du tuyau dans la zone de contact. La modélisation mixte permet, elle, d'obtenir une évaluation tout à fait correcte de l'effort.

### Brèche dynamique

Dans EUROPLEXUS, la brèche est modélisée par une condition limite sur laquelle est imposée une pression dépendante du temps. Dans le modèle de brèche initial dédié aux EF 1D, le changement de topologie n'est pas pris en compte et, au niveau de la brèche, les deux composantes de la tuyauterie (1D) rompues sont supposées fixes. La pression imposée à la brèche converge, selon une cinétique choisie par l'utilisateur, vers une valeur permettant de limiter le débit sortant à la valeur du débit critique stationnaire calculée par EPX. Un nouveau modèle, plus réaliste, a été introduit dans EUROPLEXUS pour mieux capter l'onde de dépressurisation dans les premiers instants qui suivent la rupture de la tuyauterie. Il permet, avant l'instant de rupture, d'assurer la conservation des débits et la continuité mécanique de la tuyauterie. À partir de l'instant de rupture, la continuité de la tuyauterie est rompue. La pression à la brèche est calculée en tenant compte de la position relative des deux composantes de la tuyauterie rompue et plus précisément de l'évolution de l'aire de la brèche selon

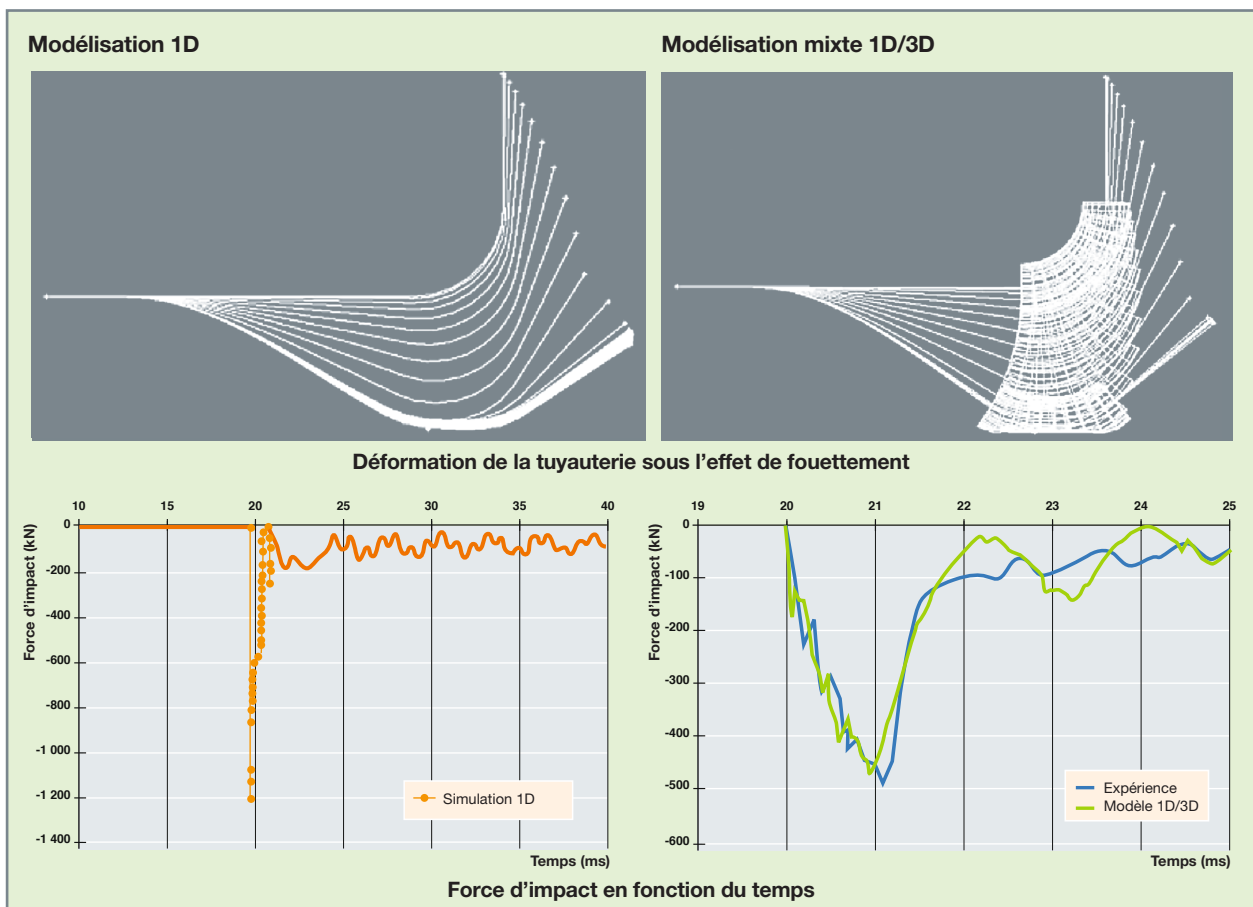
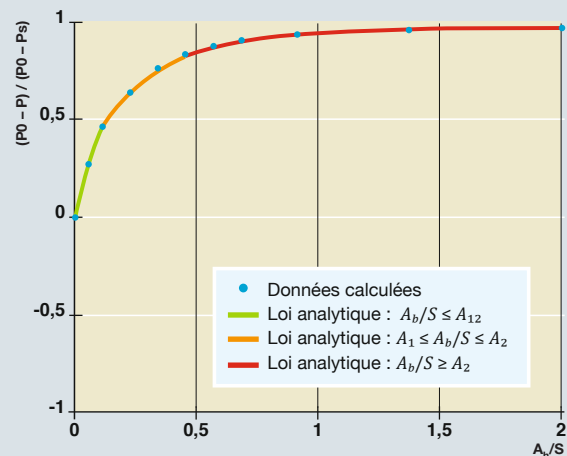


Fig. 216. Modélisation 1D et 1D/3D de l'essai de fouettement AQUITAINE II [21].

une loi [22] issue du code SAFARI. Le modèle permet également de prendre en compte les forces fluides exercées par l'écoulement sur la tuyauterie en vis-à-vis.

$$\frac{P_0 - P}{P_0 - P_s} = \begin{cases} a \cdot \left(\frac{A_b}{S}\right)^2 + b \cdot \left(\frac{A_b}{S}\right) & \text{si } \frac{A_b}{S} \leq A_1 \\ c \cdot \ln\left(\frac{A_b}{S}\right) + d & \text{si } A_1 \leq \frac{A_b}{S} \leq A_2 \\ e \cdot \left[\ln\left(\frac{A_b}{S}\right)\right]^2 + f \cdot \ln\left(\frac{A_b}{S}\right) + g & \text{si } \frac{A_b}{S} \geq A_2 \\ & \text{si } \frac{A_b}{S} \geq 2 \end{cases}$$



### Explosion de vapeur, accident de dimensionnement du confinement et essais MARA

L'accident BORAX, spécifique aux réacteurs d'expérimentation, est un exemple d'accident grave conduisant à une explosion de vapeur. BORAX (abréviation de l'anglais *boiling water reactor experiment*) est le nom du réacteur expérimental dans lequel s'est produit le premier accident de ce type. L'accident de dimensionnement du confinement (ADC), dans le cadre des réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium, est un autre exemple d'explosion vapeur : l'échauffement du combustible génère une vaporisation brutale du sodium sous forme d'une bulle de gaz chaud sous très haute pression. Pour la validation des outils de simulation d'un accident de type explosion de vapeur, les essais MARA font figure de référence. Ces essais ont été réalisés par le CEA dans les années 1980 sur des maquettes à l'échelle 1/30 du réacteur SUPERPHÉNIX afin de fournir des données de validation (pressions, déformations) pour les codes de calcul simulant ce type d'événement en prenant en compte l'interaction fluide-structure. Une charge explosive est placée au centre de la maquette remplie d'eau avec une couche d'air entre l'eau et le couvercle. Les résultats de ces essais ont, par exemple, été utilisés pour évaluer différentes approches de modélisation de l'ADC (*discrete element method* versus méthode classique ; voir fig. 217) ou encore l'amélioration des méthodes bas Mach pour réduire les temps de calcul [17].

### Validation de la modélisation des explosions

Dans un REP, en cas d'échauffement et d'oxydation des gaines de combustible en alliage de zirconium, de l'hydrogène est libéré, pouvant causer une explosion au contact de l'oxygène de l'air. C'est ce qui s'est produit à Fukushima en 2011. La modélisation d'une explosion d'hydrogène nécessite le développement de modèles de combustion, disponibles dans EUROPLEXUS (cf. zoom sur la combustion de l'hydrogène en fin de chapitre). Un autre exemple concerne les réacteurs à neutrons rapides refroidis au sodium : en cas de contact entre le sodium et l'eau, une réaction explosive peut se déclencher. Les expériences disponibles dans la littérature ne sont pas nombreuses, car elles nécessitent des moyens d'essais conséquents dès qu'il s'agit d'être représentatif d'une configuration accidentelle. La validation passe donc également par une corrélation calculs/essais fondée sur des moyens (relativement) simples. Ainsi, les modèles de combustion de l'hydrogène disponibles dans EUROPLEXUS ont été développés et validés entre autres à l'aide d'expériences réalisées dans le tube à choc SSEXHY de la plateforme FLOREAL au CEA Saclay. Le dispositif permet de faire exploser un mélange d'hydrogène et d'air, avec propagation au travers d'obstacles annulaires (ratio d'encombrement surfacique de 30 %). L'onde de surpression impacte ensuite un disque métallique dont on mesure la flèche. La simulation de l'essai avec couplage fluide-structure sous EUROPLEXUS donne de bons résultats (voir fig. 218) [23].

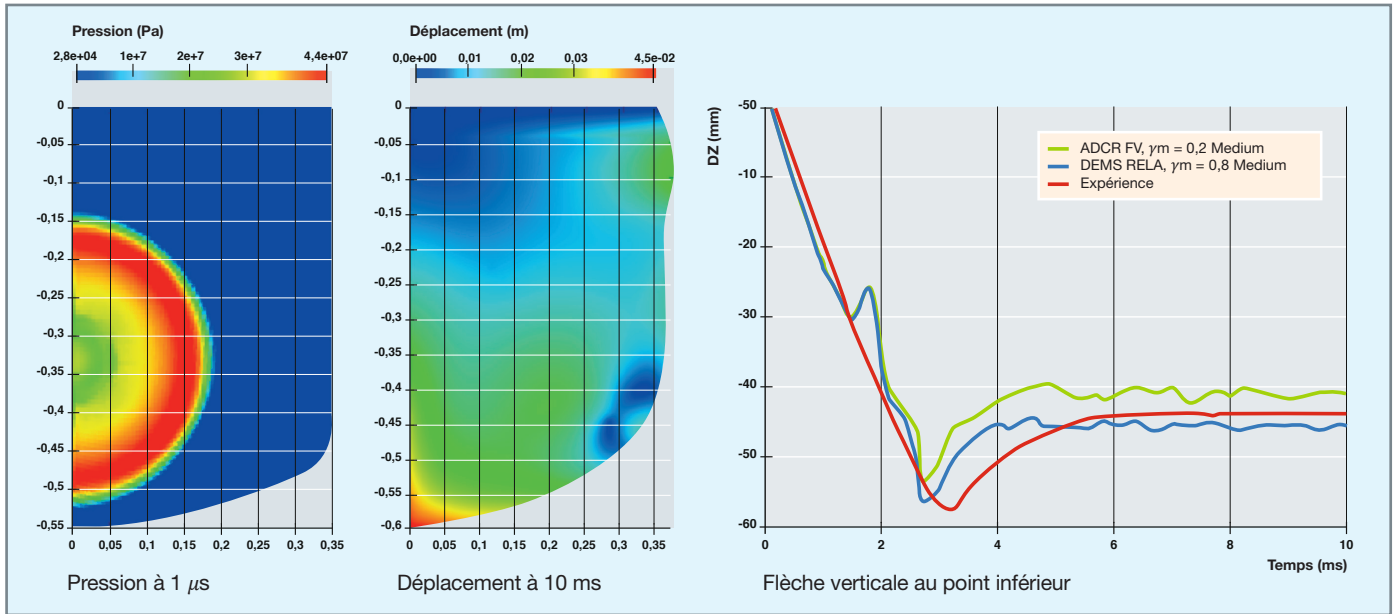


Fig. 217. Modélisation de l'essai MARA 2 avec EUROPLEXUS [17].

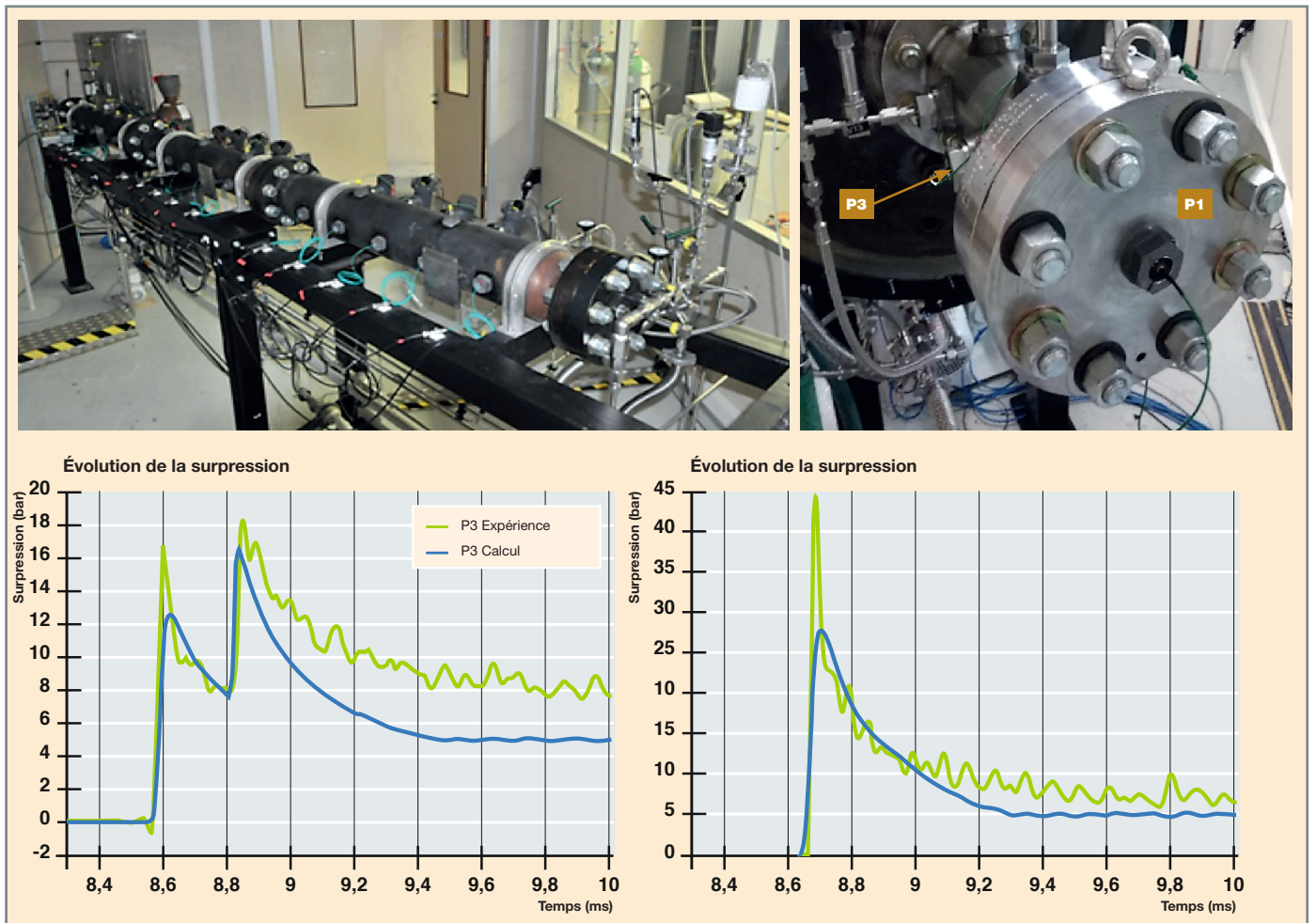


Fig. 218. Explosion d'hydrogène dans le tube à choc SSEXHY – Comparaison calculs EPX/essais des pressions aux ponts P3 et P1.



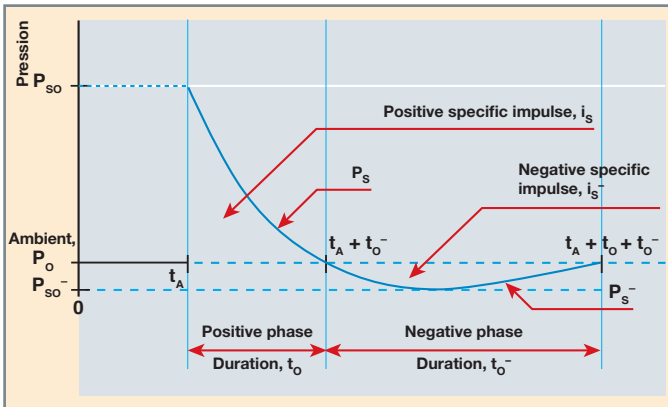


Fig. 219. Courbe caractéristique d'un pic de surpression généré par un explosif conventionnel (type TNT) [23].

Enfin, les essais réalisés avec des explosifs conventionnels ne font généralement pas partie de la littérature ouverte. Il existe cependant plusieurs ouvrages de référence proposant des abaques ou des lois empiriques permettant d'obtenir le pic de pression incidente ou réfléchi, le temps d'arrivée, l'impulsion incidente ou réfléchi..., en fonction de la charge équivalente de TNT et de la distance à la charge, pour une charge aérienne ou au sol (voir fig. 219). À titre d'exemple, citons l'UFC 3-340-02 [24], Kinney-Graham [25], Baker et al. [26] ou encore l'outil CONWEP [27]. À noter que, pour la simulation d'une explosion, la validation porte sur les modèles utilisés, mais également sur la modélisation. En effet, il est nécessaire d'avoir des maillages très fins et réguliers pour espérer capturer correctement le pic de pression, en particulier en champ proche.

### Zoom : Modélisation de l'explosion d'hydrogène dans une enceinte de confinement

L'accident nucléaire de Fukushima, consécutif au tsunami du 11 mars 2011, est dans toutes les têtes. La vague de 15 mètres de haut met hors service le refroidissement des réacteurs, entraînant la fusion des cœurs de plusieurs réacteurs. L'hydrogène dégagé s'accumule dans les enceintes de confinement, est libéré (pour faire chuter la pression), mais explose et souffle le toit de plusieurs bâtiments (voir fig. 220), provoquant le rejet de radionucléides dans l'atmosphère et l'environnement.

En cas d'accident dans un réacteur à eau pressurisée ou bouillante, la perte du refroidissement peut conduire à un dégagement d'hydrogène et d'eau vapeur. Les études de sûreté doivent donc prendre en compte le risque sur l'intégrité de l'enceinte de confinement que représentent les surpressions résultant d'une combustion accidentelle des mélanges hydrogène-air-eau vapeur. Ce problème est très complexe, même s'il est traité de manière déterministe. En supposant connue la quantité d'hydrogène libérée dans une zone définie, il est tout d'abord nécessaire de déterminer comment le nuage se diffuse dans l'enceinte de confinement. Le phénomène de diffusion peut être ponctué de déclenchements de combustion

et le mélange peut brûler soit sous forme d'une déflagration laminaire ou turbulente, soit sous forme d'une détonation. D'autres phénomènes complexes peuvent être impliqués dans cette phase transitoire, comme une transition déflagration-détonation (TDD), l'étouffement et l'extinction de flammes, la ré-inflammation...

Même en se limitant à l'étude des combustions pré-mélangées d'hydrogène et d'air, les problèmes physiques restent complexes. En premier lieu, les régimes de combustion différents : dans le cas d'une déflagration laminaire, la propagation de la flamme est due à la diffusion de la chaleur du mélange brûlé vers le mélange non brûlé, alors que, dans le cas d'une détonation, le choc précurseur chauffe le mélange non brûlé et provoque ainsi sa combustion. En second lieu, la difficulté est l'écart entre les différentes longueurs caractéristiques. Dans le cas d'une déflagration laminaire, la région de réaction varie de ~1 mm (cas stœchiométrique, 29,6 % du volume d'hydrogène) à ~10 mm (mélange pauvre, 10 % du volume d'hydrogène). Dans le cas de la détonation, la zone de réaction a le même ordre de grandeur. Ces dimensions sont à mettre en parallèle du volume libre du bâtiment d'une enceinte de confinement de réacteur, de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes. Ce qui rend impossible une « simulation directe » de la propagation de la flamme dans les régimes de déflagration, détonation et TDD.

Pour toutes ces raisons, la stratégie mise en œuvre au CEA pour développer les modèles de combustion de l'hydrogène ne se base pas sur une modélisation directe de la propagation de flamme, mais s'appuie sur l'hypothèse d'une flamme considérée comme infiniment fine, en négligeant les phénomènes de diffusion et en modélisant leur effet, par exemple par l'introduction de lois phénoménologiques pour la vitesse de flamme. En effet, les pressions peuvent alors être correctement prédites à partir de celle-ci.



Fig. 220. Centrale de Fukushima-Daiichi après l'accident nucléaire (par DigitalGlobe).

## Zoom : Modélisation de l'explosion d'hydrogène dans une enceinte de confinement

L'approche numérique implémentée dans EUROPLEXUS et décrite de manière détaillée dans [16] s'appuie sur les algorithmes numériques suivants :

- Méthode RDEM (*reactive discrete equation method*) : interface diffuse entièrement conservative qui ne nécessite pas la

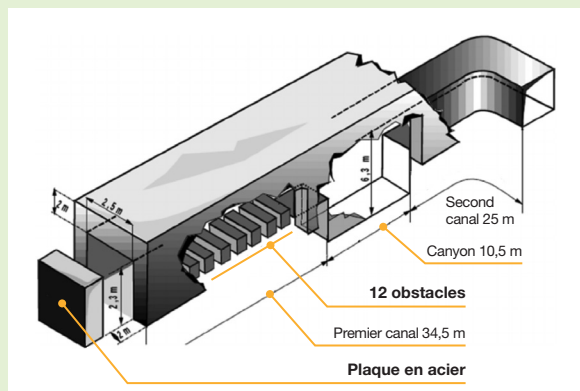


Fig. 221. Description du moyen d'essai RUT [30].

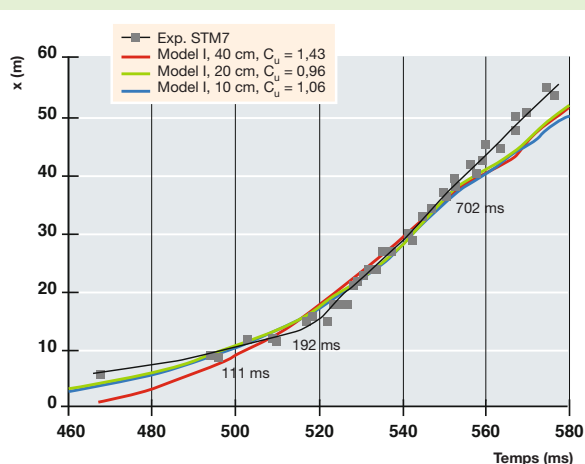
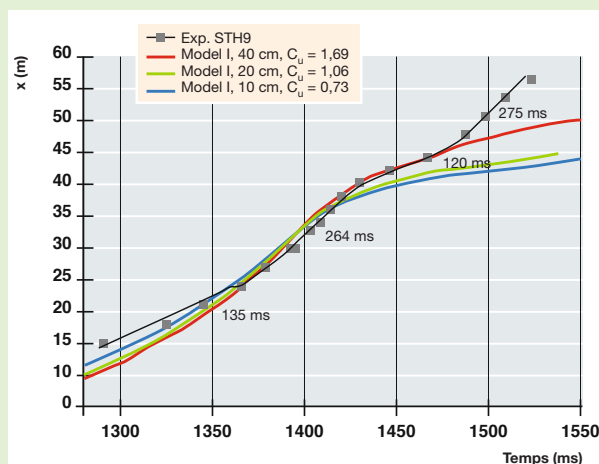


Fig. 222. Comparaison de résultats d'essais et de simulations EUROPLEXUS de l'expérience RUT [30].

reconstruction de l'interface et qui peut être facilement mise en œuvre dans une approche volumes finis ALE [28] ;

- solution au problème de Riemann réactif dans tous les régimes de combustion (déflagration faible de Chapman-Jouguet, détonation forte de Chapman-Jouguet) [29] ;
- approche faible diffusion dans les maillages non structurés.

La solution du problème de Riemann réactif nécessite la connaissance de ce qu'on appelle la vitesse fondamentale de flamme (la vitesse locale de la flamme par rapport aux gaz non brûlés), dont le calcul est décrit dans [30] où sont également proposés plusieurs exemples de validation de l'approche complète de la modélisation de la combustion hydrogène-air sur de grandes géométries, notamment des simulations numériques des essais de combustion rapide réalisés sur l'installation russe RUT (voir fig. 221 et fig. 222).

## Conclusion

Pour des questions de sécurité et de sûreté nucléaire, il est absolument nécessaire d'être en capacité d'évaluer et de garantir la tenue mécanique des structures en conditions accidentelles, même si celles-ci, par définition, sont extrêmement complexes à modéliser, comme on a pu le voir. La simulation numérique, adossée aux campagnes expérimentales quand celles-ci sont possibles, prend alors tout son sens. Elle nécessite cependant des outils de calcul de plus en plus avancés, impliquant eux-mêmes des moyens informatiques lourds. Les principaux enjeux sont à la fois la taille et la précision des modèles, avec de plus en plus le couplage de physiques, et parfois plusieurs échelles (temporelle et/ou

spatiale) dans un modèle unique. C'est le défi actuel : avoir des codes de calcul permettant ce type de modélisation très avancée sur des moyens de calcul de plus en plus performants. Il faut y ajouter le défi de la maîtrise des incertitudes, nombreuses dans le cas des situations accidentelles, du fait des multiples paramètres inhérents aux scénarios.

**Claire GAUTHIER,**

*Direction des Programmes Énergies*

**Alberto BECCANTINI, Pascal GALON, Olivier JAMOND,**

**Sergey KUDRIAKOV et Nicolas LELONG,**

*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*

## ► Références

- [1] *Synthèse du rapport de l'IRSN sur le nouveau référentiel d'étude de l'accident par perte de réfrigérant primaire*, 3 octobre 2014.
- [2] *Les accidents de fusion du cœur des réacteurs nucléaires de puissance – État des connaissances*, IRSN, EDP sciences, 2013.
- [3] *EUROPLEXUS – A Computer Program for the Finite Element Simulation of Fluid-Structure Systems under Transient Dynamic Loading – User's Manual*, CEA & EC/JRC, www-epx.cea.fr, 2021.
- [4] F. CASADEI, M. LARCHER and N. LECONTE, "Strong and weak forms of a fully non-conforming FSI algorithm in fast transient dynamics for blast loading of structures", *COMPdyn 2011, III ECCOMAS Corfu, Greece*, 25-28 May 2011.
- [5] P. GALON, *Rapport de synthèse : Méthode des Volumes Finis en ALE dans EUROPLEXUS – Nouvelles structures informatiques associées – Cas tests*, rapport technique, SEMT/DYN/RT/06-001/A, 2006.
- [6] P. GALON and F. DAUDE, *Volumes finis filaires dans EUROPLEXUS – Compléments I*, rapport technique, DEN/DANS/DM2S/SEMT/DYN/NT/12-031/A, 2013.
- [7] F. DAUDE and P. GALON, "A Finite-Volume approach for compressible single- and two-phase flows in flexible pipelines with fluid-structure interaction", *Journal of Computational Physics*, 2018.
- [8] O. JAMOND and A. BECCANTINI, "An embedded boundary method for an inviscid compressible flow coupled to deformable thin structures: The mediating Body Method", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Wiley, 119 (5), pp. 305-333, 2019.
- [9] O. JAMOND and V. FAUCHER, "Regularized immersed boundary-type formulation for fast transient dynamics with fluid-structure interaction", *Advances in Engineering Software*, 108, 1-23, 2017.
- [10] T. BORVIK, A. BURBACH, H. LANGBERG and M. LANGSETH, "On the ballistic and blast load response of a 20ft ISO container protected with aluminium panels filled with a local mass – Phase II: Validation of protective system", *Engineering Structures*, 30, 1621-1631, 2008.
- [11] P. GALON, *Bilan et perspectives sur les possibilités d'utiliser l'AMR pour la modélisation des explosions avec EUROPLEXUS*, note technique, DES/ISAS/DM2S/SEMT/DYN/NT/2020-67145/A, 2020.
- [12] V. FAUCHER, F. CASADEI, G. VALSAMOS and M. LARCHER, "High resolution adaptive framework for fast transient fluid-structure interaction with interfaces and structural failure – Application to failing tanks under impact", *International Journal of Impact Engineering*, 127, 62-85, 2019.
- [13] F. CALEYRON, *Simulation numérique par la méthode SPH de fuites de fluide consécutives à la déchirure d'un réservoir sous impact*, thèse de doctorat, 2011.
- [14] S. DELLACHARIE, "Analysis of Godunov type schemes applied to the compressible Euler system at low Mach number", *Journal of Computational Physics*, Vol. 229, 978-1016, 2010.
- [15] P. GALON, F. FAUDE et D. IAPIETRO, *Méthode des volumes finis dans EUROPLEXUS : Implémentation de deux nouveaux solveurs « bas Mach »*, note technique, DEN/DANS/DM2S/SEMT/DYN/NT/2019-64782/A, 2019.
- [16] K. TANG, A. BECCANTINI and C. CORRE, "Combining DEM and UDCS for non-reacting and reacting two-fluid computations: Two dimensional case", *Computers & Fluides*, 103, 132-155, 2014.
- [17] C.H. PHAN, *Solving low-Mach two-phase flows in closed domains: from pressure centering to artificial compressibility*, thèse de doctorat, 2021.
- [18] F. DEBAUD and P. GALON, *Validation de l'implémentation de la méthode des volumes finis dans EUROPLEXUS – Simulation des essais MARA 2 et HDR V32*, note technique, SEMT/DYN/RT/08-015/A.
- [19] S. POTAPOV, F. BLIARD & F. TÉPHANY, « Simulation de la décompression du réacteur HDR avec le code de dynamique rapide EUROPLEXUS », *Revue Européenne Des Éléments Finis*, 11(5), pp. 667–694, 2002.
- [20] J.-L. GARCIA, P. CHOUARD and E. SERMET, "Experimental studies of pipe impact on rigid restraints and concrete slabs", *Nuclear Engineering and Design*, 77, 357-368, 1984.
- [21] S. POTAPOV and P. GALON, "Modelling of AQUITAINE II pipe whipping test with the EUROPLEXUS fast dynamics code", *Nuclear Engineering and Design*, 235, 17, 2045-2054, 2005.
- [22] F. CROUZET, *Projet SITAR – Lot A1.1 Développement dans EUROPLEXUS d'un modèle de brèche dynamique*, note technique, EDF R&D, H-T63-2009-01828-FR, 2009.
- [23] S. KUDRIAKOV, Cahier de recette associé au modèle RDEM du code EUROPLEXUS V2018, rapport technique DEN/DANS/STMF/NT 2019 – 65284/A, 2019.
- [24] UFC 3-340-02, *Structures to resist the effects of accidental explosion*, Departement of Defense, USA, 5 December 2008.
- [25] G.F. KINNEY and K.J. GRAHAM, *Explosive shocks in air*, 2<sup>nd</sup> edition, 1985.
- [26] W.E. BAKER, P.A. COX, J.J. KULESZ, R.A. STRELOW and P.S. WESTINE, *Explosion hazards and evaluation*, 1<sup>st</sup> edition, 1983.
- [27] *Fundamentals of protective design for conventional weapons*, US Army Engineer Waterways Experiment Station, USA, 1984.
- [28] O. LE MÉTAYER, *Modélisation et résolution de la propagation de fronts perméables – Application aux fronts d'évaporation et de détonation*, PhD thesis, Aix-Marseille I, 2003.
- [29] A. BECCANTINI and E. STUDER, "The reactive Riemann problem for thermally perfect gases at all combustion regimes", *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 64, 269-313, 2010.
- [30] A. VELIKORODNY, E. STUDER, S. KUDRIAKOV, A. BECCANTINI, "Combustion modeling in large scale volumes using EUROPLEXUS code", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 35, pp. 104-116, 2015.

## ► Bibliographie

HALIM (O.), STUDER (E.), KOUDERIAKOV (S.), CARITEAU (B.) and BECCANTINI (A.), "Detailed examination of deformations induced by internal hydrogen explosions: models", 2019 EPX Users Meeting, ONERA Lille.





## De la codification à la conception

Les sections précédentes se sont attachées à mettre en avant les développements scientifiques engagés pour traiter de thématiques autour de la mécanique des structures pour appréhender les phénomènes en lien avec les fonctionnements nominal, incidentel et accidentel des structures du nucléaire.

Cette nouvelle section aborde sous un éclairage différent, plus technologique pourrait-on dire, les travaux menés par la DES dans le domaine de la mécanique des structures. Les deux premiers chapitres présentent ainsi l'exploitation des résultats des travaux développés dans les sections précédentes dans le cadre de la démarche de codification et de soutien aux unités d'exploitation. Ils abordent :

- La codification et les méthodes d'ingénierie, en s'appuyant sur l'exemple du code RCC-MRx ;
- les pôles de compétences en tant qu'organe d'assistance réglementaire pour les installations, avec le cas du Pôle de Compétences « équipements sous pression ».

Les deux chapitres suivants fournissent aux lecteurs deux exemples de mise en œuvre de ces éléments dans le cadre de la conception de futures solutions nucléaires :

- Le développement de concepts mixtes de génie civil pour la construction modulaire des SMR ;
- le développement des couvertures de test pour l'optimisation des futurs réacteurs de fusion.



## Codification et méthodes d'ingénierie (processus, exemples) : l'exemple du RCC-MRx

### Place de la mécanique des structures dans les codes et normes

Les référentiels normatifs tels que les codes (au sens de recueils de référentiels) ou les normes ont pour objectif de standardiser les pratiques et d'assurer la qualité des réalisations. C'est aussi un réceptacle pour l'ensemble des connaissances (développements et savoir-faire) fruits des travaux de R&D présentés précédemment. C'est particulièrement vrai pour les composants mécaniques qui font l'objet, dans les installations nucléaires, d'attention particulière et nécessitent de disposer de référentiels dédiés pour leur conception et fabrication. En France, deux référentiels sont portés par les acteurs de la filière, le RCC-M [1] dédié aux composants mécaniques des réacteurs à eau sous pression et le RCC-MRx [2] pour les autres types de réacteurs. Depuis sa création, le CEA participe à la gestion du RCC-MRx et en a la présidence depuis 2009.

Pour mieux comprendre la place de la mécanique des structures dans le code, il convient d'avoir une vue d'ensemble de l'organisation du référentiel en figure 223.

Comme on le voit, le référentiel couvre l'ensemble des étapes de fabrication du composant, qui vont du choix du matériau à la réalisation du composant en passant par les phases d'approvisionnement et de conception et de contrôle, où va intervenir une interaction forte avec le soudage et la fabrication. La mécanique des structures en tant que telle est la base fondatrice de la conception des composants, partie centrale du code, qui donne la marche à suivre pour apporter la démonstration de la résistance du composant à un ensemble de dommages possibles qui sont, dans le cas du RCC-MRx :

- « Type P » :
  - déformation excessive,
  - instabilité plastique,
  - rupture différée ;
- « type S » :
  - déformation progressive,
  - fatigue ;
- instabilité élastique ou élasto-plastique (flambage) ;
- rupture brutale.

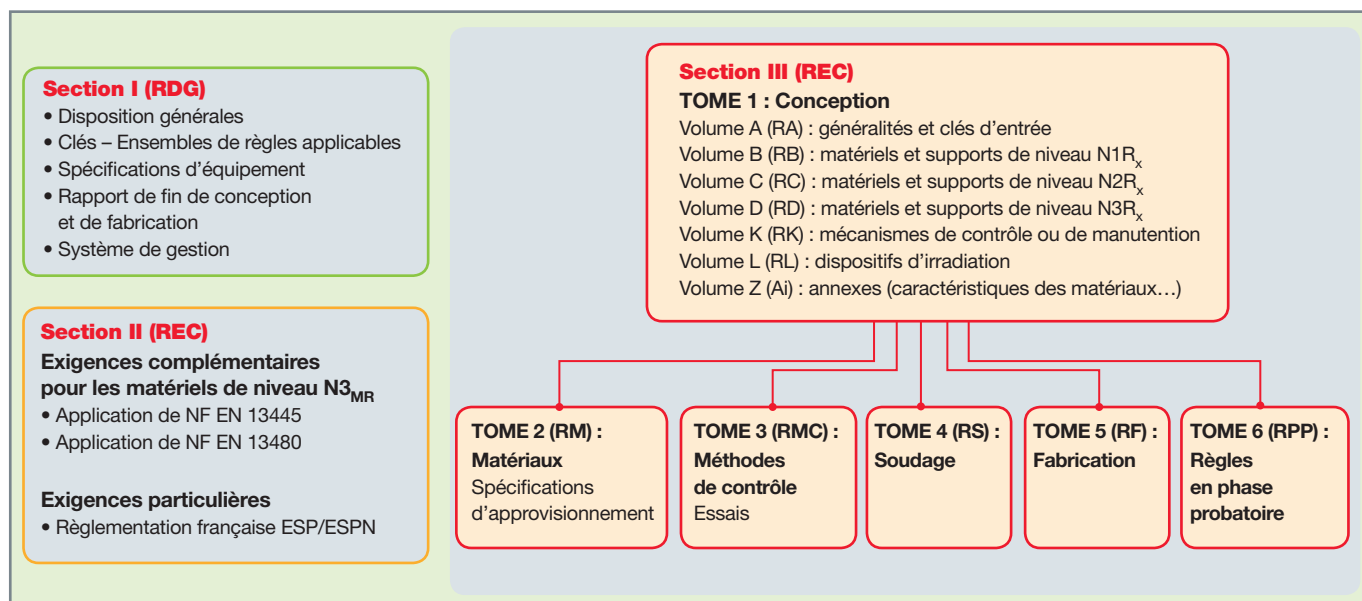


Fig. 223. Organisation du référentiel du code RCC-MRx.

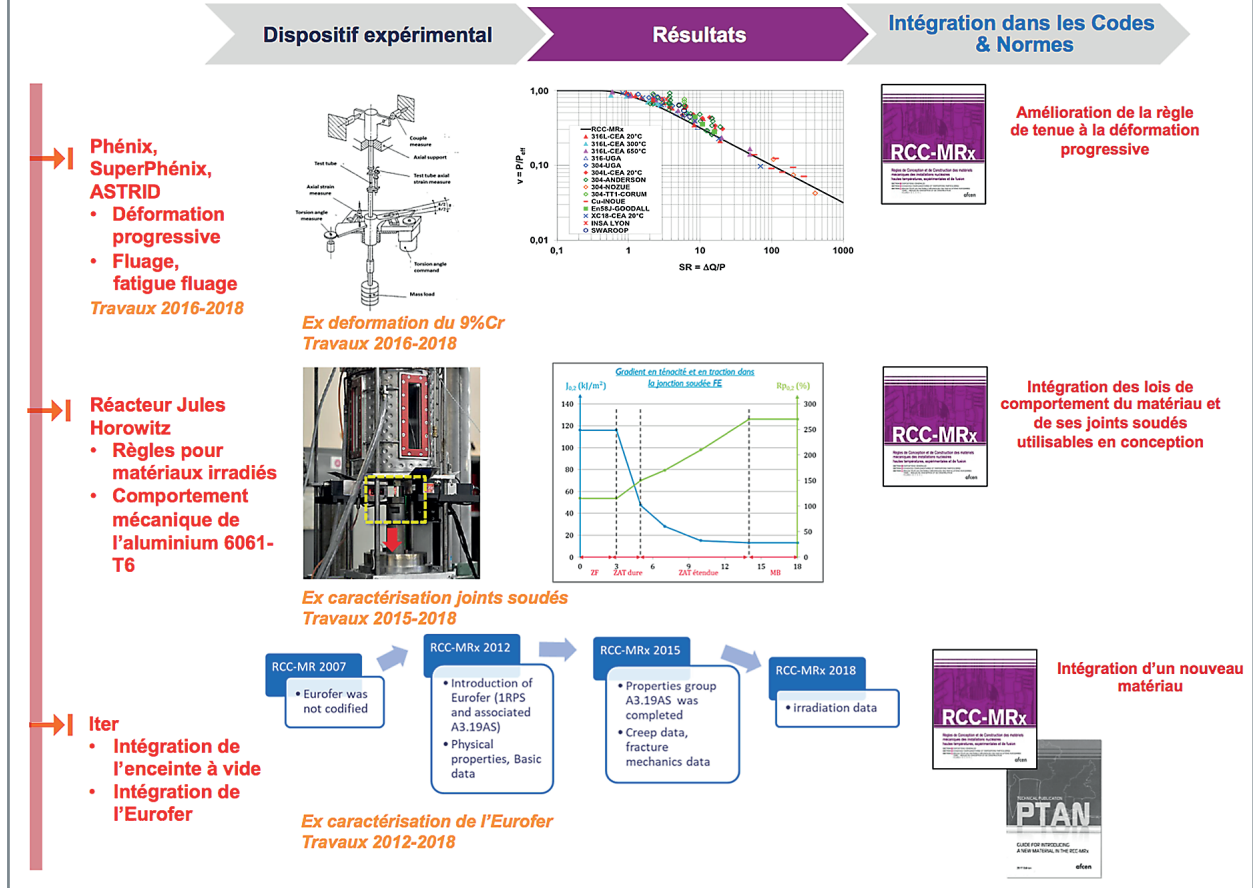


Fig. 224. Valorisation des travaux : codification et normalisation industrielles.

La mécanique des structures donne, pour chacun de ces dommages, les outils nécessaires de modélisation et d'évaluation de l'état de la matière du composant. Les référentiels, à partir de ces outils, définissent les règles et critères à vérifier dans le procédé de conception du composant.

Les exemples qui suivent illustrent plus précisément comment les développements en mécanique des structures sont valorisés dans le référentiel. Ils sont synthétisés en figure 224.

### Les apports des réacteurs RNR Na pour le code

À la fin des années 1970, après la construction des réacteurs PHÉNIX et SUPERPHÉNIX, EDF, Framatome et le CEA décident de rédiger un ensemble de règles rassemblant le retour d'expérience acquis dans l'objectif de futures constructions. Ce sera le RCC-MR, publié pour la première fois en juin 1985. Le RCC-MR, tout en reprenant la structure de l'ASME II et du CC n° 47 de l'ASME, intègre les travaux de R&D d'EDF et du CEA, ainsi que le savoir-faire de Framatome

acquis lors de la construction de SUPERPHÉNIX. Il fait suite à la création en 1977 du groupe de travail RAMSES (règles d'analyses mécaniques des structures) par le CEA, puis du Comité Tripartite (incluant EDF et Framatome) en 1978, qui pose les bases des travaux conduisant à la publication du RCC-MR.

Le RCC-MR intègre donc les résultats des travaux du CEA [3] [4] concernant notamment des règles innovantes sur :

- Le flambage des composants ;
- la déformation progressive, avec l'introduction d'une règle alternative pour évaluer le risque de déformation progressive en fluage, dite règle du diagramme d'efficacité ;
- l'utilisation de la loi de Neuber pour la déformation plastique ;
- la prise en compte de la fatigue-fluage ;
- les analyses de mécanique de la rupture.



Le RCC-MR, devenu RCC-MRx, a continué d'être alimenté au fil des éditions par les divers travaux de recherche du CEA, incluant des travaux d'envergure dans le cadre du projet ASTRID (*Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration*) qui ont notamment conduit à des développements sur les matériaux (alliage 800, métal d'apport pour soudage TIG 18-12-2, approvisionnement de plaques épaisses en 316L[N]), sur la fabrication et les contrôles (groupe de travail TECNA, passage de KV à KV pour les aciers inoxydables, amélioration de la qualification du soudage dans le domaine du fluage), et sur les règles (amélioration de l'évaluation en fluage, fluage-fatigue, déformation progressive, règles alternatives pour la prise en compte du séisme, du flambage des tuyauteries, règle de dimensionnement des soufflets). La mise en cohérence du code avec la réglementation française (arrêté ESPN) a également été faite.

## Le réacteur RJH et le code

### **Prise en compte du retour d'expérience du réacteur Jules Horowitz**

Le réacteur Jules Horowitz (RJH) est un réacteur de recherche de 100 MW actuellement en construction sur le site de Cadarache. C'est un réacteur dit d'irradiation technologique devant permettre des études éponymes sur des matériaux et combustibles nucléaires pour divers secteurs comme l'industrie civile, la médecine et la défense. C'est à ce projet de réacteur que l'on doit le « x » du RCC-MRx. En effet, lorsque le projet a été initié, il a très rapidement été décidé de l'adosser à un référentiel, sur la base du retour d'expérience des installations précédentes du CEA. Cette démarche, innovante pour un réacteur expérimental, a conduit à la rédaction d'un référentiel dédié (édition 2008 de référence pour le projet), le RCC-MX [6], qui rassemblait des éléments essentiels au projet qui n'existaient nulle part ailleurs : règles de conception pour des composants sous flux, matériaux spécifiques tels que les alliages d'aluminium ou de zirconium. Ce référentiel a par la suite été fusionné avec le RCC-MR [7], en 2009, pour conduire au référentiel que nous connaissons, le RCC-MRx (première édition en 2012 [8]). Les apports du projet sont multiples :

- En conception, l'intégration de règles pour prendre en compte l'effet de l'irradiation sur les matériaux, des règles spécifiques aux dispositifs d'irradiation, aux mécanismes de contrôle et de maintenance ;
- dans le domaine des matériaux, l'intégration de matériaux et de leur approvisionnement associé, tels que les alliages d'aluminium pour le caisson, la bride ou les alliages de zirconium pour les dispositifs ;

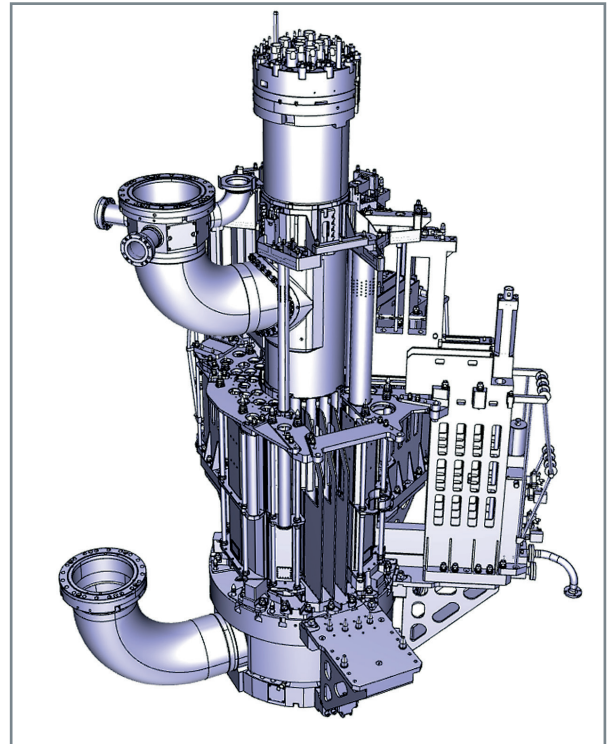


Fig. 225. Vue CAO générale du cœur RJH.

- en fabrication et contrôles : le retour d'expérience des fabrications du RJH a contribué à enrichir notablement le code pour tout ce qui concerne la fabrication, le soudage et le contrôle des pièces en 6061-T6.

### **Un exemple d'application du RCC-MRx : le dispositif SND (source neutronique de démarrage) du RJH**

Le réacteur Jules Horowitz dispose d'un nombre important d'emplacements en cœur et en périphérie pour mener des expériences. Certains de ces emplacements disposent de systèmes spécifiques, tels que des boucles indépendantes (que ce soit en eau ou en gaz), pour faire varier des paramètres physiques comme la température ou la pression selon les besoins. Un de ces emplacements est dédié au dispositif contenant la source neutronique de démarrage (dispositif SND) servant principalement de « clé de contact » pour démarrer le réacteur. Comme précisé au paragraphe précédent, le code RCC-MRx définit l'ensemble des exigences, données matériaux et processus de fabrication afin de concevoir, dimensionner et réaliser ce type de dispositif [5].

#### **Conception**

De par son rôle clé, ce dispositif est défini comme un élément important pour la sûreté (EIS), les premières étapes de conception du dispositif SND doivent donc être menées selon les exigences les plus strictes du code. Cela impacte

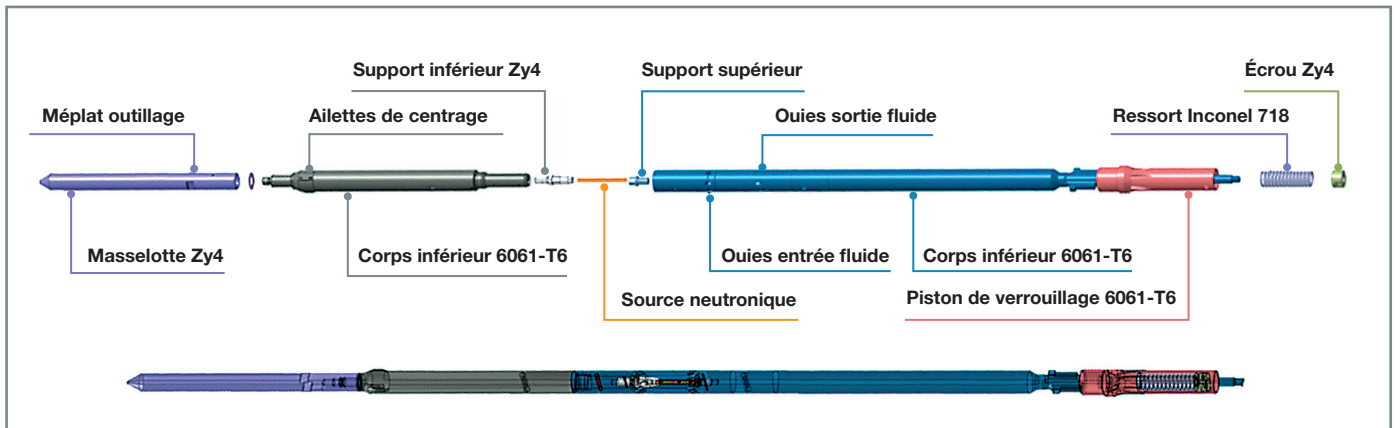


Fig. 226. Aperçu CAO du dispositif SND.

directement les fonctions devant être remplies par le dispositif, comme :

- Limiter la surchauffe des composants ;
- participer aux performances neutroniques ;
- garantir la tenue des liaisons mécaniques.

L'ensemble de ces fonctions impliquent un choix de matériau spécifique. L'un des matériaux retenus est l'alliage d'aluminium 6061-T6, dont on trouve, dans les annexes du code, les données concernant sa tenue mécanique par rapport à sa durée d'exposition au flux neutronique. Ces données répertoriées dans le RCC-MRx sont issues de campagnes d'essai menées dans les précédents réacteurs de recherche du CEA, OSIRIS et ORPHÉE.

### Dimensionnement

Dès qu'une première conception émerge, une phase de dimensionnement est nécessaire pour analyser le comporte-

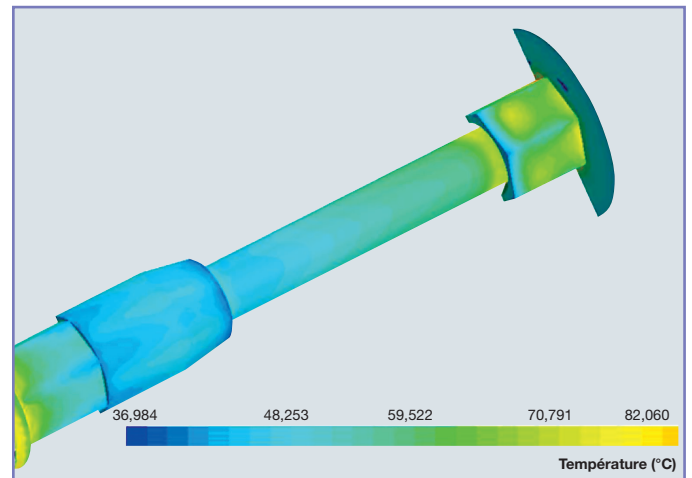


Fig. 228. Température parois mouillées de la source neutronique [10].

ment neutronique, thermohydraulique et thermomécanique du dispositif SND (voir fig. 227, fig. 228 et fig. 229). Il s'agit d'un processus itératif devant valider la conception et le respect des exigences du code RCC-MRx.

Une fois le dimensionnement validé, une maquette est réalisée pour mener divers essais (manipulation en cellule, comportement hydraulique, usure, endurance...) dans les conditions les plus réalistes possibles, afin de valider le passage en réalisation du dispositif final. Ci-dessous est présenté un aperçu (voir fig. 230) d'une boucle hydraulique d'essais permettant l'expérimentation des dispositifs dans des conditions représentatives du RJH.

### Réalisation

Le processus de fabrication d'un dispositif, que ce soit pour le dispositif SND ou pour les autres, est associé à de nombreuses exigences issues du code RCC-MRx. Ces exigences sont notamment définies pour :

- La qualité des matériaux devant faire l'objet d'un procès-verbal d'analyse avant toute opération ;

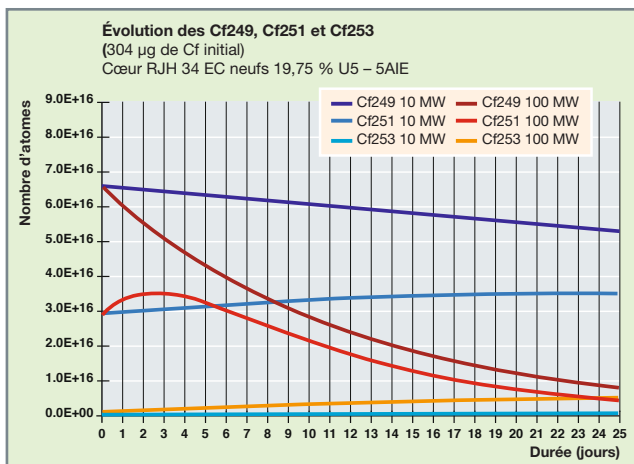


Fig. 227. Évolution de la composition isotopique de la source neutronique [9].

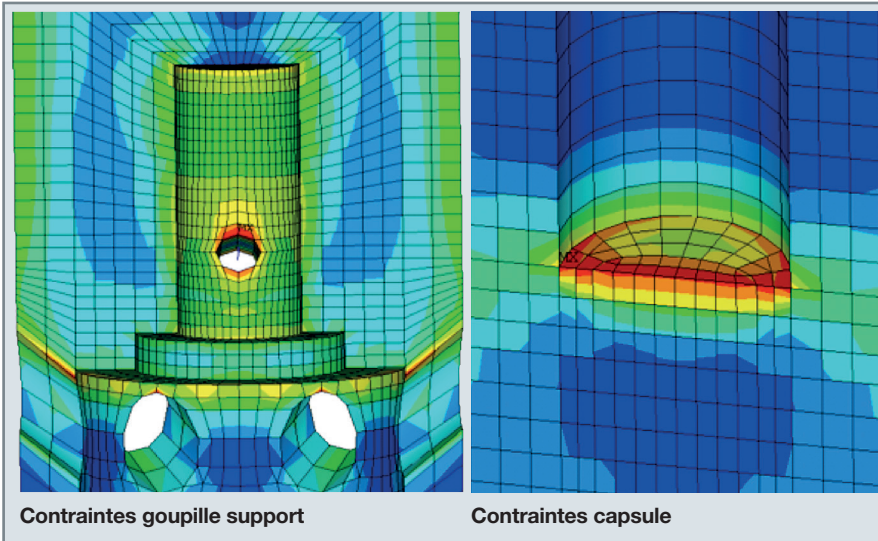


Fig. 229. Aperçu de calculs thermomécaniques et des contraintes résultantes [10].

- l'ensemble des procédures de fabrication des sous-traitants qui doivent être présentées de manière exhaustive et être validées avant le début des opérations ;
- le matériel utilisé pour la fabrication qui ne doit pas, de par sa constitution chimique ou sa propreté, altérer les surfaces internes ou externes de l'ensemble de la réalisation

lors de la fabrication, du montage, du contrôle, des tests, des essais, du stockage et de l'emballage ;

- la mise en propreté (dégraissage, décapage, passivation) ;
- le niveau de qualité des soudures ;
- les contrôles non destructifs (visuel, ressuage...).

La réalisation d'une maquette en amont du dispositif permet, en complément de la qualification du dimensionnement (voir paragraphe « Conception » ci-avant), de dérisquer l'ensemble des étapes de réalisation détaillé ci-dessus (voir fig. 231).

## Conclusions

Les codes (au sens de recueils de référentiels) ou les normes ont pour objectif de standardiser les pratiques et d'assurer la qualité des réalisations. Ils se nourrissent du retour d'expérience des projets, parfois orientés recherche et développement, pour évoluer. Le projet RJH et son impact dans l'éla-

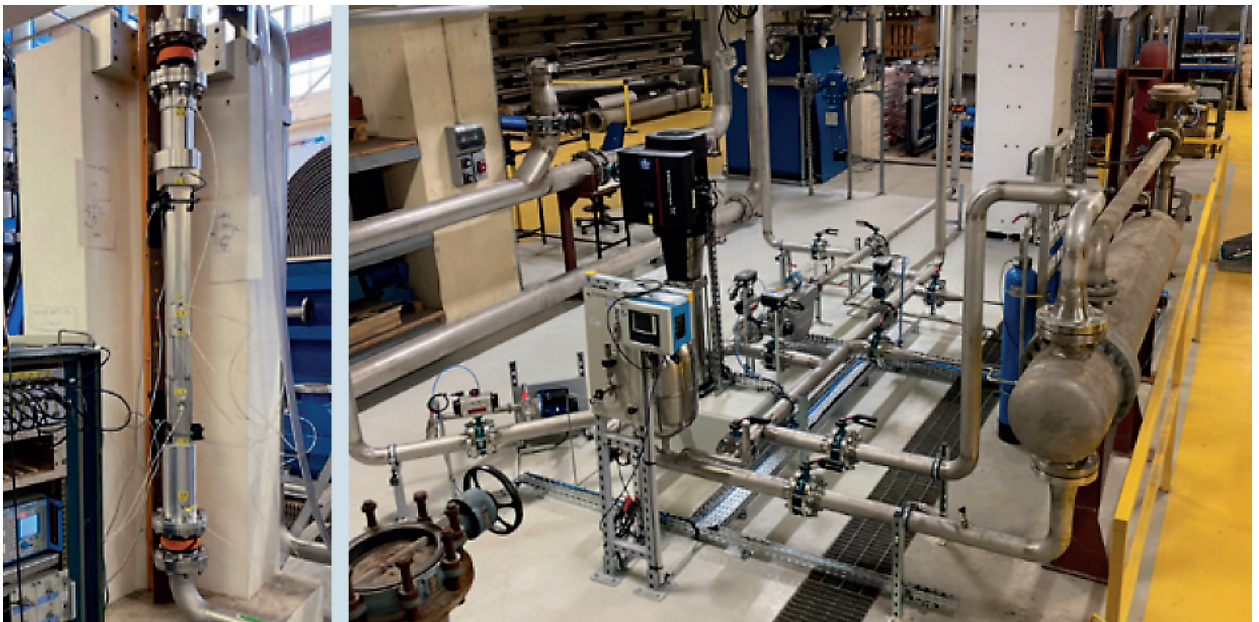


Fig. 230. Aperçu d'une boucle hydraulique permettant de qualifier des dispositifs dans les conditions du cœur RJH.



Fig. 231. Maquette de dispositif destinée à RJH.



laboration du code RCC-MRx sont un très bon exemple. Ce code intervient dans les phases de conception, dimensionnement et réalisation en définissant l'ensemble des exigences à satisfaire jusqu'à l'obtention du système final. L'application au dispositif contenant la source neutronique de démarrage du RJH illustre bien ce fonctionnement.

**Cécile PETESCH et Paul MANDIN,**

*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*

### ► Références

[1] RCC-M édition 2018, *Règles de conception et de construction des matériels mécaniques des îlots nucléaires REP*, AFCEN, 2018.

[2] RCC-MRx édition 2018, *Règles de conception et de construction des matériels mécaniques des installations nucléaires hautes températures, expérimentales et de fusion*, AFCEN, 2018.

[3] R. NOEL, R.-L. ROCHE, J.-L. PICOU, F. VOUILLOUX and B. DRUBAY, "Status of the French Design and Construction Rules Applicable to Fast Breeder Reactors", SMIRT 6, ES/2, Paris, August 17-21, 1981.

[4] R. NOEL, "The New Code RCC-MR. Rules for Design and Construction of LMFBR Components", *Nuclear Engineering and Design*, 98, pp. 297-303, 1987.

[5] G. SANNAZZARO, V. BARABASH, "ITER C&S for Design and Construction", AFCEN conference, 24-26 March 2015.

[6] RCC-MX, *Règles de conception et de construction des matériels mécaniques des réacteurs expérimentaux, de leurs auxiliaires et des dispositifs d'irradiation*, CEA, édition 2008.

[7] RCC-MR, *Règles de conception et de construction des matériels mécaniques des installations nucléaire*, AFCEN, édition 2007.

[8] RCC-MRx édition 2012, *Règles de conception et de construction des matériels mécaniques des installations nucléaires hautes températures, expérimentales et de fusion*, AFCEN, 2012.

[9] Note neutronique, *Cœur RJH échauffements nucléaires et flux neutroniques dans le mandrin porte-source californium sans écran neutronique*, CEA/DEN/CAD/DER/SRJH, DO 239, 2014.

[10] Note thermomécanique SND, *Mandrin porte-source californium – Note de dimensionnement*, note PRINCIPIA 1\_2.001, Rév.05.



# Pôles de compétences : l'assistance réglementaire – contexte, généralités, fonctions pôles et exemple du pôle ESP

## Les pôles de compétences au CEA

Le CEA, pour assurer l'existence et l'amélioration des compétences en sûreté, a mis en place et développé un réseau de pôles de compétences mis à la disposition de ses unités [1]. Cette organisation répond à un triple objectif :

- Fournir une assistance de spécialistes, dans différents domaines techniques, aux chefs d'installation et chefs de projets en vue de mener à bien certaines études de sûreté complexes ;
- capitaliser au sein du CEA l'expérience acquise lors de la réalisation d'études de sûreté afin d'assurer le maintien et le développement de son savoir-faire et de son autonomie technique ;
- améliorer la cohérence des positions de sûreté défendues par les différentes installations et assurer leur conformité avec la doctrine de sûreté et la stratégie du CEA.

Parmi les vingt pôles, le Service d'Études Mécaniques et Thermiques abrite ceux concernant les équipements sous pression (ESP), la mécanique des structures et l'intégrité sismique.

## Focus sur le Pôle de Compétences équipements sous pression/ équipements sous pression nucléaires

Les équipements sous pression (ESP) présentent un potentiel de danger du fait de l'énergie considérable susceptible d'y être stockée sous forme pneumatique. Ce danger est d'autant plus important que le fluide contenu sous pression est lui-même dangereux (inflammable, toxique, à haute température...).

La réglementation des équipements sous pression concerne une très grande variété d'équipements, que ce soit des produits de grande consommation (autocuiseurs, percolateurs, chaudières, vases d'expansion, réservoirs de compresseurs d'air, climatisations, extincteurs...) ou des équipements chez les industriels (réservoirs, échangeurs, sphères de stockage de GPL, raffineries pétrolières, installations de l'industrie chimique...). Au CEA, les installations utilisent des équipe-

ments standards (systèmes frigorifiques, réservoirs d'air comprimé, réservoirs d'azote liquide...), mais aussi des équipements spécifiquement conçus pour les dispositifs expérimentaux (boucles thermohydrauliques d'essais en conditions de pression et température représentatives du circuit primaire des réacteurs électrogènes...). Les INB du CEA utilisent également des équipements sous pression nucléaires qui confinent des liquides ou des gaz radioactifs (équipements des installations de traitement des effluents, réacteurs nucléaires expérimentaux...).

Les équipements sous pression, conventionnels (ESP) ou nucléaires (ESPN), sont soumis pour leur conception, leur construction et leur exploitation à des textes réglementaires. La directive européenne 2014/68/UE [2] définit les exigences qui s'appliquent au fabricant d'un équipement sous pression afin qu'il puisse procéder au marquage CE sur son équipement. Ce marquage atteste de la conformité à cette directive ; il est obligatoire pour la mise sur le marché européen. La directive est transposée en droit français dans le chapitre R.557 du Code de l'environnement [3]. La directive définit des exigences essentielles de sécurité.

Les moyens concrets de remplir ces exigences sont détaillés dans des normes européennes harmonisées non obligatoires (NF EN 13445 pour les récipients non soumis à la flamme, NF EN 13480 pour les tuyauteries industrielles mécaniques...), qui donnent présomption de conformité aux exigences essentielles. Le fabricant peut aussi avoir recours à des codes de construction reconnus (RCC-M, RCC-MR, RCC-MRx pour le nucléaire, CODAP, CODETI pour le conventionnel) moyennant quelques justifications complémentaires relatives au respect des exigences essentielles.

L'arrêté du 20 novembre 2017 [4] définit les exigences de contrôle qui s'appliquent à l'exploitant d'un équipement Sous Pression en service en France.

L'arrêté du 30 décembre 2015 [5] définit les exigences pour la fabrication et pour l'exploitation des équipements sous pression nucléaires en France.

Le Pôle de Compétences propose la définition et la mise œuvre des actions requises par la réglementation, en collaboration avec la Direction de la sécurité et de la sûreté nucléaire (DSSN).

Il apporte son soutien aux unités du CEA pour l'application de la réglementation, via des référents de centre et réalise des formations à la réglementation pour les utilisateurs au CEA. Il assure une veille réglementaire et capitalise au sein du CEA l'expérience acquise en matière d'équipements sous pression conventionnels et nucléaires [6].

Les équipements sous pression conventionnels et nucléaires doivent être achetés conformes à la réglementation, avoir une documentation complète, être maintenus en bon état, être à jour de leurs contrôles réglementaires. Ceci nécessite de la part des unités du CEA un effort continu et une connaissance de la réglementation applicable à leurs équipements, sur laquelle elles peuvent trouver un support auprès des référents de centre et du Pôle de Compétences.

Afin d'être à jour et de contribuer aux évolutions de la réglementation et de ses modalités d'application, le Pôle de Compétences assure avec la DSSN, la représentation du CEA dans différentes instances [7] :

- La Sous-Commission pour les appareils à pression (SCPAP), comité d'experts auprès du ministère en charge de la sécurité industrielle ;
- le Comité de liaison des appareils à pression (CLAP) pour l'interprétation de la directive européenne ;
- l'APITI, association loi 1901, qui regroupe des exploitants d'ESP, pour les modalités d'application de la réglementation du suivi en service des ESP ;
- le Comité de liaison des ESPN (COLEN), pour l'interprétation de l'arrêté ESPN ;
- les groupes de travail inter-exploitants dans le cadre de l'Association française pour les règles de conception, de construction et de surveillance en exploitation des chaudières électro-nucléaires (AFCEN), pour les sujets sur la réglementation ESPN ;
- les groupes de travail constitués par l'ASN.

Les évolutions récentes de la réglementation du suivi en service des équipements sous pression ont conduit à la mise à jour de 19 guides et cahiers techniques professionnels (CTP), spécialisés pour le suivi en service des équipements sous pression des différents secteurs industriels (par exemple, le guide DT84 pour les industries pétrolières) ou pour le suivi en service de familles d'équipements particuliers (par exemple, le CTP pour les systèmes frigorifiques, qui définit des règles de suivi en service adaptées afin de limiter les pertes de fluides frigorigènes, qui sont des gaz à effet de serre). Ces évolutions de la réglementation nécessitent une adaptation de la part des unités du CEA. Par exemple, pour

les systèmes frigorifiques, à partir du 1<sup>er</sup> janvier 2021, un document supplémentaire est nécessaire pour chaque système, pour pouvoir appliquer les règles aménagées de suivi en service. Cela représente environ 1 000 systèmes frigorifiques pour le CEA civil.

Le CEA exploite peu d'équipements sous pression nucléaires aujourd'hui, au regard des équipements sous pression présents sur les centres ; cependant, leur nombre va augmenter avec la mise en service du réacteur nucléaire expérimental Jules Horowitz sur le centre de Cadarache. L'application de la réglementation ESPN à la construction de l'EPR (EDF) et du RJH (CEA) engendre des besoins de clarification réglementaire. C'est pour cette raison que le CEA participe à des groupes de travail avec les autres exploitants nucléaires et l'ASN pour une bonne compréhension et application de la réglementation dans ses installations.

Pour les cas de requalification périodique d'équipements sous pression nucléaires, à la fois peu nombreux au CEA, mais nécessitant l'application de règles précises, les installations sollicitent le support du Pôle de Compétences. Celui-ci aide les installations à clarifier les modalités d'application en accord avec l'organisme habilité qui réalise le contrôle et les opérations particulières à réaliser. On citera à titre d'exemple :

- La requalification des échangeurs de la station de traitement des effluents liquides du CEA/Saclay qui a nécessité le décalorifugeage total de ces récipients et la définition de nouvelles procédures de manutention ;
- la requalification des équipements sous pression nucléaires de la colonne de détritiation du réacteur ORPHÉE qui a nécessité le reclassement de vannes du circuit d'hélium gazeux en isolement sûr afin de justifier le classement ESP de la soupape qui protègent ces équipements.

Enfin, la R&D au CEA nécessite la construction d'installations expérimentales très spécifiques pour lesquelles l'application de la réglementation peut apporter des difficultés qui nécessitent le soutien du Pôle de Compétences :

- L'évaluation de conformité de nouveaux équipements sous pression nucléaires à la réglementation ESPN peut poser des difficultés entraînant délais et coûts supplémentaires. Par exemple, l'évaluation de conformité du caisson du réacteur RJH en alliage d'aluminium, matériau non usuel pour les parties principales sous pression d'un équipement sous pression nucléaire, a nécessité que le Pôle de Compétences contribue aux échanges entre le fabricant et l'organisme chargé de l'évaluation de la conformité (voir fig. 232).



Fig. 232. Bloc pile du RJH, avant sa mise en place sur le circuit primaire du réacteur.

- L'application de la directive européenne peut être difficile sur certains équipements très spéciaux. Par exemple, l'enceinte MUSE est une enceinte de 70 l destinée à fonctionner aux conditions du circuit primaire des réacteurs électrogènes actuels pour faire des essais d'usure de pièces métalliques. Cette enceinte répond à la définition de générateur de vapeur de la directive européenne et doit répondre aux exigences de certaines normes pour les chaudières, alors que ce n'est pas une chaudière classique (voir fig. 233).
- Les contraintes d'exploitation dans les INB peuvent conduire à considérer l'équipement comme un « consommable » plutôt que de réaliser les contrôles réglementaires. C'est le cas des bouteillons sécurisés de l'installation nucléaire de base ATALANTE au CEA Marcoule qui permettent de transporter les liquides radioactifs entre cellules blindées (voir fig. 234). Ces bouteillons ne sont pas inspectables intérieurement, alors que c'est un geste obligatoire tous les 40 mois selon la réglementation ESPN.
- Les délais de construction d'une installation expérimentale peuvent être suffisamment longs pour que les premières échéances de contrôles réglementaires des ESP arrivent alors que l'installation commence tout juste à fonctionner. À titre d'illustration, le délai maximal de requalification périodique des équipements sous pression de l'usine de production d'hélium superfluide est arrivé à échéance au moment où l'installation ISEULT devait produire la première image de l'IRM 11,7 Tesla. Le Pôle de Compétences a

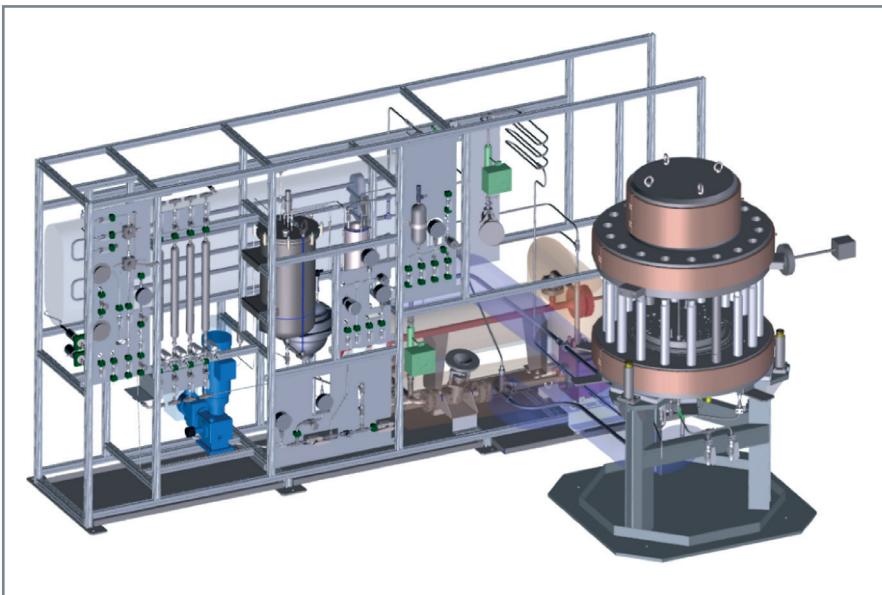


Fig. 233. Dispositif expérimental MUSE (image CAO) avec, au premier plan, l'enceinte MUSE et, au second plan, le skid pour préparer l'eau, pour qu'elle soit dans les conditions (qualité, pression, température) du circuit primaire d'un réacteur électrogène actuel quand on l'injecte dans l'enceinte MUSE.



Fig. 234. Bouteillon sécurisé de l'installation ATALANTE.





Fig. 235. Réservoirs d'hélium gazeux de 50 m<sup>3</sup> de l'installation NEUROSPIN.

concouru à l'obtention d'un aménagement aux règles de suivi en service ESP pour la dispense de visite intérieure des réservoirs d'hélium gazeux de 50 m<sup>3</sup> (voir fig. 235) : il ne fallait pas ouvrir ces réservoirs alors que l'aimant était à une température proche du zéro absolu et que l'introduction d'humidité dans les circuits risquait de provoquer l'apparition de glaçons et des dommages irréparables.

En conclusion, le Pôle de Compétences équipements sous pression s'investit tant dans les instances à l'extérieur qu'au sein du CEA en support aux installations et projets. Plus généralement, les pôles de compétences jouent un rôle important en soutien aux installations du CEA dans différents domaines en lien avec la sûreté nucléaire.

**Hélène SIMON et Denis HYVERT,**

*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*

#### ► Références

- [1] RSSN NUC-00-06 (I), Missions et fonctionnement des pôles de compétences en sûreté et du pôle d'expertise en radioprotection, 2023.
- [2] Directive européenne n° 2014/68/UE du 15 mai 2014 relative à l'harmonisation des législations des États membres concernant la mise à disposition sur le marché des équipements sous pression (refonte).
- [3] R.557 : partie réglementaire du Code de l'environnement relative aux produits et équipements à risques.
- [4] Arrêté du 20 novembre 2017 relatif au suivi en service des équipements sous pression et des récipients à pression simples.
- [5] Arrêté du 30 décembre 2015 relatif aux équipements sous pression nucléaires et à certains accessoires de sécurité destinés à leur protection.
- [6] RSSN NUC-94-01 (I) : Organisation du CEA en matière de prévention des risques liés aux équipements sous pression (ESP) et aux équipements sous pression nucléaires (ESPN), 2021.
- [7] RSSN NUC-94-65 (A) : Activités du Pôle de Compétences ESP/ESPN, 2021.



## Les nouveaux défis technologiques : l'exemple du génie civil pour les structures mixtes et les constructions modulaires

L'émérgence de nouveaux concepts de réacteurs (réacteurs de quatrième génération, SMR, AMR...) conduit à s'interroger sur de nouveaux défis technologiques (nouveaux matériaux, nouvelles techniques de fabrication ou de construction...) à relever en s'appuyant, autant que possible, sur l'expérience déjà acquise. Ce chapitre illustre la problématique et la démarche adoptée dans le cadre du génie civil et plus particulièrement de l'utilisation de structures mixtes acier-béton pour améliorer l'efficacité de la construction (construction modulaire).

Depuis les années 2010, l'émérgence de concepts de réacteurs de type SMR (*small modular reactor*) redynamise les approches de constructibilité des centrales nucléaires. Ces SMR de faible/moyenne puissance (< 500 MWe et plutôt entre 50 et 200 MWe) fondent leur modèle économique sur les paramètres suivants :

- L'effet de taille doit permettre plus de modularisation et pousser vers un maximum de fabrication en usine ;
- l'effet de simplification de design doit être recherché dans tous les domaines (dont le génie civil) ;
- l'effet de série doit conduire à des réductions significatives des délais et des coûts de construction ;
- la puissance réduite ouvre vers des marchés spécifiques (niches géographiques, applications non électrogènes, concepts de cogénération électrogène/calogène). Ils proposent une solution pour décarboner rapidement les industries énergivores.

Ce contexte a favorisé la promotion de deux approches du génie civil souvent combinées : la modularité et les structures mixtes, dans le but d'optimiser les préfabriations en usine.

### La modularité

Pour un SMR la modularité peut se traduire par l'association sur un même site de plusieurs tranches de petite puissance qui fonctionneront avec un degré plus ou moins avancé de mutualisation de fonctions (manutention, services annexes, système de conversion d'énergie, systèmes auxiliaires). Tou-

tefois, dans ce terme, il faut aussi englober par extension tous les efforts de conception d'un réacteur pour favoriser les aspects de préfabrication en usine et de montage final des blocs sur site. Généralement la limitation de puissance favorise l'approche modulaire et la préfabrication, mais cette approche a déjà été l'un des arguments majeurs de l'innovation des AP1000 (REP, Westinghouse) dont quatre tranches fonctionnent en Chine depuis 2018. L'analyse des délais de réalisation de ces AP1000 vis-à-vis d'autres réacteurs de puissance équivalente n'a pas permis de montrer des gains de temps significatifs sur ces chantiers. Il ne faut pas pour autant rejeter cette idée de construction modulaire, mais il est clair que ce concept de construction modulaire nécessite un effet de série pour démontrer sa valeur. Enfin, cette stratégie ambitieuse a été appliquée par Westinghouse après une longue période sans construction et des pertes de compétences correspondantes dans l'industrie américaine.

La construction modulaire est une technique qui peut être prometteuse en terme : 1) de gain en qualité de fabrication ; 2) de gain sur les plannings avec la gestion en parallèle des tâches ; 3) d'optimisation du travail sur site. Sa réussite impose néanmoins de respecter des contraintes lourdes à mettre en œuvre : conception quasi finalisée au moment de la construction (d'où l'intérêt de l'effet de série), forte anticipation des approvisionnements et logistique lourde (voir fig. 236). En conséquence, pour optimiser l'emploi de la modularité il convient :

- D'analyser au cas par cas le degré de modularisation : application extensive ou uniquement génie civil (voir partie suivante sur les structures mixtes) afin d'en optimiser le gain ;
- de limiter la taille et le poids des modules ;
- d'intégrer les contraintes de la modularisation (tolérances, qualité, aptitude à la fabrication) dans la conception ; et
- enfin de développer et pérenniser les compétences requises pour ce nouveau type de construction.



Fig. 236. Transfert de module (photo de gauche) et bétonnage sur site (photo de droite) d'un module de l'AP1000 (<https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Largest-module-in-place-at-second-Vogtle-AP1000>).

## Les structures mixtes

Les exigences de sécurité plus strictes pour les travaux de génie civil des futurs bâtiments nucléaires, combinées à des charges de conception sévères, conduisent à une augmentation continue de la demande de barres d'acier dans les structures en béton armé. Une des possibles réponses du génie civil nucléaire est de recourir aux structures en acier-béton (structures mixtes ou *steel concrete* – SC) lorsque des ratios importants d'armature en acier sont anticipés à la conception.

Une structure SC est composée de deux plaques d'acier de parement, avec des goujons pour assurer la liaison avec le béton, et des barres d'acier reliant les deux plaques d'acier (voir fig. 237). Le béton est coulé à l'intérieur du module préfabriqué en acier sans barres supplémentaires (voir fig. 238). Ces modules en acier peuvent aussi remplacer les pièces d'encastrement pour des charges modérées (100 000 plaques

pour les récents projets de réacteurs nucléaires) et aussi apporter un confinement (liquide ou gaz).

Un avantage visé est un gain sur le calendrier de construction. Les modules en acier sont préfabriqués et les opérations de construction *in situ* sont limitées au raccordement des modules en acier et au bétonnage de remplissage.

### Description des éléments d'une structure mixte

L'épaisseur des plaques en acier varie de 6 mm à 20 mm pour les éléments fortement chargés. Ils ont deux fonctions principales : 1) servir de coffrage pour la phase de bétonnage ; 2) remplacer les barres d'armature pour résister aux forces de traction. Les tirants sont conçus dès la phase de bétonnage (voir fig. 239) comme tirants de coffrage classiques pour résister à la pression du béton liquide. Après mise en place sur chantier et assemblage par soudage des

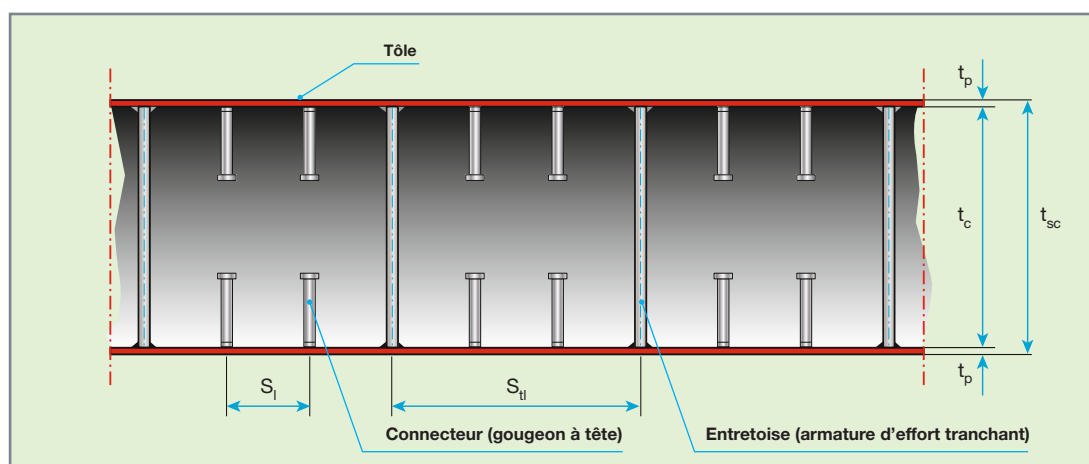


Fig. 237. Section d'un module en acier de structure mixte.

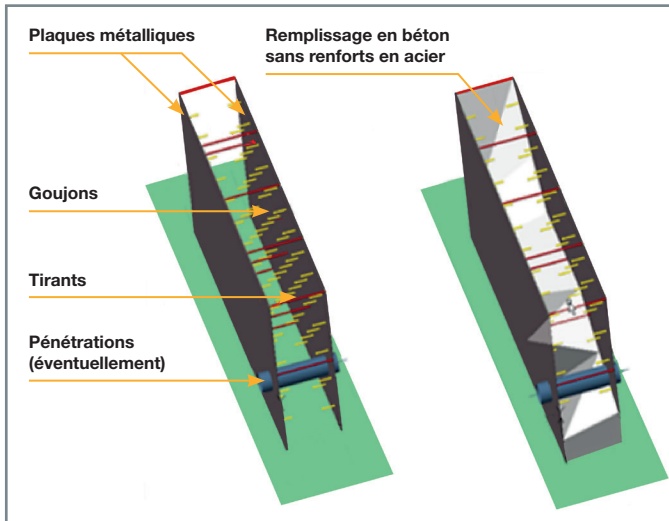


Fig. 238. La structure mixte avant et pendant son remplissage.

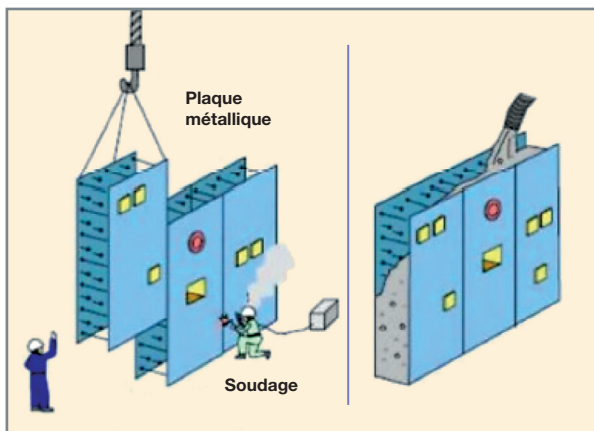


Fig. 239. Placement et assemblage des modules.

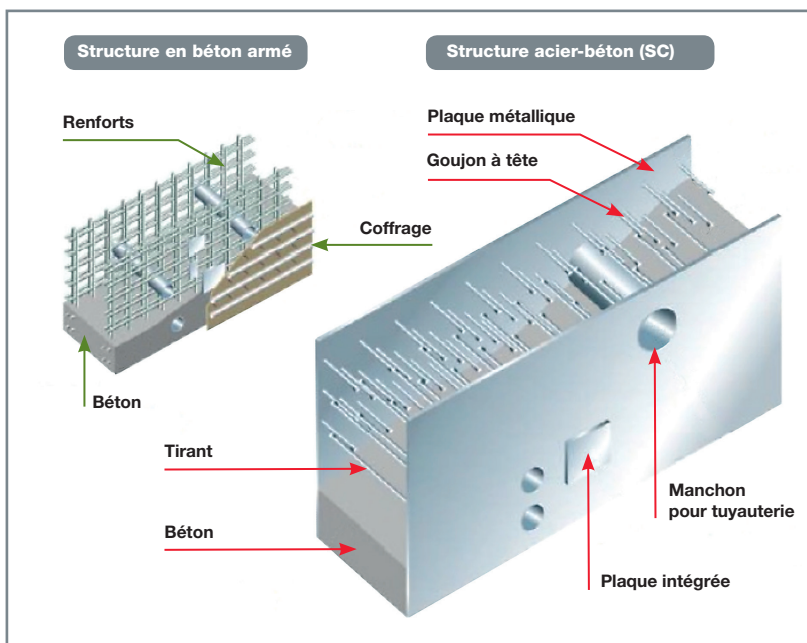


Fig. 240. Comparaison entre béton armé et steel concrete (SC).

différentes pièces d'acier, un remplissage en béton sans armature est coulé entre les deux tôles d'acier.

Les goujons d'ancrage sur les faces intérieures des plaques doivent assurer des déformations identiques de l'acier et du béton, permettant le transfert des efforts de traction appliqués aux plaques d'acier. Ces goujons empêchent également le flambage des plaques d'acier en cas de charge thermique (feu, rupture des conduites d'eau vapeur). Les supports peuvent être directement fixés (soudés) sur la plaque d'acier ou à travers une plaque d'acier de base soudée sur la plaque d'acier SC (voir fig. 240). Les goujons ou tirants agissent comme des goujons d'ancrage de la plaque d'acier ancrée classique dans le béton armé. Ce type d'éléments structurels permet également de connecter différents murs ainsi que des murs avec dalle.

L'assemblage et le raccordement entre les modules élémentaires en acier sont généralement réalisés par soudage, mais d'autres types de raccords (boulonnés) peuvent être étudiés pour un gain de coût et de temps sur des opérations de soudage sur site complexes et chronophages. Le raccordement à souder est cependant obligatoire en cas de critère d'étanchéité (gaz ou liquide) requis pour l'élément.

### Les avantages des modules en acier-béton

Deux raisons majeures peuvent conduire au choix des éléments SC dans un projet de centrale nucléaire : 1) leur haute résistance mécanique ; 2) le gain en temps.

1) Lorsqu'un besoin d'une résistance mécanique élevée est requis, la construction traditionnelle en béton armé implique l'installation d'énormes densités de barres d'armature en acier, avec de nombreuses pièces encastrées à placer entre les barres d'armature (voir fig. 241).

Cette situation devient fréquente, car la conception des centrales nucléaires doit faire face à des codes de conception plus stricts et intégrer des charges de conception élevées lors de scénarios d'accidents graves. La conception SC offre une ductilité plus élevée par rapport aux bétons armés. Elle présente aussi l'avantage d'assurer une étanchéité, si requise contre le gaz ou le liquide, alors qu'une structure en béton armé nécessitera un liner acier supplémentaire ou un revêtement spécifique fixé à la structure béton. Elle permet également de fabriquer des modules hybrides (modules structure





Fig. 241. Exemple de congestion d'une structure en béton armé.

et mécanique) de manière à être utilisés comme plaques d'ancrage permanentes pour la fixation de plusieurs équipements (chemins de câbles, tuyaux, machines, pompes, etc.) sur les plaques d'acier.

2) Des gains substantiels sont attendus sur le calendrier de construction en utilisant des modules préfabriqués, réduisant ainsi les travaux sur site. La plupart des tâches pouvant être effectuées en usine, les gains se situent sur la diminution de la main-d'œuvre sur site, un meilleur suivi de la qualité de réalisation et des conditions de travail optimales en usine. La solution SC nécessite toutefois que le projet définisse avec une anticipation adaptée la livraison des données d'entrée, afin de préfabriquer le module pendant le chemin critique de construction.

### Les projets innovants comme catalyseurs du développement des structures steel concrete

Un projet de réacteur de quatrième génération comme le projet ASTRID (2010-2019) a servi de fer de lance aux études d'intégration, de validation et de montée en maturité des systèmes en structures mixtes. Le projet ASTRID a privilégié, dans sa phase de conception, l'utilisation des SC dans des zones du bâtiment réacteur ainsi que dans des bâtiments annexes (voir fig. 242). Cette démarche – en phase avec les approches japonaises des conceptions de futurs réacteurs au sodium (projet JSFR de JAEA) – a permis d'identifier les verrous technologiques et de promouvoir des projets européens de réalisation (voir le projet SCHE-

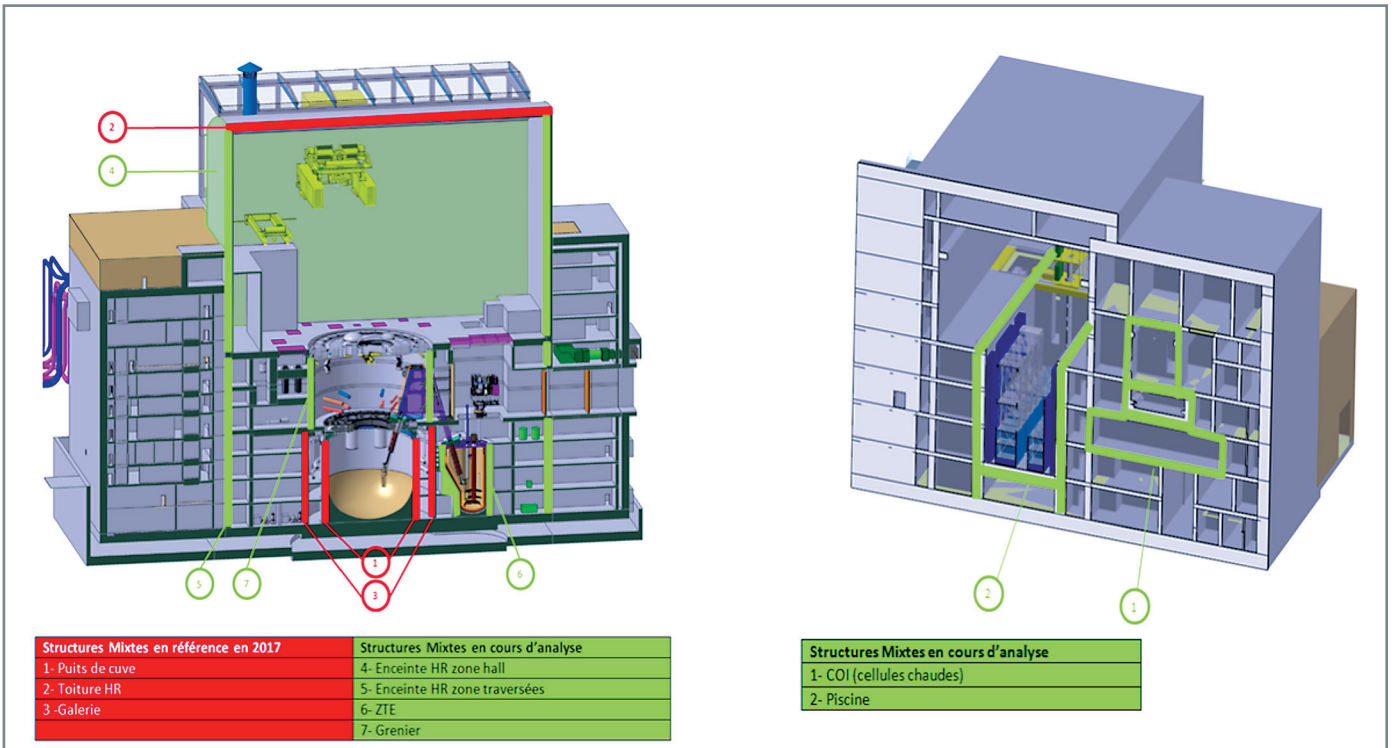


Fig. 242. Emplacement des aires de l'îlot nucléaire où les structures SC ont été étudiées initialement (en rouge) ou étendues (en vert).



## Le projet SCHEDULE

Le projet européen SCHEDULE (*Steel Concrete High Efficient Demonstration eUropean coLaborative Experience*) est un projet de démonstration proposé par huit partenaires et financé en partie par l'Union européenne par le biais du Fonds de recherche pour le charbon et l'acier (RFCS). Il succède au projet SCIENCE (2013 à 2017) qui avait produit un guide préliminaire de conception en structure mixte compatible avec les Eurocodes. SCHEDULE (2018-2022) consiste à concevoir et construire le premier bâtiment nucléaire intégralement en structure mixte en Europe. Le bâtiment pilote proposé est une réplique d'un bâtiment générateur diesel d'ultime secours (DUS) du parc EDF. Les DUS actuels, construits sur la base d'une conception standard en voiles de béton armé banchés et planchers coffrés, fournissant une base documentée permettant de réaliser une comparaison pertinente des deux techniques.

Le bâtiment pilote est entièrement composé d'éléments SC (murs et dalles). Les dalles SC sont composées d'une tôle d'acier inférieure renforcée par des poutres en T d'acier et d'une armature supérieure classique (voir fig. 244). La tôle inférieure en acier sert de coffrage pendant la phase de bétonnage. Les modules sont dimensionnés pour être transportables par voie routière et assemblés sur site par l'intermédiaire de barres d'accouplage et par boulonnage. Une partie du bâtiment est réalisée avec des modules en acier inoxydable, assemblés par soudage, et des planches à double peau.

L'objectif principal de ce projet est d'acquérir une expérience de la construction et de percevoir les difficultés dans la fabrication des modules élémentaires SC et dans l'assemblage de ces modules. En particulier, les objectifs sont de :

- Quantifier l'impact économique de la construction SC par rapport à la construction en béton armé ;
- quantifier le planning de construction (l'objectif à terme est de diviser par deux la durée de construction) ;
- fournir des commentaires sur la construction SC (y compris également l'ingénierie) et le contrôle de la qualité à travers un processus d'apprentissage progressif ;
- extraire des leçons génériques pour la construction SC qui vont bien au-delà du secteur de la production d'énergie nucléaire.

Le bâtiment pilote a été construit dans le courant de l'année 2022 sur le site d'EDF R&D (Les Renardières, France). Le projet a notamment intégré une phase d'ingénierie au cours de laquelle un accent particulier a été mis sur la conception de la connexion entre les modules en acier sur site (soudés, boulonnés) qui est l'une des tâches de construction les plus critiques.

Les partenaires de ce projet sont le Steel Construction Institute (UK), Électricité de France (France), le CEA (France), Egis Indus-

### Conception et réalisation d'un bâtiment prototype en SM : réplique d'un « DUS » (bâtiment diesel « post Fukushima » du parc REP EDF)



#### Dimensions générales

- 15 m de large
- 25 m de long
- 15 m de haut

#### Nomenclatures générales

- Goujons : 75 000 unités
- Béton : 1000 m<sup>3</sup>
- 350 tonnes de plaques métalliques de 8 mm d'épaisseur
- 3250 barres filetées, Ø 20 mm, longueur 500 mm
- 52 000 écrous, Ø 20 mm, 52 000 rondelles Ø 20 mm
- 6800 barres filetées, Ø 30 mm, longueur 1000 mm
- 27 200 écrous M30, 27 200 rondelles Ø 30 mm



Schedule est un projet qui a reçu un accord de financement avec l'Union Européenne par le fonds RFCS sous référence du grant agreement n° 800732

Fig. 243. Vue 3D et données du bâtiment pilote DUS.

trie (ingénierie française), Bouygues Travaux Publics (entreprise française de travaux publics), PEIKKO LI (Lituanie, modules en acier industriel), Industeel (filiale d'ArcelorMittal, France, producteur de tôles d'acier), OCAS (filiale d'ArcelorMittal, Belgique, centre de recherche sur l'acier et les revêtements). Orano (France) et ENRESA (Espagne) sont sponsors du projet. La construction proprement dite du bâtiment pilote est réalisée par Bouygues (préparation du chantier, manutention/pose/raccordement des modules en acier, bétonnage), la fabrication des modules élémentaires en acier en Lituanie et leur livraison sur chantier par PEIKKO. Le CEA, deuxième co-financier du projet, est en outre en charge des spécifications techniques et du suivi. L'un des objectifs est d'appliquer dans ce bâtiment une conception spécifique adaptée aux besoins du CEA en termes de projets de construction d'INB, en particulier pour les problématiques telles que les liners de piscines, les cellules chaudes, les structures résistant aux chutes de charges et aux impacts d'avions, ou les supportages d'équipements.

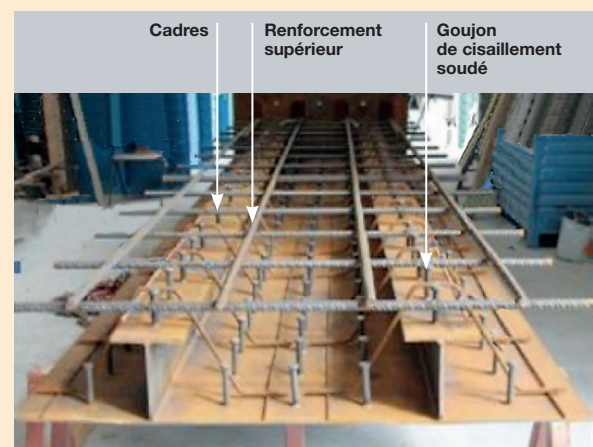


Fig. 244. Élément en structure mixte (avant son bétonnage).

DULE en encart). C'est aussi un moyen d'analyser la mise en application concrète et le besoin d'ajustement des Euro-codes de conception et de construction existants (RCC-CW de l'AFCEN).

**Gilles RODRIGUEZ,**

*Département d'Études des Réacteurs*

**et Eric PHILIP,**

*Direction de l'ingénierie et de la maîtrise d'œuvre des projets*

#### ► Bibliographie

SAUNIER (P.) *et al.*, "Steel concrete modules in design of generation IV nuclear power plant buildings", ICAPP 2018, International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, Charlotte USA, NC, April 8-11, 2018.

YAMAMOTO (T.) *et al.*, "Design evaluation method of steel-plate reinforced concrete structure containment vessel for Sodium-Cooled Fast Reactor", *Journal of Disaster Research*, 7(5), 645-655, Publi JAEA, October 2012.

ARIBERT (J.-M.), Construction mixte acier-béton, *Techniques de l'ingénieur*, C2560 V3, août 2021.

# De la conception à la réalisation en passant par la simulation, l'expérimentation et l'usage des codes : l'exemple de la fusion

## Introduction

Dans ce second chapitre illustrant des applications concrètes de la mécanique des structures à la conception, nous nous proposons de nous éloigner des différentes solutions de réacteurs de fission nucléaire, pour prendre en exemple le cadre de la fusion thermonucléaire (voir focus ci-contre) qui constitue aussi un candidat de choix pour une décarbonation de l'énergie.

## Les projets autour de la fusion

Alors que JET vient de réaliser ses dernières expériences, deux projets occupent le devant de la scène en Europe : ITER et DEMO. D'autres projets joueront également un rôle essentiel dans le programme de développement de la fusion nucléaire, on peut citer le tokamak WEST (anciennement Tore Supra), visant à étudier le comportement du divertor (partie du tokamak servant à extraire les produits de réaction), et la source de neutrons IFMIF-DONES (*International Fusion Materials Irradiation Facility – Demo Oriented Neutron Source*), qui aura pour objectif d'étudier l'effet de l'irradiation aux neutrons sur les matériaux propres à la fusion nucléaire.

### Le projet ITER [1]

ITER est un projet international de réacteur expérimental à fusion thermonucléaire financé par l'Union européenne, la Chine, l'Inde, le Japon, la Russie, la Corée du Sud et les États-Unis. En cours de construction depuis 2013 à Cadarache, il sera le plus grand réacteur à fusion du monde. Les objectifs d'ITER sont de démontrer la possibilité de produire dix fois plus d'énergie que l'énergie thermique absorbée par le plasma, de tester certains composants nécessaires au fonctionnement des futurs réacteurs de puissance, de démontrer la possibilité de produire du tritium et de garantir la sûreté d'une telle installation.

Le retour d'expérience apporté par ITER est une source d'évolution du code. Ce projet porte de multiples références normatives propres liées à la technologie disruptive de la fusion contrôlée et est illustré en figure 246.

Compte tenu de l'implantation en France du projet, le RCC-MR 2007 a été choisi préférentiellement pour la chambre à vide, composant important pour la sûreté. Ainsi,

### Focus : Fusion nucléaire

La fusion nucléaire est le processus qui anime le cœur des étoiles : il consiste en la fusion de deux atomes légers (tels que les isotopes de l'hydrogène) en un atome plus lourd (tel que l'hélium). Un des atouts de la réaction de fusion est sa très forte densité énergétique, en effet 1 kilogramme de deutérium + tritium équivaut à 7 300 000 kilogrammes de pétrole, pour 1 700 000 kilogrammes de pétrole pour l'uranium.

Une des façons de reproduire cette réaction sur Terre est de confiner et d'accélérer des noyaux d'atomes de deutérium et de tritium à très haute température (supérieure à 100 millions de degrés Celsius) à l'aide d'aimants supra-conducteurs au sein d'une structure appelée tokamak. La matière ainsi obtenue est à l'état de plasma (gaz ionisé). Sur Terre, le deutérium peut être extrait de l'eau : en effet, chaque litre d'eau contient environ 35 milligrammes de deutérium, en revanche le tritium est beaucoup plus rare, car instable (demi-vie de 12,3 ans) et doit donc être produit en parallèle de la réaction de fusion. Sa production est assurée par la réaction du lithium avec un neutron qui génère du tritium et de l'hélium. Cette réaction a lieu dans un élément principal des tokamaks : la couverture tritigène. Un bilan des réactions nucléaires ayant lieu au sein d'un tokamak est présenté en figure 245.

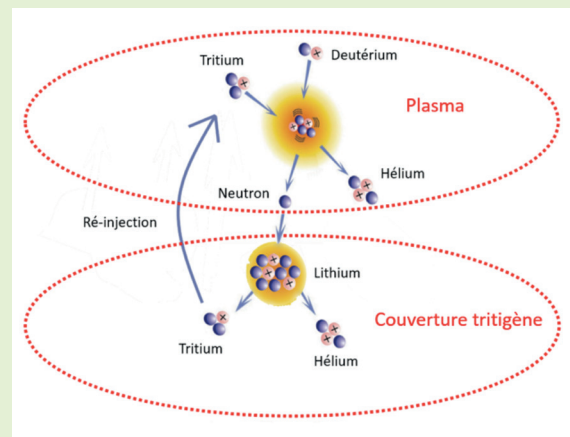


Fig. 245. Bilan des réactions nucléaires ayant lieu au sein d'un tokamak.

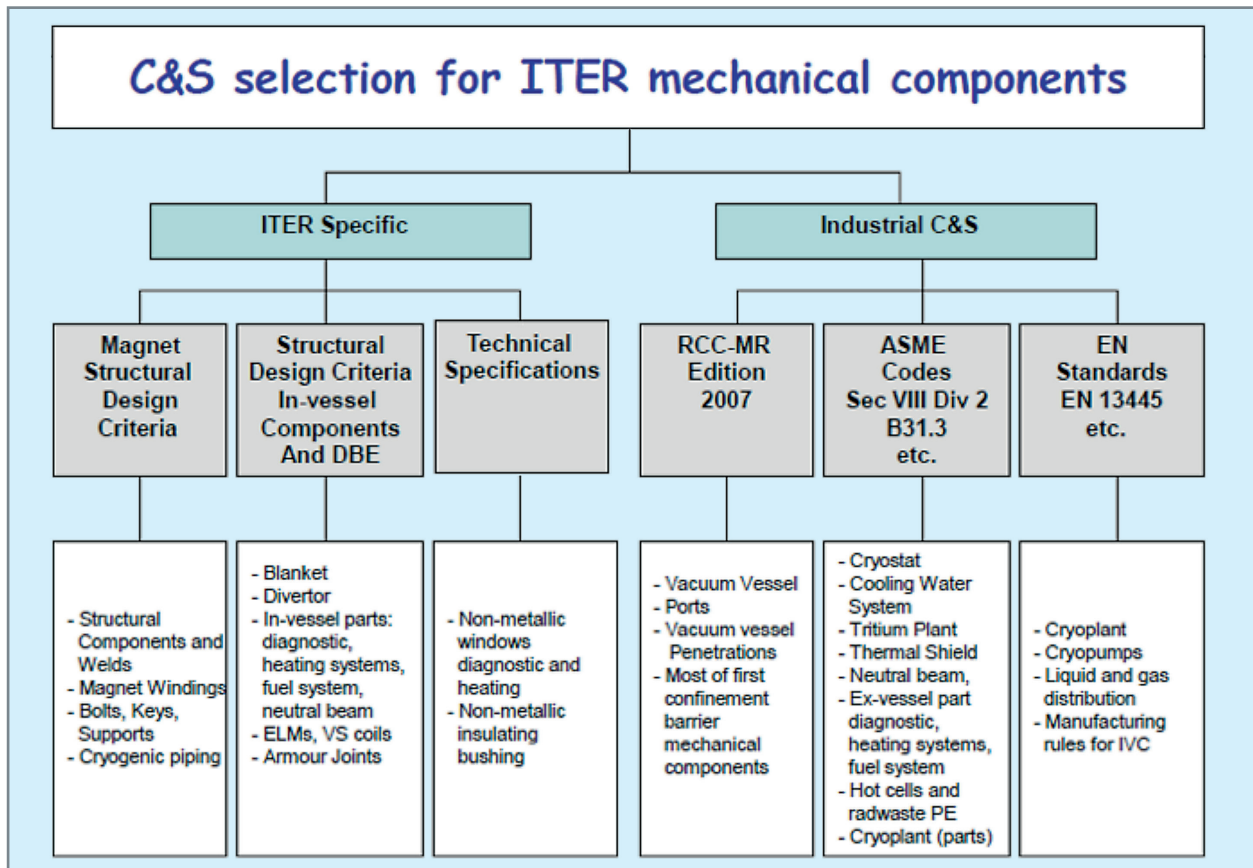


Fig. 246. Ensemble normatif initial d'ITER [2]. C&S : Codes and Standards, BDE : Design Basic Earthquake, ELMs : Edge Localised Modes, VS coils : Vertical Stability Coils, IVC : In-Vessels Coils.

en collaboration avec le projet, une annexe dédiée à la chambre à vide a été développée dans le code et le retour d'expérience, notamment sur la mise en œuvre de l'approvisionnement et de la fabrication de l'acier 316L(N), permet de faire également évoluer le code, ce qui est un exemple fort de sujet transverse fission-fusion. Aujourd'hui, le RCC-MRx est également le code de référence pour de nombreux composants d'ITER (*tests blanket modules* par exemple), et ce grâce notamment à l'introduction de matériaux tels que l'Eurofer ou le CuCrZr qui répondent aux besoins du projet.

### Le projet DEMO [3]

DEMO est un projet européen de réacteur expérimental financé par l'Union européenne, dans la continuité d'ITER. À la différence de ce dernier, le réacteur DEMO visera à démontrer la faisabilité de production d'électricité à partir de l'énergie de fusion. En effet, l'objectif est de produire entre 300 et 500 mégawatts d'électricité tout en étant auto-suffisant en tritium. Il est prévu que les dimensions du réacteur soient plus élevées que celle d'ITER et le début de la

construction est prévu pour la deuxième moitié du  $xxi^e$  siècle. Les principaux objectifs de DEMO sont de :

- Démontrer la faisabilité de produire de l'électricité à partir de réactions de fusion ;
- tester plusieurs concepts de couverture tritigène ;
- tester plusieurs concepts de divertor ;
- tester les opérations de maintenance nécessaires au fonctionnement d'un réacteur de puissance *via* des bras manipulateurs.

À titre de comparaison, la figure 247 présente les caractéristiques du réacteur JET (en fonctionnement au Royaume-Uni depuis 1983), de ITER (fin de construction prévue pour 2030) et de DEMO (fin de construction prévue pour la deuxième moitié du  $xxi^e$  siècle).

Finalement, DEMO est un tokamak de transition entre ITER et un réacteur de puissance.



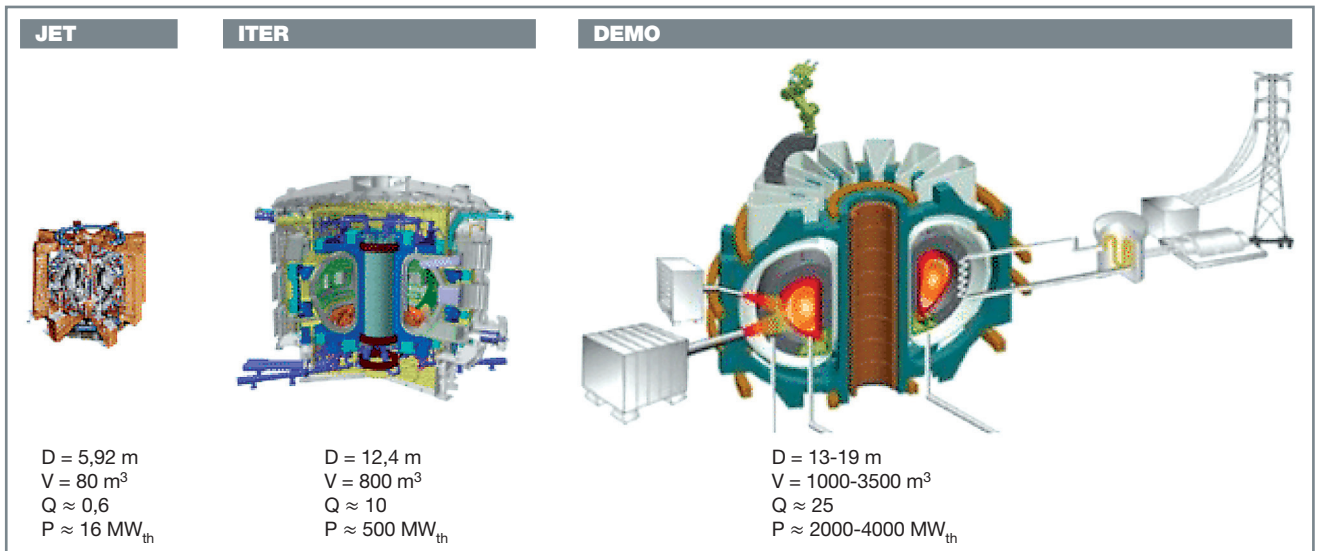


Fig. 247. Comparaison des caractéristiques des réacteurs JET, ITER et DEMO. D : diamètre, V : volume, Q : rapport entre puissance produite et puissance injectée, P : puissance.

## La couverture tritigène

Un des éléments les plus importants d'un réacteur de fusion thermonucléaire électrogène est la couverture tritigène. Ce composant a plusieurs rôles :

- Générer le tritium nécessaire à la réaction de fusion afin d'être auto-suffisant ;
- extraire la puissance provenant du plasma *via* la circulation d'un fluide caloporteur (eau ou hélium par exemple) ;
- protéger les autres éléments (par exemple, les aimants supra-conducteurs) des radiations.

La chaleur extraite sera ensuite acheminée vers un échangeur de chaleur qui permettra de faire tourner une turbine et générer de l'électricité.

Ce composant, de par sa position en face du plasma, est soumis à de fortes sollicitations thermiques, ce qui en fait un composant critique vis-à-vis de la tenue mécanique. De nouveaux matériaux sont en cours de développement ou d'étude (Eurofer 97, aciers renforcés par dispersion d'oxydes, céramiques...) pour répondre aux contraintes particulières de la fusion nucléaire (haute température, neutrons de haute énergie...) ainsi que pour satisfaire les objectifs de cette nouvelle source d'énergie (limiter les déchets nucléaires : faible activation neutronique).

Les codes, tel le RCC-MRx [4] (décrit au chapitre 1 de la section 4 précédent), permettent d'orienter la conception des éléments les plus critiques tels que les couvertures productrices de tritium (ou TBM, *test blanket modules*).

## Les TBM (*test blanket modules*)

Les TBM sont des modules de test pour ITER qui ont plusieurs objectifs :

- Prouver la faisabilité de certains procédés de fabrication envisagée pour les couvertures tritigènes ;
- garantir le bon refroidissement des structures ;
- tester la récupération du tritium généré dans les TBM ;
- évaluer les problèmes liés à la perméabilité du tritium dans les structures ;
- évaluer les problèmes liés à la magnétohydrodynamique ;
- évaluer les problèmes liés à la corrosion ;
- garantir le bon déroulement des opérations de maintenance ;
- garantir la tenue mécanique de la structure.

Le but principal des TBM est de reproduire à petite échelle ce qui est envisagé pour le futur réacteur de puissance DEMO. Les TBM seront instrumentés afin de contrôler certaines propriétés pendant les essais (flux neutronique, température...). Plusieurs technologies de TBM ont été envisagées, dont deux ont été étudiées au CEA : le design HCLL (*helium cooled lithium lead*) et le design WCLL (*water cooled lithium lead*).

En tant qu'équipements sous pression nucléaires, les TBM doivent répondre aux exigences du décret français sur les équipements sous pression (ESP) [5] et, en outre, à celles de l'arrêté français des équipements sous pression nucléaires (ESPN) [6]. Pour les TBM européens, le code nucléaire français RCC-MRx peut être utilisé par le constructeur pour répondre, entre autres, à ces exigences.

### Design des TBM

Deux concepts existent pour les TBM, le premier, HCLL, repose sur un système de refroidissement à l'hélium et le deuxième, WCLL, repose quant à lui sur un système de refroidissement à l'eau.

#### Le design HCLL

Le concept HCLL repose sur de l'hélium à 80 bars pour refroidir la structure. L'hélium entre à 300 °C et ressort à 500 °C après avoir absorbé la chaleur provenant du plasma. De plus, un circuit de lithium-plomb (PbLi) liquide à 5 bars circule à l'intérieur du TBM, c'est ce dernier qui génère le tritium nécessaire pour maintenir la réaction de fusion à partir de réactions nucléaires avec les neutrons provenant du plasma. La structure est réalisée à partir d'un acier ferritique-martensitique à activation réduite appelé Eurofer 97. L'ensemble forme une boîte au sein de laquelle passent les canaux de refroidissement. Ce concept a été abandonné en 2018.

#### Le design WCLL

Le concept WCLL utilise de l'eau en condition REP (réacteur à eau sous pression) comme fluide caloporteur. Ainsi, l'eau à 155 bars, entre à 295 °C et sort à 328 °C. À la différence du concept HCLL où les canaux d'hélium sont intégrés dans la structure, une partie de la circulation du fluide se fait au sein de tubes cylindriques. Une circulation de lithium-plomb liquide à 5 bars a également lieu à l'intérieur du TBM afin de générer le tritium nécessaire. La structure est également réalisée à partir d'Eurofer 97. C'est le concept retenu à ce jour. Des vues des deux modules présentés précédemment sont exposées en figure 248.

#### Les analyses de conception selon le RCC-MRx

Les conceptions effectuées au CEA ont été guidées par plusieurs critères liés à :

- La fidélité à ce qui est envisagé dans le futur démonstrateur DEMO ;
- l'emplacement du TBM dans le réacteur ;
- la thermohydraulique et la magnétohydrodynamique (MHD) ;
- la thermomécanique ;
- la fabrication ;
- la manutention.

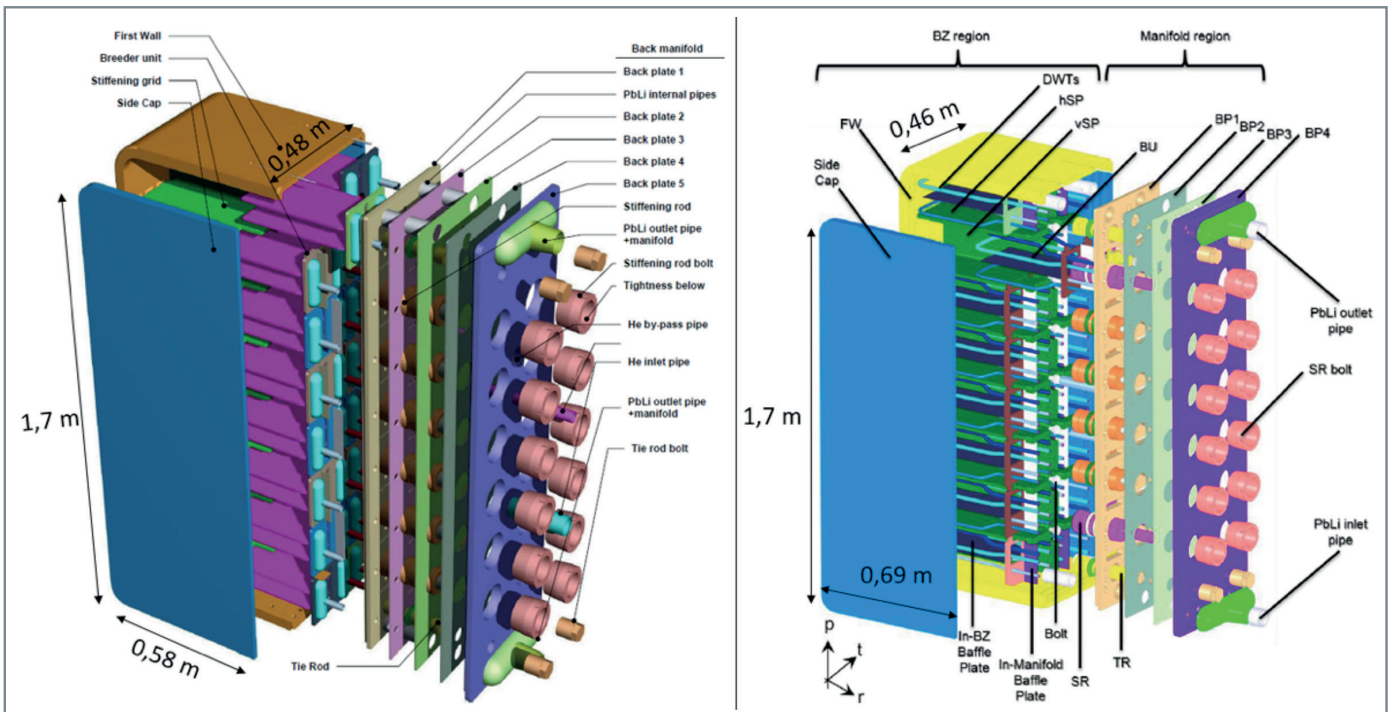


Fig. 248. Vues éclatées des TBM HCLL [7], à gauche, et WCLL [8], à droite.



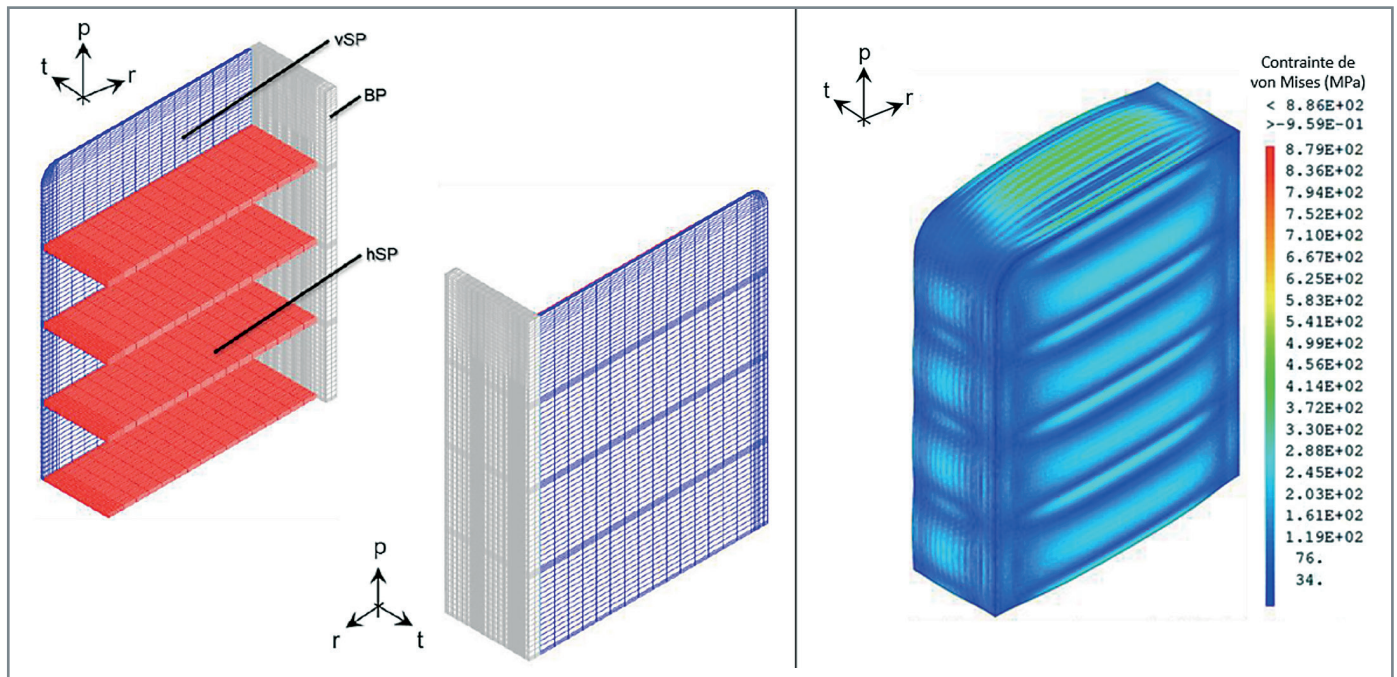


Fig. 249. Maillage (à gauche) et champ de contraintes (à droite) du TBM obtenu par la méthode des éléments finis [8] à l'aide du logiciel Cast3M.

Le RCC-MRx [4] a été utilisé pour garantir l'intégrité des structures en condition normale et accidentelle (*loss of coolant accident*, LOCA) de fonctionnement vis-à-vis des dommages mécaniques suivants :

- Déformation excessive immédiate ;
- instabilité plastique immédiate ;
- déformation progressive ;
- fatigue...

L'aller-retour entre la conception et les calculs par la méthode des éléments finis sur le logiciel Cast3M [9] suivis par la vérification des critères du RCC-MRx permet d'aboutir à un design garantissant l'intégrité des structures et vérifiant toutes les exigences.

La situation accidentelle (LOCA) a également été étudiée. La figure 249 présente un exemple de maillage du TBM WCCL et de champ de contraintes obtenu à la suite d'un calcul mécanique réalisé par la méthode des éléments finis *via* Cast3M.

### Les études de fabrication

Les études de fabrication sont basées sur de nombreux critères tels que :

- La compatibilité avec les propriétés du matériau (chimique, microstructure, mécanique, etc.) ;
- l'accessibilité des outils de soudage ;
- la fiabilité et l'automatisation (reproductibilité) du processus ;
- la déformation induite par l'opération de soudage ;
- l'endommagement et la déformation des canaux de refroidissement ;
- les propriétés mécaniques de la soudure et son contrôle non destructif ;
- le retour d'expérience (R&D, industriel) ;
- la compatibilité avec le code de fabrication RCC-MRx ;
- la compatibilité du procédé avec les installations et les coûts industriels.

### Soudabilité de l'Eurofer 97

La soudabilité de l'Eurofer 97 est discutée dans les références [10] [11] qui détaillent le type de microstructure dans la zone fondue et la zone affectée thermiquement après le traitement thermique post-soudage et la sensibilité à la fis-

uration à froid lors du soudage par procédés arc (GTAW, *gas tungsten arc welding*, ou TIG, *tungsten inert gas*), laser et soudage diffusion (CIC, *compression isostatique à chaud*). Sur la base du RCC-MRx, définissant les critères d'acceptation d'un fil d'apport, un matériau d'apport adapté a été spécifié et fabriqué. Une première évaluation des soudabilités opératoire et métallurgique du matériau d'apport Eurofer 97 est réalisée avec le procédé TIG sur moule (condition hors dilution) et sur joint soudé en chanfrein étroit.

### Fabrication des sous-composants incluant des canaux de refroidissement

Plusieurs techniques de fabrication des sous-composants constituant des canaux de refroidissement sinueux où circule l'hélium sous pression ont été évaluées depuis les années 2000, à travers les activités initialement portées par les TBM pour ITER. Parmi celles-ci, plusieurs variantes du soudage diffusion par CIC sont testées avec ou sans soudure laser pour les composants tels que les *cooling plates* (CP), les *stiffening plates* (SP dont vSP et hSP) et les *side caps* (SC). La forme en U du sous-composant *first wall* (FW) est usinée en tranches, puis assemblée par CIC à la forme finale. Les premiers travaux ont été initiés sur maquette à petite échelle pour la mise au point des conditions opératoires préliminaires et des traitements thermiques en termes de propriétés métallurgiques et mécaniques. Le retour d'expérience de ces évaluations montre la nécessité de passer à l'échelle réelle du composant pour prendre en compte, entre autres, la définition d'outils tels que les conteneurs et raidisseurs pour la CIC et les déformations en général. Ces dernières peuvent être déterminantes quant au choix de la technologie de fabrication.

### Procédé CIC (compression isostatique à chaud, HIP en anglais)

Le soudage par diffusion est un procédé d'assemblage en phase solide sans déformation importante. Il peut être mis en œuvre par pression uniaxiale, mais l'usage de la CIC présente de grands avantages : grands composants, interfaces de toute géométrie, meilleure soudure grâce aux contraintes isostatiques, gestion plus aisée des déformations [12]... Un traitement thermique post-CIC est nécessaire pour récupérer les propriétés métallurgiques et mécaniques de l'Eurofer [13]. Plusieurs variantes de CIC ont été testées dans le passé [13] [14]. Des sous-composants CP et FW de grande taille sont fabriqués pour ITER par des méthodes associant le laser au procédé CIC [15] et CIC en deux étapes [16]. Après traitement thermique, les interfaces ne sont plus perceptibles et les microstructures et les propriétés de flexion par choc et de traction sont très proches ou supérieures à celles du matériau Eurofer et aux exigences ESPN.

### Procédé laser + CIC

Le procédé de fabrication laser YAG + CIC consiste à souder en laser YAG une fine bandelette (le plus souvent sous forme de mono-bande) sur le dessus de rainures usinées

dans une plaque de base, puis à ajouter une tôle par CIC (voir fig. 250 [a]). Il présente l'avantage de simplifier l'assemblage par CIC tout en évitant la présence de soudures transversantes dans le composant. Cette technologie, développée grâce à la fabrication d'une maquette représentative de CP [17] [18] (voir fig. 250 [a]), est composée de seize canaux droits parallèles ( $4 \times 4,5 \text{ mm}^2$ ). La maquette de 360 mm de longueur et 94,5 mm de largeur a été testée à l'aide de la boucle d'essais DIADEMO au CEA Cadarache pour des essais thermomécaniques en conditions He pressurisé et placé dans un caisson PbLi. Aucune fuite n'est survenue dans la maquette [14] [19] [20].

Ces bons résultats ont conduit à de nouveaux développements en transférant cette technologie à des sous-composants de plus grandes dimensions [21] [22] et composés de canaux de dimensions maximales  $15 \times 15 \text{ mm}$ , tels que CP, SP, SC et FW (voir fig. 250 [b] et fig. 250 [c]). Les épaisseurs des sous-composants varient de 6,5 à 30 mm. La particularité du processus de fabrication FW est que ce processus est mis en œuvre sur une forme en U avec des canaux de refroidissement en forme 3D reliant le FW au collecteur arrière du TBM. Les modules FW en forme de U, chacun composé d'un canal de refroidissement avec l'entrée, la sortie et un virage en U, sont assemblés *via* le procédé CIC.

### Définition des assemblages et de la séquence de soudage de fabrication

Sur la base des développements expérimentaux réalisés par le CEA et en collaboration avec des experts industriels, les technologies de soudage et les séquences de fabrication sont évaluées pour les concepts TBM. Ces études comprennent les phases d'usinage, de soudage, de traitement thermique, de contrôle non destructif et de scénarios de montage. La séquence est composée d'une quarantaine d'étapes. Plusieurs solutions techniques sont proposées et classées. La figure 251 illustre les principales étapes du développement de la séquence de soudage.

Afin de compléter les matrices de fabrication et compte tenu de la complexité de la structure, une étude de faisabilité de CND (contrôles non destructifs) par technique ultra-sonore est réalisée pour inspecter le TBM. Ces simulations avec le logiciel CIVA [23] prennent en compte la présence des structures en canaux et l'environnement géométrique très contraint. Les résultats indiquent qu'au moins 80 % des soudures peuvent être contrôlées à l'aide de sondes conventionnelles. Le contrôle de certaines zones n'est pas possible en raison de l'inaccessibilité des faisceaux ultra-sonores émis par les capteurs classiques. Cependant, il est possible d'améliorer cela en utilisant des méthodes plus sophistiquées de contrôle ultra-sonore, telles que des sondes multi-éléments (*phased array*).



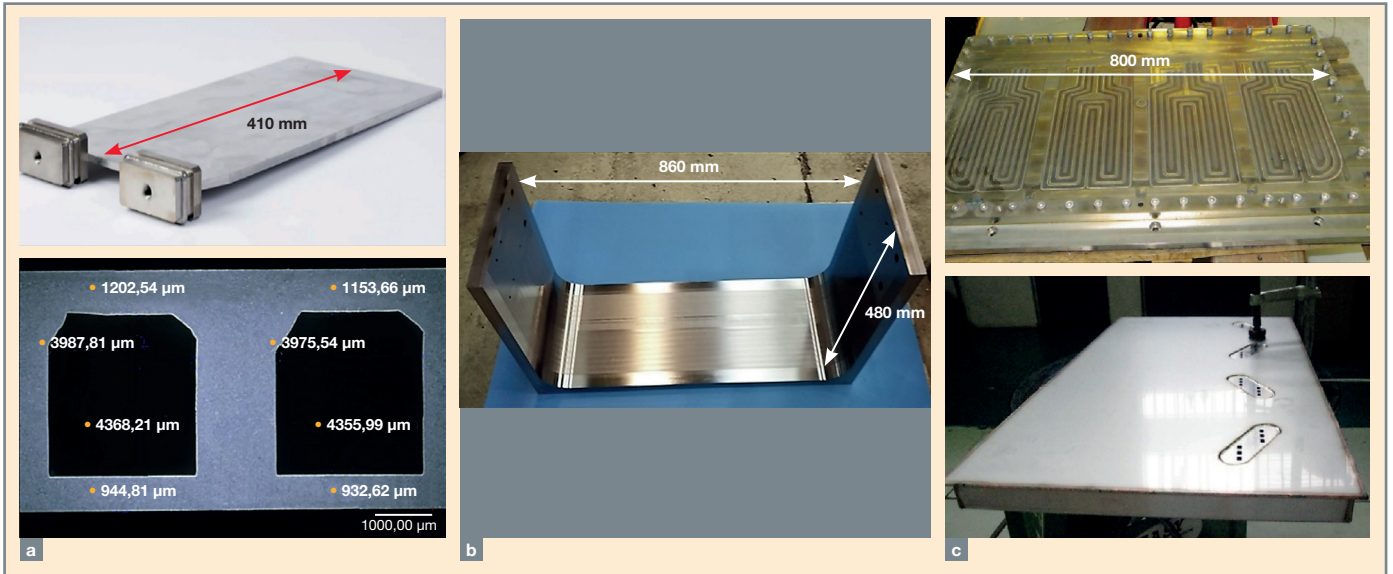


Fig. 250. Sous-composants fabriqués par procédé laser + CIC. (a) CP, (b) FW et (c) SP.

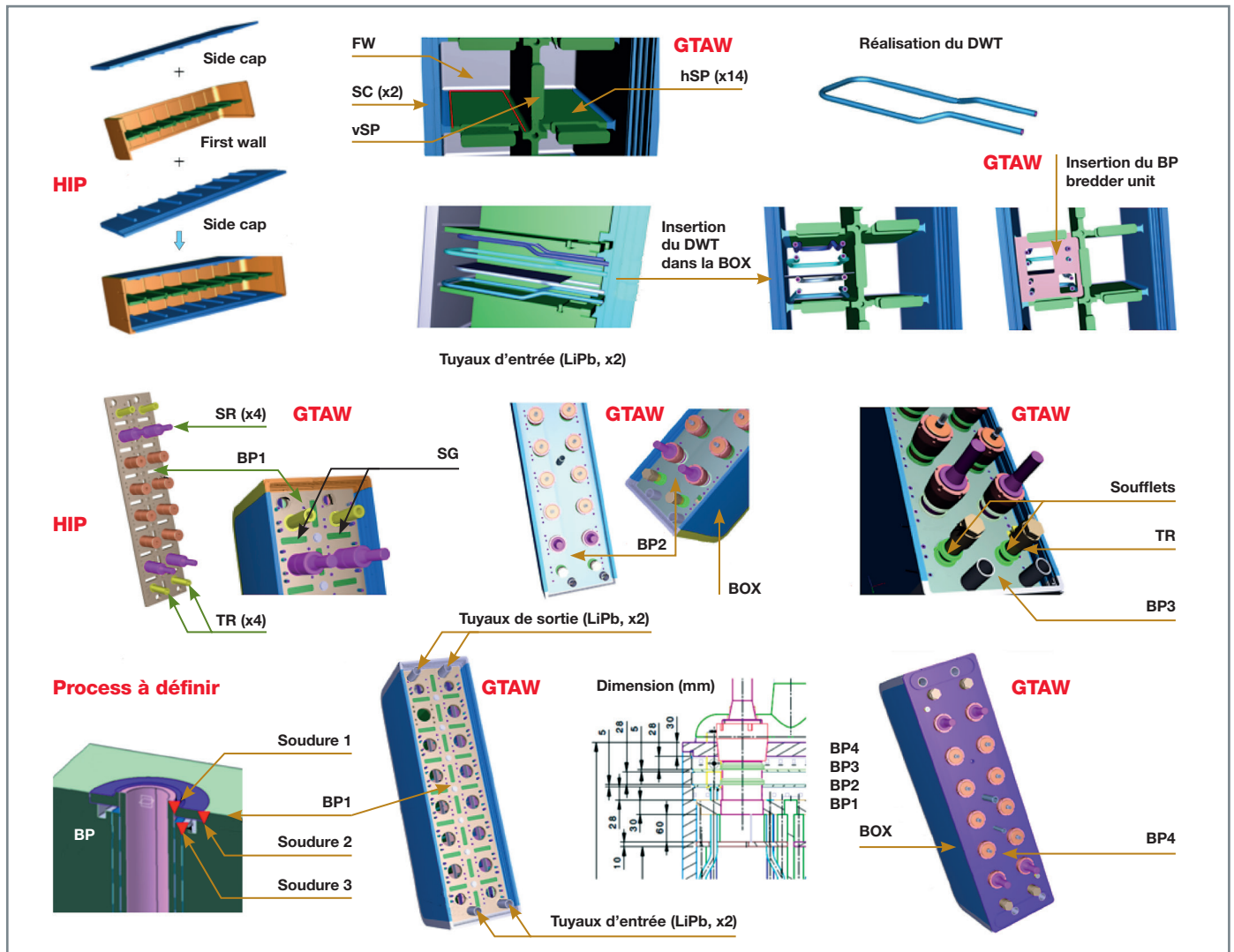


Fig. 251. Illustration des principales étapes de soudage du concept WCLL TBM. Les sous-composants à assembler sont indiqués en noir et les procédés de soudage en rouge.

## Simulation numérique pour la fabrication

Afin de minimiser les déformations thermomécaniques lors de l'assemblage par soudage de grands sous-composants, des méthodologies numériques sont développées et validées pour aider l'industriel à sélectionner la meilleure séquence de soudage. Une étude réalisée sur le TBM consistant à souder par procédé TIG en plusieurs passes la plaque vSP d'épaisseur 11 mm dans la Box [24], composée des sous-composants *first wall* et des deux *side caps*, a été réalisée. Les principales déformations se produisent perpendiculairement à la plaque vSP (voir fig. 252). Un traitement après soudage s'avère nécessaire avant débridage de l'assemblage pour obtenir les déformations les plus faibles. La minimisation des déformations s'obtient en alternant l'ordre des passes de soudage d'un côté de la rainure à l'autre.

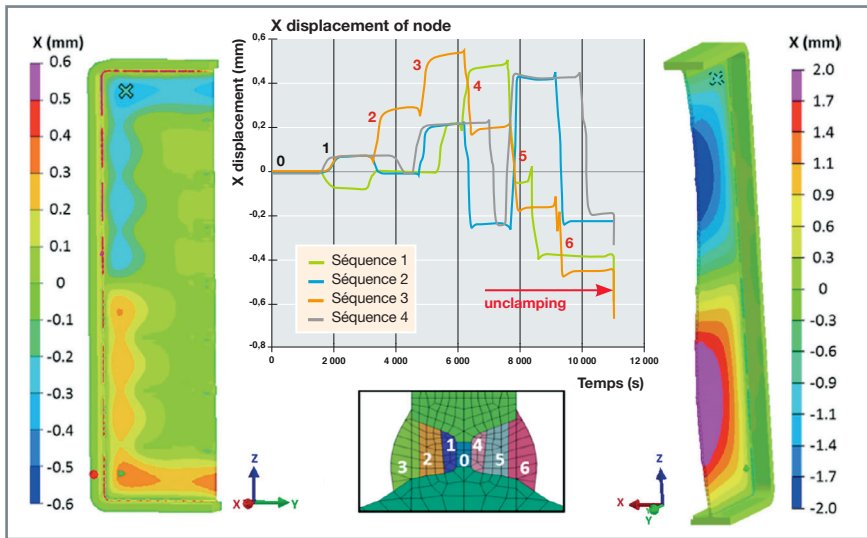


Fig. 252. Déplacements suivant l'axe x calculés lors de l'assemblage par soudage de la plaque vSP dans la Box (séquence 1).

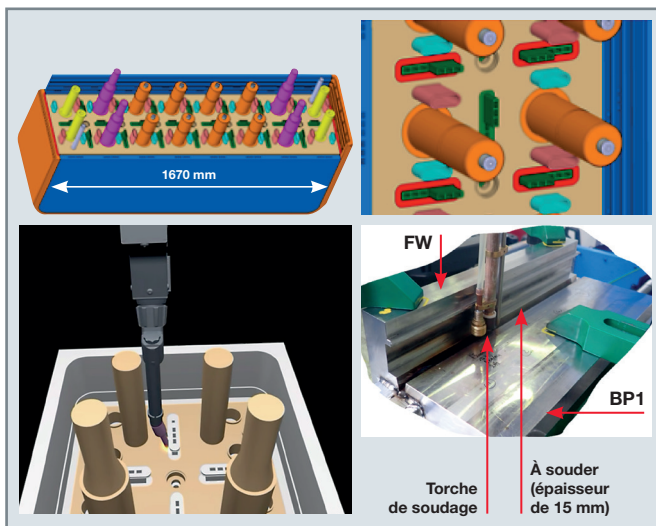


Fig. 253. Assemblage des BP et des traverses tubulaires dans la Box.

La meilleure séquence de soudage concernant les déformations est identifiée. Cette séquence a été appliquée expérimentalement sur une installation développée spécifiquement pour le soudage des maquettes TBM. Les déformations mesurées sur maquette TBM (échelle réelle) sont qualitativement conformes à la simulation et inférieures à la spécification (+/- 2 mm).

## Assemblage des sous-composants (SC, SG, BP) et des traversées tubulaires avec la Box

Des technologies de fabrication et les procédures préliminaires associées sont développées et définies pour l'assemblage par soudage de ces sous-composants (SP, SG, BP et traversées tubulaires). Ces assemblages réalisés avec les procédés TIG et CIC présentent plusieurs défis. De nombreuses soudures sont en effet nécessaires pour assembler les sous-composants dans la Box. Des canaux de refroidissement sont localisés dans les plaques à environ 5 mm du joint soudé. L'endommagement ou la déformation des canaux de refroidissement doivent être évités. Les développements les plus récents pour ITER concernent (voir fig. 253) l'assemblage des BP dans la Box et les traversées tubulaires au niveau des BP, nécessitant le développement d'outils de soudage de petite taille, y compris le soudage en configuration orbitale depuis l'intérieur des tubes.

### Procédé CIC (SC/FW)

Le procédé CIC en configuration « 2-steps » a été évalué afin d'assembler les sous-composants FW et SC formant la Box du TBM. Le passage à

des dimensions plus importantes a nécessité, entre autres, d'adapter la géométrie du container, le système de bridage/raidisseur pour améliorer le contact entre le FW et les deux SC lors du processus CIC et la durée de palier à haute pression et haute température pour augmenter le temps de diffusion à l'interface. La caractérisation au microscope électronique à balayage de la liaison soudée a confirmé l'excellente qualité de la jonction (aucun défaut ; voir fig. 254).

### Procédé TIG (SG/Box)

Le procédé TIG en mode automatique a été sélectionné en vue de se placer dans les meilleures conditions de robustesse et de répétitivité. La structure complexe de la SG, composée des plaques hSP et vSP, et la grande longueur soudée ont nécessité la spécification et l'achat d'une installation de soudage robotisée TIG incluant la conception et la fabrication d'une torche de soudage spécifique pour





Fig. 254. Assemblage SC/FW après CIC et usinage (enlèvement du container).

atteindre les zones les moins accessibles. Les procédures de soudage pour l'assemblage de la SG dans la Box du TBM sont définies [25]. La définition d'un mode opératoire de soudage préliminaire a nécessité la conception et la fabrication de différents types de maquettes de complexité croissante, allant de petites maquettes à une maquette prototype de grandes dimensions (hauteur 1,6 m). Un double chanfrein à géométrie en U a été sélectionné pour minimiser les déformations induites par les opérations de soudage. Les contrôles dimensionnels après soudage de la vSP révèlent des valeurs inférieures au défaut de planéité maximum accepté dans le sens toroïdal, soit  $\pm 2$  mm (voir fig. 255).

### Procédé TIG (BP et traversés tubulaires avec la Box)

Les modes opératoires de soudage préliminaire sont développés et définis pour l'assemblage :

- Des BP1 et BP2 d'épaisseurs respectives 25 et 5 mm avec la Box (voir fig. 256) ;
- des traversées tubulaires (He/PbLi) en épaisseur 2 mm à travers les BP1 et BP2.

Ces développements sont fortement contraints par l'accessibilité des chanfreins à souder. Des maquettes simplifiées

pour le développement des modes opératoires de soudage (MOS) préliminaires ont été conçues, fabriquées puis caractérisées. Les principaux critères pour définir la qualité du soudage sont l'oxydation, la mouillabilité du cordon, les défauts plans et volumiques, et la pleine pénétration.

Pour tous les types de joints évalués, les inspections métallographiques révèlent une bonne qualité soudée. Le soudage est réalisé en configuration orbitale (voir fig. 256) en une passe depuis l'intérieur du tube et en position de soudage horizontale (tube positionné verticalement).

Après la phase de mise au point des procédures de fabrication sur maquette simplifiée, une maquette prototype de validation de dimensions 657 × 462 mm (poloïdal × toroïdal) a été conçue puis fabriquée (voir fig. 257). Au préalable de la phase proprement dite de soudage, les géométries des chanfreins

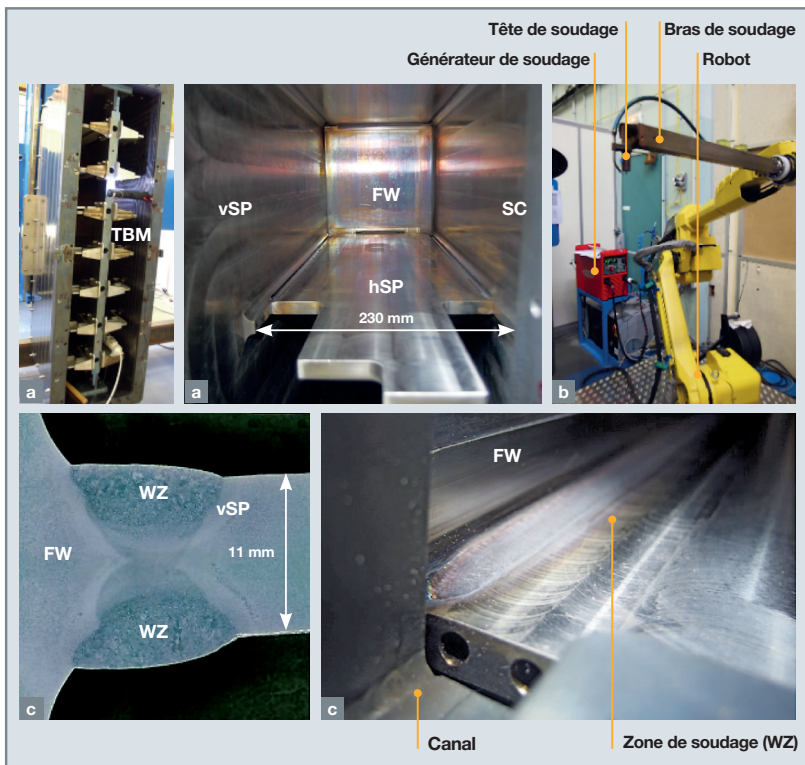


Fig. 255. (a) Positionnement, ajustement et soudage des plaques vSP et hSP dans la Box, (b) équipement de soudage TIG robotisé et (c) inspection visuelle de la soudure (face endroit et sur coupe transversale).

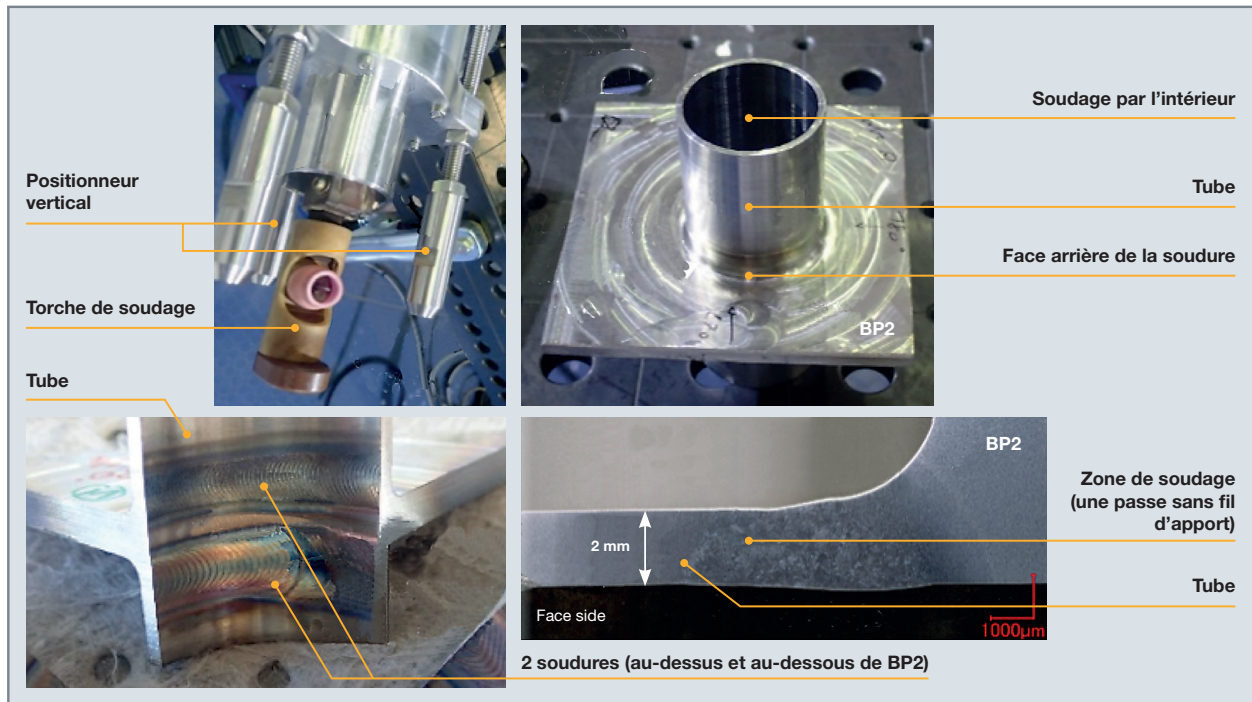


Fig. 256. Équipement de soudage TIG orbital (a), face envers de la soudure He/BP2 (b), face endroit de la soudure He/BP2 (c) et coupe transversale (d).

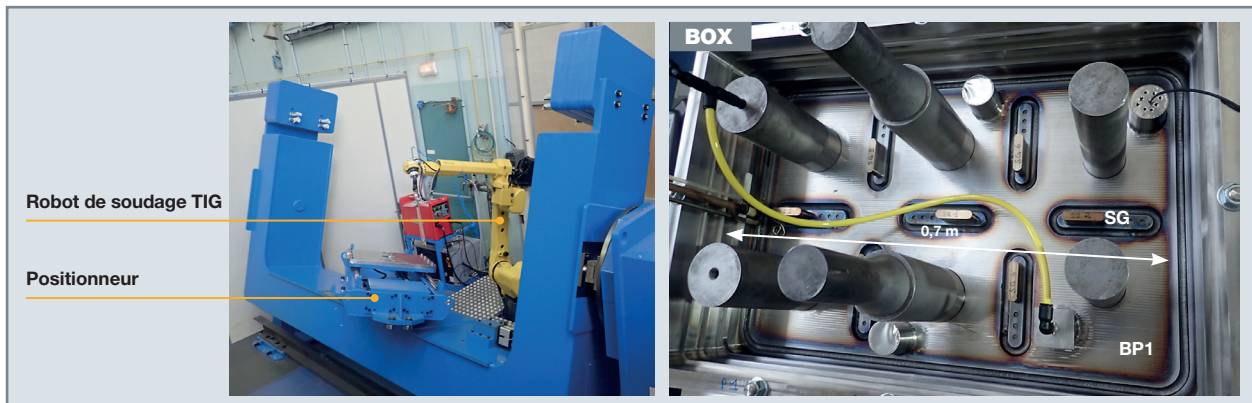


Fig. 257. (a) Installation robotisée de soudage TIG, (b) maquette prototype (assemblage des SG et BP1 avec la Box).

sont définies, les phases de nettoyage, les trajectoires robotisées, les outillages de bridage et de soudage, dont la fabrication spécifique d'une torche de soudage à faible contrainte dimensionnelle, le seuil de démagnétisation des tôles, ainsi qu'une séquence de soudage sur la base du savoir-faire minimisant les déformations.

## Conclusion

La fusion nucléaire, par les projets qu'elle incarne autour du projet ITER et DEMO, est un exemple illustrant parfaitement la nécessaire articulation entre conception et réalisation en passant par la simulation, l'expérimentation et l'usage des codes :

- La couverture tritigène, élément central des réacteurs de fusion électrogènes, suppose le développement de matériaux résistant à des conditions extrêmes, comme l'Eurofer 97, choisi pour son faible gonflement sous irradiation ;
- l'application des codes de construction, tels que le RCC-MRx, est impérative pour garantir l'intégrité des composants dans des environnements exigeants ;
- les *test blanket modules* (TBM) jouent un rôle clé dans la validation de procédés de fabrication, de refroidissement et de récupération du tritium. Différents designs de TBM, tels que le HCLL et le WCCL, exploitent des techniques de refroidissement distinctes, impliquant l'utilisation d'hélium ou d'eau sous pression ;





- les études de fabrication des composants pour les réacteurs de fusion électrogènes sont cruciales. Elles se basent sur divers critères tels que la compatibilité avec les propriétés du matériau, l'accessibilité des outils de soudage et de contrôle, la fiabilité du processus, la maîtrise des déformations et la préservation des canaux de refroidissement ;
- la soudabilité de l'Eurofer 97 a été étudiée en détail, avec la spécification de matériaux d'apport conformes au RCC-MRx. Divers procédés de soudage ont été testés, tels que le soudage par diffusion (CIC) et le procédé laser + CIC, adaptés à chaque composant. Des simulations numériques ont été utilisées pour minimiser les déformations thermomécaniques lors de l'assemblage par soudage. Des procédures de soudage ont été définies pour l'assemblage des sous-composants, en tenant compte des défis liés à la proximité des canaux de refroidissement.

Ces études de fabrication garantissent la qualité et la fiabilité des composants pour les réacteurs de fusion électrogènes, en intégrant des considérations techniques avancées pour répondre aux exigences de ce domaine technologique de pointe. En somme, le chemin vers une énergie de fusion commercialement viable nécessite des avancées dans la technologie des matériaux, la conception des composants et les procédés de fabrication. Les travaux en cours, notamment au sein de projets tels qu'ITER et DEMO, montrent un engagement international envers cette vision d'un futur énergétique plus propre et durable.

**Raphaël DAVID-MENENDEZ,**

*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*

**et Laurent FOREST,**

*Département de Recherche sur les Matériaux*

*et la Physico-chimie pour les énergies bas carbone*

## ► Références

- [1] <https://www.iter.org/fr/accueil>.
- [2] G. SANNAZZARO, V. BARABASH, "ITER C&S for Design and Construction", AFCEN conference, 24-26 March 2015.
- [3] <https://www.euro-fusion.org/programme/demo>.
- [4] RCC-MRx édition 2018, *Règles de conception et de construction des matériels mécaniques des installations nucléaires hautes températures, expérimentales et de fusion*, AFCEN, 2018.
- [5] Décret n° 99-1046 du 13 décembre 1999 relatif aux équipements sous pression.
- [6] Arrêté du 12 décembre 2005 relatif aux équipements sous pression nucléaires (<https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000021236266>).
- [7] G. RAMPAL and G. AIELLO with contributions of S. VILLARI (ENEA Frascati), F. GABRIEL and H. SIMON, "Preliminary Design and Performances of the HCLL TBM Generic Box", DEN/DANS/DM2S/SEMT/BCCR/RT/10-001/A.
- [8] J. AUBERT, G. AIELLO, D. ALONSO, T. BATAL, R. BOULLON, S. BURLLES, B. CANTONE, F. CISONDI, A. DEL NEVO, L. MAQUEDA, A. MORIN, E. RODRÍGUEZ, F. RUEDA, M. SOLDAINI and J. VALLORY, "Design and preliminary analyses of the new Water Cooled Lithium Lead", *Fusion Engineering and Design*, 160, 111921, 2020.
- [9] Cast3M (<http://www-cast3m.cea.fr>).
- [10] L. FOREST, J. AKATA, L.-V. BOCCACCINI, T. EMMERIC, B. EUGEN-GHIDERSA, G. FONDANT, A. FROIO, A. LI PUMA, H. NAMBURI, H. NEUBERGER, J. REY, L. SAVOLDI, D. SORNIN and L. VALA, "Status of the EU DEMO breeding blanket manufacturing R&D activities", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 151, 2020.
- [11] L. FOREST, L. BOCCACCINI, L. COGNEAU, A. L. PUMA, H. NEUBERGER, S. PASCAL, J. REY, N. THOMAS, J. TOSI and M. ZMITKO, "Test Blanket Modules (ITER) and Breeding Blanket (DEMO): history of major fabrication technologies development of HCLL and HCPB and status", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 154, May 2020.
- [12] E. RIGAL, « Compression isostatique à chaud », réf. M3310 V1, *Techniques de l'ingénieur*, 2017.
- [13] A. CARDELLA, E. RIGAL, L. BEDEL, P. BUCCI, J. FIEK, L. FOREST, L.-V. BOCCACCINI, E. DIEGELE, L. GIANCARLI, S. HERMSMEYER, G. JANESCHITZ, R. LÄSSER, A. LI PUMA, J.-D. LULEWICZ, A. MÖSLANG, Y. POITEVIN and E. RABAGLINO, "The manufacturing technologies of the European breeding blankets", *Journal of Nuclear Materials*, pp. 133-140, 2004.
- [14] Y. POITEVIN, P. AUBERT, E. DIEGELE, G. DE DINECHIN, J. REY, M. RIETH, E. RIGAL, A. VON DER WETH, J.-L. BOUTARD and F. TAVASSOLI, "Development of welding technologies for the manufacturing of European Tritium Breeder blanket modules", *Journal of Nuclear Materials*, pp. 36-42, 2011.
- [15] E. RIGAL, G. D. DINECHIN, P. BUCCI et P. AUBERT, Brevet FR 2 879 489: Procédé de réalisation d'un élément comportant des canaux de circulation de fluide, 2004.
- [16] E. RIGAL et P. BUCCI, « Brevet FR 2949699 : Procédé de fabrication d'un module a zone creuse, de préférence pour la circulation de fluide », 2009.
- [17] E. RIGAL, F. VIDOTTO, J. LEIBOLD and B. RICCETTI, *CEA EFDA Task Report TW2-TTBC-002-D1*, 2005.
- [18] E. RIGAL, G. DE DINECHIN, G. RAMPAL, G. LAFFONT, L. CACHON, J.-F. SALAVY and Y. POITEVIN, "Manufacturing of a HCLL cooling plate mock up", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 83, pp. 1268-1272, 2008.
- [19] L. CACHON, "Blanket manufacturing technologies testing of small-scale mock-ups to qualify manufacturing", *EFDA technology, Tritium Breeding and Materials, Breeding Blanket, HCLL Blanket, TW2-TTBC-002-D03*, 2006.
- [20] G. LAFFONT, L. CACHON, P. TARAUD, F. CHALLET, G. RAMPAL, E. RIGAL, J.-F. SALAVY and Y. POITEVIN, "Blanket manufacturing technologies: Thermomechanical tests on helium cooled lithium lead (HCLL) blanket mocks up", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 83, pp. 1208-1211, 2008.

[21] M. ZMITKO, Y. CARIN, N. THOMAS, M. SIMON-PERRET, A. LI PUMA, L. FOREST, J. TOSI, G. AIELLO, L. COGNEAU, J. REY, H. NEUBERGER, J. AKTAA, E. GAGANIDZE, K. ZHANG, N. PIERREDON, Y. LEJEAIL, P. LAMAGNERE and Y. POITEVIN, "The European ITER Test Blanket Modules: Eurofer 97 material and TBM's fabrication technologies development and qualification", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 124, pp. 767-773, 2017.

[22] M. ZMITKO, N. THOMAS, A. LI PUMA, L. FOREST, L. COGNEAU, J. REY, H. NEUBERGER and Y. POITEVIN, "The European ITER Test Blanket Modules: Progress in development of fabrication technologies towards standardization", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 109-111, pp. 1687-1691, 2016.

[23] EXTENDE-CIVA, CIVA NDT simulation platform (<https://www.extende.com>).

[24] O. DOYEN, N. RIZZO, L. FOREST, J. TOSI, N. THOMAS and M. ZMITKO, "Assessment of HCLL-TBM optimum welding sequence scenario to minimize welding distortions", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 121, pp. 80-86, 2017.

[25] L. FOREST, J. TOSI, A. LI PUMA, O. DOYEN, N. THOMAS, M. SIMON-PERRET and M. ZMITKO, "The European ITER Test Blanket Modules: Fabrication R&D progress for HCLL and HCPB", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 136, pp. 1408-1416, 2018.



## Vers une évolution des approches de simulation et expérimentale/ouverture vers les NTE

**A**près avoir mis en avant les développements scientifiques et techniques engagés en mécanique des structures pour traiter les comportements nominal, incidentel et accidentel des structures du nucléaire, après avoir montré leur implication sur la codification et présenté deux exemples d'utilisation en conception, cette dernière section revient sur les piliers simulation et expérimentation pour réaliser de manière transverse un état des lieux des travaux en cours et à venir.

Le premier chapitre se penche sur les aspects numériques autour, notamment, du calcul à haute performance pour répondre à des besoins de simulation de plus en plus exigeants tant en taille de structures à représenter qu'en finesse d'informations recherchée. Le deuxième chapitre aborde, quant à lui, la méthodologie expérimentale autour du développement des essais hybrides et de la recherche d'une représentativité toujours plus grande.

La monographie s'achève sur la valorisation, parallèlement à ces travaux, des compétences acquises par la DES dans le cadre des réacteurs nucléaires, dans le domaine des nouvelles technologies de l'énergie en lien avec la mise en place de stratégies de décarbonation des usages domestiques et industriels de ces énergies.





## Les défis numériques

### Enjeux de la simulation numérique en mécanique des structures et défis associés

La simulation numérique est aujourd'hui un acteur incontournable pour le suivi et la conception de dispositifs technologiques innovants porteurs d'une double exigence : performance économique et maîtrise des risques techniques. Elle s'inscrit aujourd'hui dans un environnement informatique caractérisé par des capacités logicielles adaptées au calcul à haute performance (HPC).

L'objectif de ce chapitre est d'éclairer sur un ensemble de défis numériques pour le calcul de structures. À ce titre, un panel de problématiques physiques à finalité industrielle est exposé, constituant autant de cadres permettant le déploiement de simulation numérique prédictive.

#### *La simulation numérique pour l'analyse du comportement sous sollicitations externes de l'enceinte de confinement d'un réacteur nucléaire*

Comme évoqué dans le chapitre dédié aux structures en béton armé (page 143), dans le domaine du nucléaire, l'enveloppe de confinement du réacteur constitue la structure majeure de génie civil dont il convient d'assurer l'intégrité afin de garantir la fonction première de barrière de confinement radiologique au regard d'un ensemble de sollicitations externes [1]. Ces sollicitations sont multiples et relèvent de régimes de fonctionnement très divers. À titre illustratif, trois situations de fonctionnement sont ici exposées permettant de révéler un ensemble de défis numériques pour le calcul de structure :

- **Le comportement en vieillissement** (analyse du niveau d'étanchéité) relié à la problématique de durée de vie, l'enveloppe de confinement relevant des composants non remplaçables dans un réacteur nucléaire. L'ambition d'une simulation numérique à visée prédictive de l'enveloppe de confinement est double : appréhender les déformations quasi statiques d'ensemble tout en capturant les effets locaux tels que l'apparition de fissures appréhendées *via* la notion d'endommagement ;
- **le comportement sous séisme**, abordé dans le chapitre relatif au risque sismique (page 163), aléa naturel intervenant dans les règles de conception du réacteur. L'enjeu est l'estimation du chargement dynamique que subit l'enveloppe et l'estimation de la réponse mécanique de la structure résultante.
- le comportement en accident grave avec, notamment, l'analyse du **risque hydrogène** et ses conséquences sur l'intégrité de l'enveloppe. En cas d'accident de fusion du cœur telle que survenue lors de l'accident de Fukushima, de l'hydrogène peut être produit en grandes quantités à l'intérieur de l'enveloppe de confinement du réacteur. L'explosion engendrée peut conduire à un endommagement de l'enveloppe de confinement du réacteur. L'objectif est alors de simuler l'évolution du champ de pression dans l'enveloppe et son impact sur les structures internes et l'enveloppe externe du bâtiment réacteur avec possible rétroaction sur la dynamique de combustible (interaction fluide-structure).

Les défis numériques pour le traitement de l'ensemble de ses sollicitations externes avec une encore plus grande acuité sont multiples :

- Maîtriser et garantir la robustesse des modèles numériques en jeu (modélisation de l'endommagement, modèle de combustion de l'hydrogène) sur des échelles de temps allant de la seconde (risque sismique, risque hydrogène) à plusieurs dizaines d'années (durée de vie de l'enveloppe) ;
- mettre en œuvre une description fine de la structure enveloppe afin de capturer les phénomènes à la fois locaux (à l'échelle centimétrique voire millimétrique) et globaux (à l'échelle de quelques dizaines de mètres), soit une amplitude de trois décades pour accéder aux deux extrema de comportement mentionnés ;
- prendre en compte l'interaction entre la structure et son environnement induisant potentiellement de fortes non-linéarités numériques : interaction fluide-structure (IFS) dans le cas du risque hydrogène, interaction sol/structure (ISS) dans le cas du risque sismique.

---

### **La simulation numérique pour la maîtrise du procédé de fabrication additive par arc-fil (WAAM) [2]**

Le procédé WAAM est une technologie directement dérivée du soudage à l'arc. Disposant de nombreuses applications industrielles, ce procédé consiste à générer un arc électrique entre un substrat et un fil métallique pour former un cordon. Les enjeux de la simulation numérique sont alors d'évaluer, à l'issue du procédé, la distorsion du composant et son état mécanique dit résiduel. L'influence de la séquence de fabrication voire son optimisation doivent pouvoir être étudiées, ce qui nécessite de capturer les nombreux phénomènes multi-physiques régnant au voisinage du bain de fusion. À ce titre, les principaux défis numériques sont les suivants :

- Mise en œuvre d'une simulation multi-physique du bain de fusion ;
- simulation du procédé aux échelles millimétrique (bain de fusion) et métrique (ligne de fusion) ;
- prédiction de l'évolution de la microstructure et conséquences à l'échelle du composant.

---

### **La simulation numérique au service de l'analyse du comportement d'un générateur de vapeur en régime nominal**

Dans les réacteurs nucléaires, le générateur de vapeur est soumis à des contraintes mécaniques locales de type vibratoire pouvant conduire, par contact-frottement entre tubes, à une usure prématurée de ses constituants). La simulation numérique doit permettre alors de capturer ces phénomènes afin d'analyser les capacités de transfert de chaleur du générateur de vapeur et donc de refroidissement de la chaudière nucléaire. À ce titre, les principaux défis numériques sont les suivants :

- Construire et valider un ensemble de modèles (IFS, contact-frottement) au bon niveau, à savoir adaptés aux besoins applicatifs (du modèle de référence aux modèles simplifiés à vocation industrielle) et en garantir la robustesse de traitement numérique ;
- par souci de représentativité, réaliser des calculs à l'échelle du composant (échelle métrique) tout en intégrant des phénomènes locaux (contact-frottement, usure – échelle millimétrique) dans le contexte de scénarios vibratoires à très grand nombre de cycles.

---

### **Dénominateurs communs**

Ces quelques exemples applicatifs mettent en lumière un ensemble de défis partagés tels des dénominateurs communs qu'il est possible de catégoriser de la manière suivante :

- Défi 1 : garantir la robustesse des méthodes numériques ;
- défi 2 : mettre en œuvre une approche de type HPC pour adresser les problèmes de grandes tailles ;
- défi 3 : mettre en œuvre les couplages multi-physiques nécessaires à la prise en compte de la complexité phénoménologique des configurations physiques simulées.

Chaque défi est repris et détaillé dans les pages suivantes afin d'en préciser les contours, limitations et perspectives, avec comme point d'orgue l'effort de formalisation au sein d'outils de simulation numérique.

---

### **Premier défi : la robustesse des méthodes numériques**

---

#### **Problèmes non linéaires et méthodes itératives**

Les phénomènes physiques en jeu en mécanique des structures sont formalisés à l'aide de différentes équations de conservation/bilan, souvent écrites sous forme faible et associées à un principe variationnel. Sauf cas très particuliers, ces équations présentent un caractère intrinsèquement non linéaire, qui nécessite l'utilisation de méthodes numériques pour la discrétisation de ces équations et leur résolution. Ces méthodes se doivent d'être robustes et précises, tout en revêtant un caractère générique pour adresser un large panel de structures mécaniques relevant d'applications industrielles. Ces équations, ainsi discrétisées spatialement et temporellement, conduisent alors à la résolution numérique de systèmes matriciels, à l'aide de schémas itératifs.

Il est proposé ici de mettre l'accent sur deux champs d'activité en simulation numérique pour le calcul de structures :

- La discrétisation numérique ;
- la résolution de systèmes non linéaires.

---

#### **Discrétisation par éléments finis des équations : limitations et perspectives**

La méthode de discrétisation numérique industriellement la plus utilisée reste la méthode des éléments finis (EF) dite standard, fondée sur la méthode Galerkin, où les degrés de liberté inconnus sont des quantités physiques (par exemple, la température et le déplacement) en différents points (nœuds du maillage) de la structure étudiée résultant de la

discrétisation spatiale des équations. Cependant, l'utilisation des éléments finis standards comporte des limitations dans le traitement de phénomènes physiques couramment rencontrés en mécanique des structures (déformation, fissuration, rupture...). Ces limitations donnent lieu à un champ de recherche autour de l'exploration d'éléments finis « enrichis », notamment :

- Les éléments finis étendus (méthode des X-FEM) qui permettent de décrire le saut de déplacement au passage des lèvres d'une fissure, donc de la représenter sans la mailler. Ce type de méthode, qui rencontre un réel engouement depuis les années 2000, a pu être mis en œuvre de façon relativement performante en deux dimensions. En trois dimensions, certaines difficultés pénalisent encore trop sa mise en œuvre. À ce titre, l'utilisation par combinaison de la méthode des X-FEM et de la technique de raffinement adaptatif de maillage (AMR) constitue un axe d'exploration particulièrement adapté dans le cas de l'utilisation de critères de propagation locaux [3] ;

- de nouvelles méthodes d'approximation comme les *hybrid high order element* (HHO ; cf. focus) qui permettent de résoudre les problèmes de verrouillage numérique rencontrés dans le cas de déformations isochores (i.e. sans variation de volume), la base classique de représentation des déplacements par éléments finis standards conduisant à des solutions non physiques avec oscillations des champs internes aux éléments.

### Résolution de système d'équations non linéaires : méthodes actuelles et voies d'exploration

En mécanique des structures, l'équilibre en quasi-statique et dynamique est régi par le système d'équations différentielles algébriques reliant force imposée et déplacement induit via la matrice de rigidité de la structure. En dynamique, l'utilisation d'un schéma d'intégration temporel explicite permet d'obtenir l'évolution temporelle de la réponse sans avoir besoin d'un solveur. Par contre, en dynamique « implicite » ou en quasi-statique, le système algébrique non linéaire est résolu par des méthodes itératives à point fixe. Les non-

#### Focus : Vers de nouvelles méthodes de discrétisation robustes et performantes

La récente méthode *hybrid high order* (HHO) a montré tout son intérêt dans le domaine de la mécanique numérique non linéaire. En effet, cette méthode déploie un type d'élément fini (EF) robuste aux phénomènes liés au traitement de l'incompressibilité des matériaux (voir fig. 258). Comme pour la méthode des éléments finis dite standard, la cinématique d'un élément est décrite par des inconnues, dites primales, en déplacement. Le caractère hybride de la méthode vient du support des inconnues qui décrit le déplacement dans l'élément (ou cellule) et de celui de chacune de ses faces. De plus, il est possible de montrer que cette méthode HHO dérive du principe variationnel de Hu-Washizu, principe qui généralise celui des travaux virtuels classiques, base de la méthode EF

standard. Via ce cadre, la discrétisation de la méthode HHO présente alors un caractère similaire à celle des éléments finis standards, ce qui permet alors aisément son introduction dans les codes de calcul EF actuels. L'ensemble des propriétés de cette méthode, en particulier sa cinématique enrichie, permet alors d'exploiter de nouvelles possibilités en termes de schémas numériques, compatibles avec les exigences des simulations industrielles. Parmi celles-ci, nous retrouverons le traitement robuste de l'écoulement incompressible des matériaux (sans verrouillage numérique), couplé ou non à de la fissuration, ainsi que des méthodes efficaces de raffinement de maillage adaptatif.

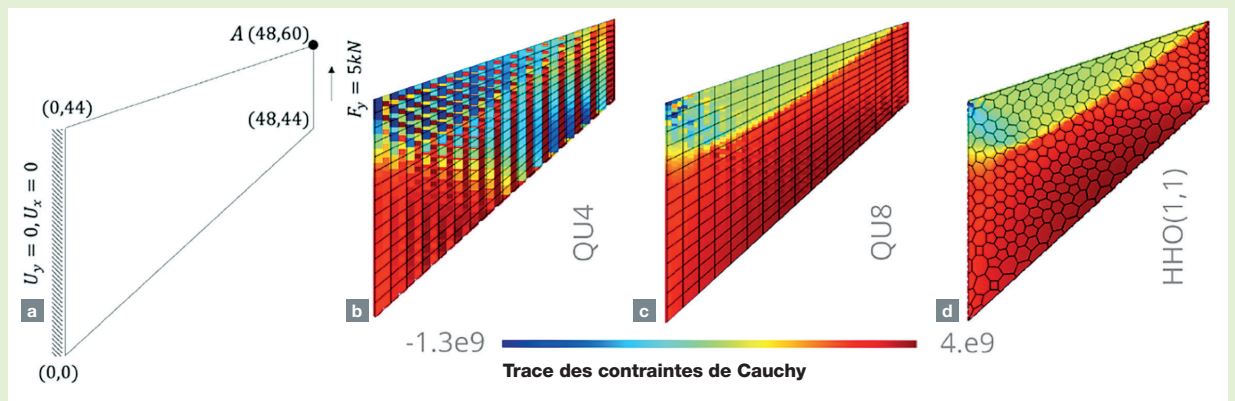


Fig. 258. Illustration sur la membrane de Cook 2D (a) des problèmes classiques d'oscillations de la pression hydrostatique dans les cas des éléments finis standard de Lagrange linéaire à quatre nœuds (b) et quadratique à huit nœuds, la méthode HHO avec des éléments polygonaux quelconques (d) ne présentant pas ces oscillations. Ces oscillations, au sein d'un même élément fini, ne disparaissent pas lorsque la taille des éléments finis diminue : problème intrinsèque des EF standards [4].

linéarités régulières (pouvant être décrites par des fonctions continues et dérivables) sont généralement traitées par linéarisation du problème non linéaire. C'est le cas des grandes transformations et des comportements matériaux possiblement à effet d'historique.

Dans le cas où la matrice tangente issue de la linéarisation du système algébrique devient singulière (*i.e.* non inversible), des méthodes de stabilisation permettent de trouver des solutions tout en conservant une approche incrémentale. Les méthodes de continuation par longueur d'arc sont ainsi une alternative. Enfin, le pilotage peut être adapté en fonction du problème (pilotage en force, en déplacement, en longueur d'arc). De manière générale, les difficultés de convergence

sont dues à une perte d'unicité de la solution, liée au fait que la matrice tangente de résolution de l'équilibre mécanique est mal conditionnée ou n'est plus définie positive.

Dans le formalisme des grands déplacements tel que pratiqué dans la simulation numérique du contact-frottement (cf. focus), l'équilibre mécanique doit être satisfait sur la configuration déformée. Les difficultés de convergence sont notamment liées :

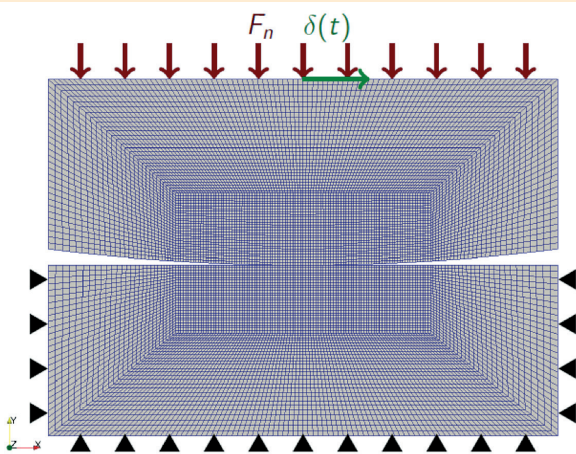
- D'une part, au fait que le rayon de convergence de l'opérateur de résolution dépend fortement de la configuration. La convergence peut être assurée en le réactualisant fréquemment, c'est-à-dire en faisant de petits pas de calcul.

**Focus : La simulation numérique au service du traitement du contact-frottement pour la prédiction des phénomènes d'usure**

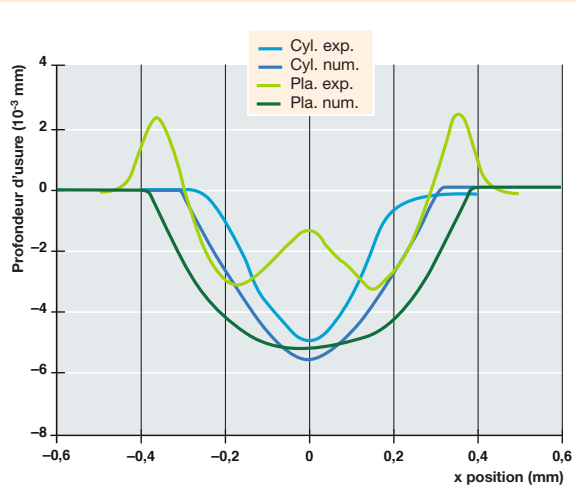
Le phénomène d'usure est un mode d'endommagement complexe difficile à appréhender du fait de son caractère pluridisciplinaire qui fait intervenir la mécanique, la science des matériaux et la chimie. Son traitement implique la simulation numérique du contact-frottement entre les structures (protagonistes) en interaction.

Le contact-frottement est nécessairement simulé en grands déplacements, traitement comportant de nombreuses difficultés numériques ce qui en fait un champ de recherche académique et applicatif très actif. Aux difficultés liées à la simulation en grands déplacements s'ajoutent l'apparition d'instabilités liées à la discrétisation des surfaces de contact et la perte d'unicité de la solution du problème discrétisé de frottement. Des méthodes de pénalisation permettent de régulariser ce type de problème et facilitent grandement la convergence.

C'est le type de méthode couramment employé dans les outils commerciaux. Toutefois, en autorisant les surfaces de contact à s'interpénétrer, l'interpénétration que l'on pénalise, ces méthodes conduisent à des solutions approchées qu'il est difficile d'apprécier sans résoudre le problème exact, la convergence de la solution approchée posant les mêmes difficultés que celle du problème initial lorsque la pénalité appliquée est augmentée. Différentes méthodes permettant d'améliorer la convergence sont industrialisées, d'autres font appel au savoir-faire de l'utilisateur (méthode d'augmentation). La modélisation par la méthode des éléments finis de problèmes de contact-frottement et leur résolution fait encore l'objet de nombreux travaux de recherche en mécanique des structures associant simulation numérique et essais en laboratoire dans une démarche d'apport réciproque (voir fig. 259).



(a) Maillage de deux structures protagonistes en contact-frottement ( $F_n$  : force normale appliquée -  $\delta(t)$  : déplacement cyclique imposé).



(b) Confrontation calcul-essais sur les profils d'usure.

Fig. 259. Simulation numérique d'un problème de contact-frottement faisant intervenir deux protagonistes [6].



Différentes méthodes permettant de faciliter la convergence de ce type de calcul (c'est-à-dire permettant de faire de « grands » pas de calcul) ont été proposées ces dernières années, c'est par exemple le cas de la méthode asymptotique numérique (MAN) [5] ;

- d'autre part, à la prise en compte des raideurs associées aux chargements appliqués à la structure et à la configuration du système (raideur géométrique), qui peuvent conduire à des instabilités mécaniques (flambement). Le traitement de ces instabilités dans le cadre d'un schéma de calcul temporel continu est encore du domaine de la recherche.

### Arithmétique flottante

Dans le cadre de la simulation numérique, les méthodes numériques utilisées sont définies théoriquement en se basant sur l'arithmétique des nombres réels. Or, les ordinateurs sur lesquels ces méthodes numériques sont implémentées et appliquées ne sont pas capables de manipuler l'arithmétique des nombres réels. Ainsi les opérations qui se font sur des nombres réels dans les définitions théoriques ne se font pas, en pratique, sur des nombres réels, mais sur des nombres dits « à virgule flottante » (ou, de manière abrégée, des nombres « flottants »). À la différence des nombres réels, il n'existe qu'une quantité finie de nombres flottants. Grossièrement, chaque nombre flottant représente l'ensemble des nombres réels pour qui il est le plus proche et en constitue ainsi une approximation. À un nombre réel  $a$  on peut ainsi associer son nombre flottant approximé  $\bar{a}$ . De la même manière, on peut associer à une opération arithmétique générique  $o$  son opération approximée  $\bar{o}$  définie par :  $a\bar{o}b = \overline{aob}$ . On constate alors la perte de propriétés de l'opération, par exemple l'associativité :  $(a\bar{o}b)\bar{o}c = \overline{a\bar{o}(b\bar{o}c)}$ ,  $a\bar{o}(b\bar{o}c) = \overline{a\bar{o}b\bar{o}c}$ .

Ceci conduit à deux principales problématiques :

- **Une perte de précision** : alors que l'erreur relative entre  $a$  et  $\bar{a}$  est de l'ordre de  $10^{-15}$ , le résultat d'une série d'opérations sur des nombres flottants peut n'avoir plus aucun chiffre significatif par rapport au résultat de la même suite d'opérations sur des nombres réels. L'erreur relative entre le résultat d'une série d'opérations sur des nombres flottants et sur des nombres réels peut être arbitrairement grande ;
- **la non-répétabilité des calculs** : la perte des propriétés arithmétiques des opérations, en particulier de l'associativité, fait qu'un calcul

donné peut donner des résultats différents s'il est exécuté sur des machines avec des architectures différentes ou même sur une machine donnée s'il s'agit d'un calcul parallèle lancé avec un nombre d'unités de calcul différent. Cette dispersion dans les résultats provient de méthodes d'arrondis, qui peuvent être différentes d'une architecture à l'autre, ou encore de la modification de l'ordre de certaines opérations en changeant la configuration des ressources parallèles mobilisées pour une simulation donnée.

Lorsque l'on observe, pour un calcul donné, une telle perte de précision par rapport à une solution de référence, ou une dispersion des résultats en fonction de la configuration de lancement du calcul, cela peut être le signe de :

- L'instabilité de la méthode numérique utilisée ou de la façon dont elle est implémentée vis-à-vis de l'arithmétique flottante : les petites erreurs d'arrondi commises à chaque opération se cumulent de manière catastrophique et conduisent à une erreur significative sur les quantités observées en fin de calcul. Dans ce cas, la solution obtenue doit être considérée comme n'ayant aucun sens ;
- la présence d'instabilités dans les équations traitées, représentatives d'instabilités réelles dans la physique du problème, qui conduisent à la perte d'unicité. En particulier dans le cadre de la mécanique, c'est le cas de certaines configurations avec contact-frottement entre structures, celles où les sollicitations provoquent la rupture et la fragmentation des structures, ou encore lorsque des bifurcations, telles que le flambement dynamique, interviennent dans l'évolution dynamique du système. La figure 260 illustre une manifestation du phénomène sur un cas de flambage dynamique présentant des bifurcations. Différentes solutions sont obtenues en faisant varier le nombre de processus sur lesquels le calcul est lancé en parallèle ;

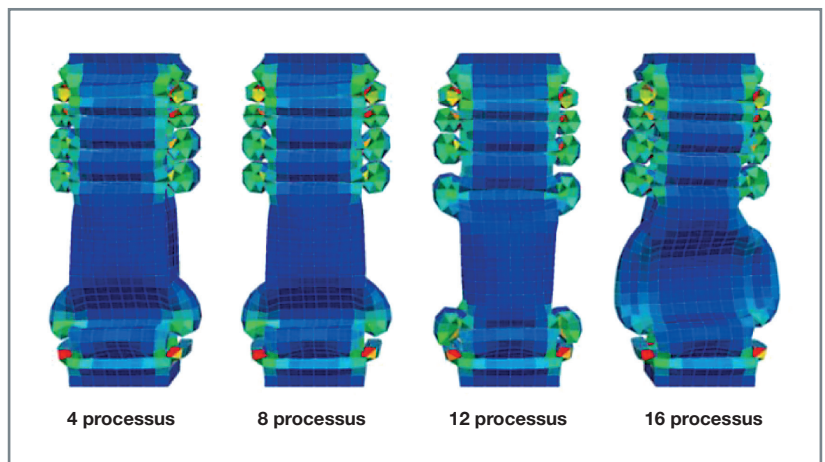


Fig. 260. Dispersion des modes de flambage pour la compression d'une poutre caisson en fonction du nombre de processus de calcul utilisés pour le calcul parallèle.

- la conjonction de ces deux sources de dispersion, l'amplification catastrophique du bruit numérique par l'algorithme, d'une part, et la sensibilité de la physique traitée au « bruit de fond » numérique, d'autre part, rendent l'analyse de résultats dispersés difficile. Dans tous les cas, lors d'une étude ou du processus de vérification/validation (V&V) d'un code de calcul, il est important d'avoir connaissance du niveau de dispersion des grandeurs mesurées dû à l'arithmétique flottante. Des outils numériques existent afin de mesurer ces niveaux de dispersion, mais aujourd'hui ils pénalisent de manière très importante les temps de calcul.

L'enjeu pour les codes de calcul est double :

- S'assurer que la façon dont sont implémentés les différents algorithmes minimise l'amplification du « bruit numérique » [7]. Il existe pour cela des outils de diagnostic qui peuvent aider à identifier dans le code source les « endroits » où les erreurs d'arrondi s'amplifient. Il existe aussi de bonnes pratiques de programmation à appliquer ;
- fournir aux utilisateurs des procédures et des outils afin de déterminer le nombre de chiffres significatifs dans les grandeurs de sortie mesurées.

## Second défi : le calcul à haute performance (HPC) pour adresser les problèmes de grandes tailles [8]

### Approches classiques pour le parallélisme des problèmes de mécanique

Les machines de calcul sont généralement composées d'un grand nombre de « nœuds » de calcul interconnectés par un réseau à haute performance. Un nœud de calcul correspond à une carte mère sur laquelle on dispose de plusieurs cœurs de calcul, certains directement connectés à cette carte mère (les cœurs des CPU), d'autres *via* des cartes d'extensions dites « accélérateurs » (souvent le cas pour les cœurs de GPU). Chaque cœur de calcul est capable d'effectuer un certain nombre d'opérations de manière simultanée sur plusieurs données élémentaires.

À cette architecture hiérarchique des capacités de calcul, on associe, dans les codes de calcul, différents niveaux de parallélisme.

#### Parallélisme à mémoire distribuée : décomposition de domaine

Le premier niveau de parallélisme mis en œuvre dans les codes de calcul de mécanique est le parallélisme dit à mémoire distribuée. L'objectif de ce type de parallélisme est d'être capable d'exploiter, dans un même calcul, plusieurs nœuds de calculs (si possible un très grand nombre) de la

machine. Pour cela, on lance simultanément plusieurs instances de notre code de calcul, chaque instance ayant en charge une partie de la charge de travail globale du calcul. La difficulté de cette approche est que chaque instance du code de calcul (on parle de « processus ») dispose de son espace mémoire propre et n'a pas directement accès aux données stockées par les autres instances. Or, beaucoup d'algorithmes nécessitent, pour un processus, de connaître des données potentiellement stockées dans la mémoire d'un autre processus. Il faut alors organiser des transferts de données entre processus, dont une partie peut se faire au travers du réseau de communication à haute performance de la machine. Évidemment, de telles communications ont un coût qu'on cherche à minimiser dans les algorithmes mis en place.

En pratique, la répartition de la charge globale de travail entre les processus de calcul se fait en subdivisant le maillage global du domaine d'étude en un ensemble de sous-domaines et en attribuant un de ces sous-domaines à chaque processus de calcul.

C'est pour ce niveau de parallélisme que l'extensibilité des algorithmes et de leur implémentation est la plus critique. En effet, pour les machines actuelles, le nombre de cœurs par nœud ou le nombre d'instructions simultanées qu'un cœur est capable d'effectuer sont bornés et d'ordre de grandeur relativement faible (quelques dizaines). Or, le nombre de cœurs de calcul interconnectés peut être beaucoup plus grand (plusieurs milliers). C'est donc le niveau de parallélisme à privilégier si on souhaite faire des calculs sur un très grand nombre de cœurs.

#### Parallélisme de boucle : *multi-threading*

Un second niveau de parallélisme intervient au sein de chaque processus de calcul, tel que décrit au paragraphe précédent. Dans le cadre de ce parallélisme, toutes les unités de travail (appelées *threads*) partagent le même espace mémoire et peuvent donc directement lire et écrire des données stockées aux mêmes emplacements mémoire. La pratique la plus classique est de distribuer les itérations des boucles de calcul entre ces *threads*. Une difficulté (parmi d'autres) est que l'exécution de chacune de ces itérations de boucle doit être indépendante des autres (en particulier, l'ordre d'exécution ne doit pas importer et l'écriture d'une donnée dans un espace mémoire particulier doit être réservée à un *thread* identifié).

#### Vectorisation

Un troisième niveau de parallélisme consiste à exploiter la capacité qu'ont les cœurs de calcul modernes d'effectuer une opération élémentaire simultanément sur plusieurs données. Comme détaillé ci-dessous, ce niveau de parallélisme est relativement difficile à mettre en œuvre et n'est en général que peu ou partiellement exploité dans les codes de production actuels.

---

## Résolution des systèmes linéaires distribués

Une première difficulté pour la simulation des problèmes mécaniques de grandes dimensions est la résolution des systèmes linéaires induits.

Pour toute une gamme de calcul, dits « implicites », ces systèmes couplent l'ensemble des inconnues du problème. Leur résolution doit alors faire intervenir de nombreuses communications de données entre les processus de calcul, ce qui pénalise les performances parallèles. Aujourd'hui, il existe tout une gamme de méthode permettant de traiter de tels systèmes linéaires distribués sur un grand nombre de processus de calcul, mais aucune n'offrant à la fois les performances et une robustesse maximales pour l'ensemble des cas possibles. Les méthodes les plus performantes pour un certain type de calcul demandent généralement à être finement paramétrées au cas par cas.

En outre, l'utilisation de la méthode des multiplicateurs de Lagrange pour imposer les conditions aux limites ou de couplage avec d'autres physiques ajoute une difficulté supplémentaire. Cette méthode largement utilisée en mécanique des structures présente de nombreux avantages, mais conduit à des systèmes linéaires de type « point-selle » beaucoup plus difficiles à résoudre. Cette difficulté est exacerbée dans un contexte de HPC « de pointe » où il s'agit d'utiliser des algorithmes de résolution itératifs, voire « sans-matrices ». Il est alors très difficile avec les techniques actuelles d'obtenir les meilleures performances de résolution des systèmes linéaires avec multiplicateurs de Lagrange.

Pour les problèmes dits « explicites », les systèmes linéaires sont le plus souvent diagonaux et ne couplent donc pas les inconnues entre elles, mais l'utilisation de la méthode des multiplicateurs de Lagrange pour l'imposition de certaines conditions aux limites ou de couplage, comme le fait le code EUROPLEXUS, introduit des systèmes linéaires annexes qui, eux, ne sont pas diagonaux. Néanmoins, ils sont généralement de plus petite dimension et plus faciles à traiter que ceux intervenant dans le cadre de calculs « implicites ».

---

## Équilibrage de charges

L'approche classique pour le premier niveau de parallélisme consiste à découper le domaine d'étude en un ensemble de sous-domaines et à attribuer à chaque processus de calcul la charge d'un de ces sous-domaines. Un des points clés pour l'obtention des meilleures performances parallèle consiste à ce que tous les processus de calcul aient et conservent, au cours du calcul, une charge très proche. Une première difficulté est liée au fait que le calcul d'une itération d'un problème de mécanique fait intervenir différentes étapes de calcul. Or, la répartition de la charge entre ces différentes étapes varie d'un sous-domaine à l'autre. Ainsi,

l'équilibrage d'une étape de calcul peut fortement déséquilibrer une autre étape de calcul. Une autre difficulté est liée au fait que cette répartition de la charge entre les différentes étapes du calcul sur les sous-domaines peut évoluer au cours du calcul. Un exemple typique est celui du contact : pour certains calculs, les zones en contact peuvent évoluer de manière très importante. Les techniques de raffinement de maillage adaptatif, avec lesquelles on vient augmenter très localement dans des zones d'intérêt la résolution et donc le coût du calcul, perturbent aussi très fortement l'équilibrage de la charge entre les processus de calcul.

Au niveau du parallélisme à mémoire partagée, l'équilibrage de charge dynamique est aussi un enjeu pour l'obtention des meilleures performances parallèles possibles. Pour les boucles les plus consommatrices en ressources de calcul, les temps de calcul peuvent varier très significativement d'une itération de boucle à l'autre (par exemple, dans une boucle calculant les efforts sur l'ensemble des cellules du sous-domaine, les cellules dans lesquelles le matériau aura plastifié demanderont beaucoup plus de calculs que les cellules pour lesquelles le matériau sera resté dans le domaine élastique). Il faut alors être capable de redistribuer les itérations de boucle entre les fils d'exécution (en anglais *threads*) de manière dynamique et efficace pour ne pas trop impacter les performances parallèles.

---

## Portabilité des performances

Les machines de calcul de l'« ère exascale » (les plus puissantes actuellement) offrent la majorité de leur puissance de calcul au travers de processeurs de calcul dont l'architecture est sensiblement différente de celle des processeurs de calcul des machines de la génération « petascale ». Ces processeurs de calcul (souvent des GPU) nécessitent, pour être exploités efficacement, de traiter en parallèle les mêmes instructions sur de grandes quantités de données. Les codes de calcul qui s'exécutaient de manière relativement efficace sur les machines de la génération « petascale » sont souvent incapables de fonctionner sur de telles architectures sans modifications profondes. Une fois ces codes rendus capables de s'exécuter sur ces architectures, l'exploitation efficace de la puissance de calcul est un gros challenge. On parle de la « portabilité des performances ».

Cet enjeu de portabilité des performances est particulièrement délicat pour les codes de calcul de mécanique des structures. En effet, ce type de parallélisme, dit « vectorisation », est en pratique relativement difficile à mettre en œuvre dans ces codes. L'écriture classique et naturelle d'un code de simulation en mécanique fait intervenir une première boucle sur les cellules du maillage puis, pour chaque cellule, une boucle sur un ensemble de points internes à la cellule appelés points d'intégration. C'est au niveau de chacun de ces points d'intégration que se traduit la physique du problème considérée. C'est ainsi, à ce niveau, que le comporte-

ment du matériau, c'est-à-dire la façon dont il produit des efforts lorsqu'on le déforme, est évalué.

Une écriture « vectorielle » de l'algorithme qui fonctionnerait avec des vecteurs arbitrairement grands (c'est-à-dire qui serait capable d'exploiter un processeur de calcul capable d'effectuer une opération élémentaire sur un nombre arbitraire de données) demanderait d'identifier la suite d'opérations élémentaires intervenant au niveau de chaque point d'intégration, de boucler sur tous les points d'intégration du maillage pour concaténer dans des vecteurs (des plages de mémoire contiguës) les données sur lesquelles ces opérations doivent se faire, et d'appliquer la suite des opérations identifiée sur les vecteurs formés.

Au-delà de la difficulté de mise en œuvre d'une telle procédure (notamment face à la très grande diversité des « physiques » – les lois de comportement – traitées), on voit qu'elle ne permet pas d'introduire facilement des branchements (c'est-à-dire une variation de la suite d'opérations à appliquer en fonction de la valeur calculée d'une donnée). Or, de très nombreux modèles de matériau couramment utilisés impliquent de tels branchements.

### Troisième défi : le couplage multi-physique

Le terme de couplage multi-physiques est utilisé lorsqu'on s'attache à simuler un modèle numérique basé sur différentes équations dont les inconnues sont de natures physiques différentes.

L'interaction fluide-structure est souvent abordée dans le cadre des couplages multi-physiques, même si l'utilisation de ce terme est un peu abusive. En effet, dans le cas de l'interaction fluide-structure, les inconnues pour le fluide et la structure sont similaires et les équations sont fondamentalement les mêmes. Néanmoins, ces équations sont souvent traitées sous des formes différentes et par des approches numériques différentes.

Ces inconnues de natures physiques différentes peuvent être définies sur les mêmes domaines, ou sur des domaines adjacents. Par exemple, dans le cas d'un couplage thermomécanique, les inconnues cinématiques propres à la mécanique et l'inconnue de température propre aux transferts thermiques sont définies sur l'ensemble de la pièce considérée. Les échanges d'informations entre les deux physiques se font alors dans le volume. Dans le cas de l'interaction fluide-structure, les inconnues relatives au fluide et celles relatives à la structure sont définies sur les domaines adjacents. Les échanges d'informations nécessaires à la résolution du problème couplé se font alors au niveau de l'interface entre le fluide et la structure.

---

### Cadre générique pour les problèmes de couplages multi-physiques

Une manière relativement générique d'aborder les méthodes numériques pour la résolution du problème multi-physique est la suivante :

- Ordonner les inconnues et les équations du problème : Si  $m$  physiques différentes sont impliquées avec  $n_p$  équations pour la physique  $p$ , on note  $U_k^p$  l'inconnue  $k$  de la physique  $p$ , et l'ensemble des inconnues sont ordonnées de la manière suivante :

$$U_1^1, U_2^1, \dots, U_{n_1}^1, U_1^2, U_2^2, \dots, U_{n_2}^2, \dots, U_{n_m}^m$$

Au final,  $n$  inconnues sont introduites. L'hypothèse est faite d'une égalité entre les nombres d'équations et d'inconnues pour chacune des physiques ;

- écriture de l'ensemble des équations discrètes du problème pour toutes les physiques sous forme de « résidu » à annuler :

$$R_i(U_1, U_2, \dots, U_n) = 0;$$

- dérivation de chacune de ces fonctions par rapport à chacune des inconnues du problème. On obtient une matrice  $J$  dite matrice jacobienne pour laquelle le terme  $(i, j)$  est la dérivée de l'équation  $R_i$  par rapport à l'inconnue  $U_j$ . On peut considérer le bloc  $J^{[p,q]}$  qui est la restriction de la matrice aux équations de la physique  $p$  et aux inconnues de la physique  $q$  ;
- dans le cas où toutes les équations du problème sont linéaires, cette matrice ne dépend pas des inconnues et la résolution du problème couplé se traduit par une résolution d'un système linéaire dont la matrice est  $J$ . Dans le cas où certaines équations sont non linéaires, on utilise une méthode itérative qui procède par linéarisations successives des équations, et repose donc également sur la matrice  $J$  ;
- dans les cas linéaire et non linéaire, un grand nombre d'algorithmes de résolution du problème multi-physique peuvent se formuler par des choix d'approximation de la matrice  $J$ . La tendance générale est que plus l'approximation  $\tilde{J}$  de la matrice  $J$  utilisée est « grossière », plus la méthode itérative de résolution convergera lentement, voire ne convergera pas.

Pour un problème faisant intervenir différentes physiques, on dispose souvent, pour chacune de ces physiques, d'un code de calcul permettant de la traiter spécifiquement. On peut alors procéder itérativement, une physique à la fois, en figeant les inconnues associées à toutes les autres physiques qui n'influent alors sur la physique courante que *via* des termes sources ou des conditions aux limites définis à



partir des valeurs figées. On itère alors sur les physiques jusqu'à obtenir une convergence de toutes les inconnues du problème. Cette approche est typiquement mise en œuvre pour la réalisation de couplage en physique des réacteurs nucléaires impliquant la simulation des interactions entre la mécanique des structures, la thermohydraulique du fluide et la neutronique.

Cette approche a le principal avantage d'être très facile à mettre en œuvre et d'être très peu intrusive (ne demande pas d'adaptation) dans les codes de calcul. Cependant, elle peut se formaliser *via* une matrice  $\tilde{J}$  dans laquelle :

- Tous les blocs hors diagonaux  $J^{[p,q]}$ ,  $p \neq q$  sont négligés ;
- tous les blocs diagonaux, sauf celui de la physique courante, sont remplacés par  $\infty \cdot I$ .

Une telle matrice  $\tilde{J}$  peut, en pratique, être une très mauvaise approximation de la matrice  $J$ , ce qui fait que ces approches étagées mettent, en pratique, très longtemps à converger, voire ne convergent pas. Par ailleurs, lorsqu'on parvient à atteindre une convergence, les temps de calcul sont parfois très importants.

Lorsqu'on ne parvient pas à obtenir une convergence, on peut utiliser des techniques dites de relaxation qui améliorent la capacité de l'algorithme à converger, mais ralentissent encore la vitesse de convergence. On peut aussi parfois améliorer significativement la vitesse de convergence de ces approches en utilisant des techniques d'accélération de convergence [9].

---

### Vers le couplage monolithique

Lorsque, pour un couplage donné, les propriétés de convergence de l'approche étagée décrite précédemment ne sont pas satisfaisantes, on peut adopter une approche dite monolithique dans laquelle l'ensemble des inconnues du problème peuvent évoluer à chaque itération de l'algorithme de résolution. Dans ce cas, on utilise la matrice  $J$  exacte ou une approximation dans laquelle, entre autres, les blocs hors diagonaux ne sont plus négligés.

Cette approche peut fournir des propriétés de convergence bien supérieures à l'approche étagée. Il faut cependant noter que l'utilisation d'une matrice la plus proche possible de  $J$  ne garantit pas forcément la meilleure capacité à converger. Dans certains cas, on ne parvient pas à la convergence avec la matrice  $J$  exacte, alors qu'on y parvient avec une approximation bien choisie (mais avec une vitesse de convergence non optimale).

L'inconvénient principal de cette approche monolithique est qu'elle est beaucoup plus délicate à mettre en œuvre que l'approche étagée, car il faut être capable d'assembler la

matrice  $J$  (ou une approximation) qui comporte l'influence de chaque physique sur les autres. Deux voies se dessinent alors :

- Disposer d'un code de calcul qui traite l'ensemble des physiques en jeux. Il est alors possible de calculer les blocs hors diagonaux et assembler la matrice du système couplé en interne à ce code ;
- étendre les capacités des codes de calcul à exporter les blocs hors diagonaux qui concernent les équations de leur physique propre permettant ainsi d'assembler la matrice du système couplé *via* un programme maître en charge d'appeler les différents codes de calcul et construire la matrice à partir de leurs sorties.

Le code de calcul de nouvelle génération MANTA dédié à la mécanique des structures et de leurs interactions adopte la première voie dans le cas de la mécanique des fluides compressibles non visqueux et des transferts thermiques. Pour les autres physiques (mécanique des fluides incompressibles et visqueux, neutronique...), MANTA a pour objectif de se doter de capacités de simulation simplifiées afin d'évaluer la pertinence de couplage monolithique avec ces physiques.

Pour la seconde voie, une harmonisation des pratiques logicielles entre codes « métiers » à coupler est un prérequis, reposant sur le partage d'un formalisme normalisé de supervision et d'échange de données commun permettant de communiquer les blocs hors diagonaux à un programme maître.

### Les outils de simulation : situation actuelle et perspectives

Le code de calcul donne accès à la simulation numérique de phénomènes physiques modélisés par des équations mathématiques et discrétisés par des méthodes numériques (comme celle des éléments finis). Il matérialise ainsi le pilier central du triptyque modélisation-simulation-expérimentation. Le codage associé à la mécanique numérique peut être considéré comme une science à part entière, tout comme la physique qu'il décrit, et les codes de calcul en sont en conséquence la réalisation scientifique et technique.

---

### Forces et limitations des codes patrimoniaux

Le CEA a compris très tôt l'intérêt stratégique de disposer de ses propres outils de simulation pour l'analyse et le dimensionnement des structures mécaniques dans le nucléaire et au-delà. Pour le calcul de structures, **il s'agit des codes de calcul Cast3M (simulation en implicite) et EUROPLEXUS (simulation en explicite).**

En 1983, le projet CASTEM (ancien nom de Cast3M) avait su absorber de multiples briques logicielles dédiées à des applications spécifiques. Fondés autour de principes stricts (orthogonalité, visibilité, régularité et documentation des processus), ses objectifs de généralité, de qualité et d'adaptabilité aux problèmes de l'utilisateur lui ont permis de grandes réalisations pour en faire un lieu de capitalisation du savoir et du savoir-faire en simulation mécanique.

Aujourd'hui, **le code de calcul aux éléments finis Cast3M** [10] est un outil complet, fournissant des fonctionnalités de maillage, résolution et post-traitement intégrées, presque sans aucune dépendance externe. Il se distingue des codes commerciaux par un accès au code source et la possibilité laissée à l'utilisateur d'écrire son propre problème à partir d'un ensemble de briques élémentaires.

Ces forces sont aussi des faiblesses. En effet, la grande souplesse de Cast3M est possible au détriment des performances calculatoires. Typiquement, les pré et post-traitements, ainsi que l'architecture logicielle, ne permettent pas de répondre aux nouvelles exigences en termes de capacités prédictives des simulations numériques de structures complexes impliquant l'utilisation d'environnements informatiques de type HPC et la parallélisation associée (notamment en mémoire partagée).

De son côté, développé à partir des années 1980 par le CEA, **le code EUROPLEXUS** [11] se focalise sur la résolution des phénomènes transitoires rapides (cf. focus p. 25). Un code spécifique peut se justifier par l'observation que l'intégration temporelle explicite impose de petits pas de temps et, *in fine*, une contrainte forte sur la performance du code.

Tout comme Cast3M, EUROPLEXUS est un code abouti, robuste et validé sur un périmètre plus large que les applications du CEA. Bien qu'opérationnel sur certaines fonctionnalités du code, le parallélisme souffre d'un historique de programmation et de structures de données non adaptées qui pénalise les performances, notamment en termes de consommation de mémoire.

### **Unification implicite/explicite et objectifs futurs**

Les codes de calcul Cast3M (implicite) et EUROPLEXUS (explicite) ont des fondements communs et beaucoup d'éléments de l'un se retrouvent chez l'autre, que ce soit dans la formulation des éléments (formulation solide, coque et poutre, interpolation, intégration numérique), les modèles et lois de comportement, les méthodes numériques et leur résolution (assemblage des efforts, contrainte par multiplicateur de Lagrange, condensation statique...).

C'est sur la base de ce constat, associé aux besoins de disposer d'une architecture logicielle « HPC compatible » dans le cadre d'une approche unifiant implicite et explicite, qu'est

né MANTA (*Mechanical Analysis Numerical Toolbox for Advanced Applications*) [12], code de mécanique de nouvelle génération du CEA dont le développement a démarré en 2022. Dans ce contexte, MANTA a pour ambition de bâtir le futur des simulations en mécanique des structures permettant d'adresser l'ensemble des enjeux et défis numériques décrits précédemment. Ses objectifs sont les suivants :

- Réalisation de simulation multi-échelle en temps et en espace : intégration temporelle implicite et explicite, approches fréquentielles, adaptation automatique de maillage... ;
- réalisation de simulation multi-physique : structure, fluide, thermique... et leur interaction ;
- mise à disposition d'un large spectre de formulation : éléments finis volumiques, de type coque et poutre, volumes finis pour les fluides, Galerkin discontinu... ;
- capacité de gérer des physiques complexes : non-linéarités matériaux, géométriques, conditions de contact, interaction fluide-structure, ajout/enlèvement de matière, dégradation de type endommagement, rupture ou usure... ;
- optimisation des performances de calcul tant en environnement HPC (architecture massivement parallèle) que sur un PC portable ;
- adaptation à toute nouvelle problématique : nouvelle physique, formulation, discrétisation ou algorithme ;
- accessibilité à l'utilisateur (interface Python) dans l'esprit « *toolbox* » et au développeur (C++) ;
- ouverture vers la communauté : l'*open source* et l'utilisation de plateformes de développement permettent une interaction forte avec le monde académique et d'autres organismes de recherche.

En particulier, la performance de simulations complexes (fortement non linéaires et possiblement couplées) est un défi que MANTA cherche à relever tout en conservant la vocation de code généraliste de ses prédécesseurs. Il est en effet aujourd'hui possible de profiter de supercalculateurs permettant d'envisager des modèles de taille très significative, nécessaires pour certaines applications. L'architecture logicielle de MANTA a été pensée avec ces objectifs et dans un environnement informatique moderne.

---

## Architecture logicielle

Le contexte nucléaire impose de disposer d'un code de référence, validé et pérenne. Cela implique d'adopter une méthodologie de développement à long terme reposant sur les principes suivants : modularité, factorisation, accessibilité.

### Principe de modularité

Le code MANTA s'autorise l'usage modulaire de composants externes. La modularité réfère ici à la capacité du code à remplacer un composant par un autre pour une fonctionnalité donnée. Cette agilité permet d'assurer au code sa longévité *via* un renouvellement aisé des composants externes et une facilité à évoluer vers des outils plus récents, sans être piéds et poings liés à l'un d'entre eux. Cela a deux conséquences sur la conception logicielle :

1. Les composants et bibliothèques externes ne doivent être appelés que par le biais d'interfaces bien définies et limitées ;
2. les fonctionnalités des composants externes doivent être utilisées de façon « atomique » (la plus élémentaire possible). Cela assure un remplacement potentiel aisé en cas de non-satisfaction. Par exemple, l'utilisation de la bibliothèque PETSc est restreinte à l'appel aux fonctions de résolution du système linéaire distribué.

### Principe de factorisation

La factorisation consiste à contraindre toute succession de commandes constituant une partie d'un algorithme ou un algorithme à n'apparaître qu'une seule fois dans le code. Cette exigence de développement constitue une clé permettant d'assurer la maintenance et l'évolutivité à long terme de MANTA. *In fine*, cela se traduit par un objectif de ratio élevé entre le nombre de fonctionnalités et le nombre de lignes. Ceci implique :

1. **La factorisation des méthodes numériques.** Lors du développement de nouvelles fonctionnalités, un effort est nécessaire afin d'extraire les méthodes élémentaires qui peuvent être généralisées pour être compatibles avec d'autres fonctionnalités, dans d'autres contextes. Ainsi, une méthode générique (*pipeline*) a été pensée pour assembler les contributions des maillages distribués au système global (sous forme de champs, matrices élémentaires...);
2. **la factorisation du code source.** Ce point est lié aux bonnes pratiques de développement. Il vise à avoir le meilleur compromis entre la performance, la factorisation et la lisibilité du code.

### Principe d'accessibilité

L'objectif est de rendre accessible le code à tout développeur, en y faisant abstraction des aspects HPC ou des

subtilités du langage de programmation, afin qu'il puisse y intégrer, à moindre effort, son modèle ou sa méthode numérique.

À cette fin, MANTA repose sur trois couches :

1. La couche cœur (*core layer*). Elle contient tous les processus de parallélisation liés aux manipulations d'objets, de manière que toutes les méthodes numériques s'appuyant dessus puissent en profiter et tirer parti des performances liées au parallélisme. Y est donc notamment défini le *pipeline* générique mentionné précédemment. On trouve également, dans la couche cœur, de nombreux autres services facilitant l'implémentation de méthodes numériques : manipulation de maillage, algèbre dense, champs, fonctions de forme, outils géométriques, gestion des configurations pour les méthodes lagrangienne... Ces fonctions sont indépendantes des modèles physiques utilisés ;
2. la couche modélisation (*modelling layer*). Y sont développées les méthodes numériques propres aux modélisations en s'appuyant sur les fonctions de la couche cœur, par exemple : la définition des éléments finis ou des volumes finis, les schémas d'intégration temporelle explicite ou implicite, ou encore un modèle de fluide compressible. Le développement est réalisé en faisant abstraction de l'aspect parallèle ;
3. enfin, la couche d'interface utilisateur (*end user interface*) est une API de haut niveau écrite en C++ avec un miroir Python, qui permet de réaliser les étapes classiques d'une simulation en peu de commandes, ce qui minimise les risques de mauvaise utilisation.

La figure 261 représente une vue simplifiée de l'architecture logicielle de MANTA. En italique apparaissent les fonctions prévues, mais non implémentées à date.

## Conclusion

Dans le domaine de la mécanique des structures, la simulation numérique est de plus en plus attendue dans ses capacités à prédire le comportement multi-échelle, pluritemporel et multi-physique de composants industriels sous sollicitations complexes :

- **multi-échelle** afin de décrire le comportement global du système tout en accédant aux phénomènes locaux de sorte à analyser et démontrer le niveau d'intégrité structurale ;
- **pluritemporel** renvoyant à la nécessité d'activer des phénomènes physiques pilotés par des temps caractéristiques différents parfois de plusieurs ordres de grandeur ;

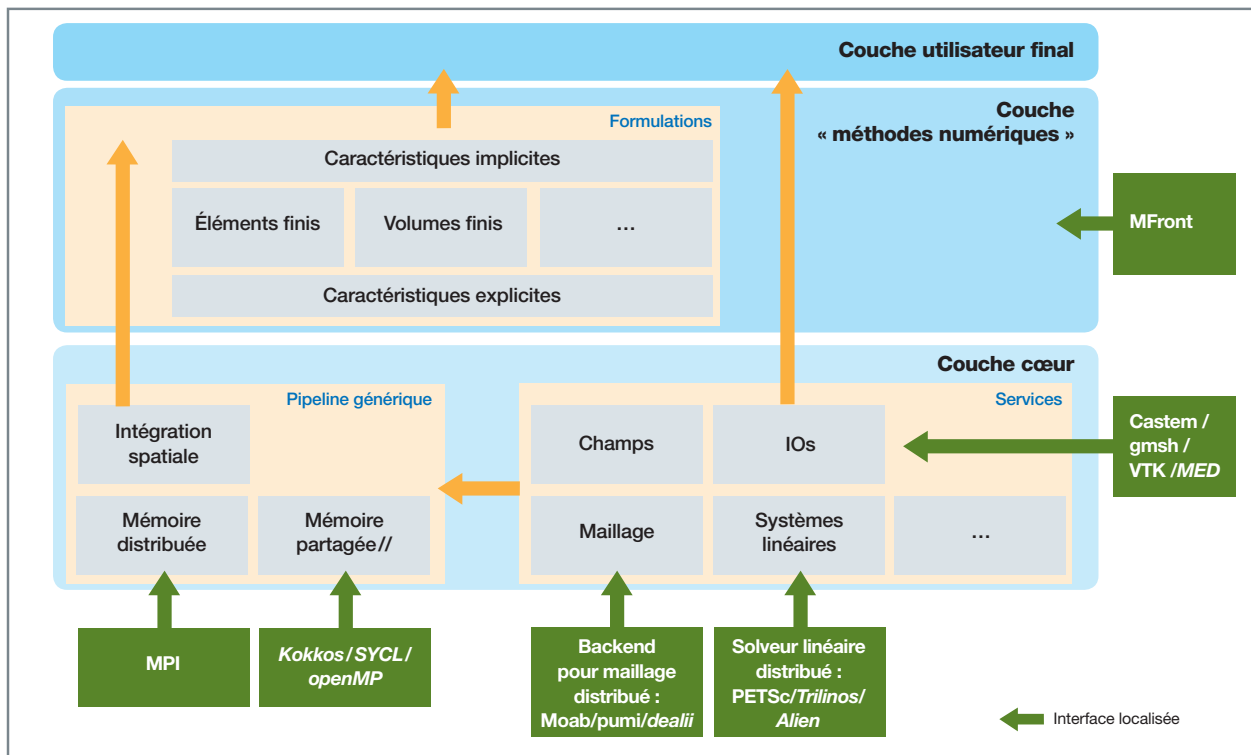


Fig. 261. Architecture simplifiée du code de calcul en mécanique de nouvelle génération MANTA.

- **multi-physique** afin de décrire le comportement mécanique de la structure étudiée dans un contexte d'interaction forte avec les autres disciplines en jeu (thermique, neutronique, hydraulique...).

Les enjeux de prédictivité ouvrent alors une somme de défis numériques qui relèvent de domaines de recherche aussi vastes que les méthodes numériques et leur robustesse, la performance de calcul avec comme prérequis l'adaptation aux architectures informatiques de type HPC, le couplage multi-physique avec le besoin de disposer d'une architecture logicielle adaptée.

Ces défis se matérialisent depuis plusieurs décennies dans le développement de codes de calcul. En mécanique, il s'agit des codes patrimoniaux Cast3M, EUROPLEXUS et de l'outil de nouvelle génération MANTA, dont le développement est motivé par une exigence de capitalisation des savoirs dans chaque domaine précité en se plaçant dans une logique de simulation haute-fidélité.

**Olivier JAMOND, Olivier FANDEUR, Benoit PRABEL,  
Stanislas DE LAMBERT, Nicolas LELONG,  
Sophie BOREL-SANDOU et Jean-Charles LE PALLEC,**  
*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*

#### ► Références

- [1] IRSN, *Les accidents de fusion du cœur des réacteurs nucléaires de puissance – Comportement des enceintes de confinement*, chapitre 6, [https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/larecherche/publications-documentation/collection-ouvrages-irsn/14\\_LAG\\_chap06.pdf](https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/larecherche/publications-documentation/collection-ouvrages-irsn/14_LAG_chap06.pdf), 2013.
- [2] CEA, « L'impression 3D au cœur des grandes transitions », *Clefs CEA*, n° 72, [https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/larecherche/publications-documentation/collection-ouvrages-irsn/14\\_LAG\\_chap06.pdf](https://www.irsn.fr/sites/default/files/documents/larecherche/publications-documentation/collection-ouvrages-irsn/14_LAG_chap06.pdf), 2021.
- [3] G. GIBERT, *Propagation de fissures en fatigue par une approche X-FEM avec raffinement automatique de maillage*, thèse de doctorat, université de Lyon, 2019.
- [4] L. D. SIEDE, « Schéma de résolution locale pour la méthode *Hybrid High Order* et application en mécanique non linéaire », Colloque national en calcul des structures (CSMA), 2022.
- [5] M. POTIER-FERRY, *Méthodes asymptotiques numériques*, collection « Revue européenne des éléments finis », volume 13, Hermès-Lavoisier, 2004.
- [6] Q. CARADEC, "Finite element simulation of high cycle fretting wear using an implicit adaptive cycle jump", *WEAR*, 2023.
- [7] CNRS, G. C., <https://calcul.math.cnrs.fr/2019-06-precision-num.html>, 2019.
- [8] CEA, *Les sciences du numérique et calcul haute performance. Monographie du nucléaire*, 2020.



[9] I. RAMIÈRE and T. HELFER, "Iterative residual-based vector methods to accelerate fixed point iterations", *Computers & Mathematics with Applications*, 70(9), 2210-2226, 2015.

[10] Cast3M, <http://www-cast3m.cea.fr>, 2023.

[11] EUROPLEXUS, <http://www-epx.cea.fr>, 2023

[12] O. JAMOND, « MANTA : un code HPC généraliste pour la simulation de problèmes complexes en mécanique », Colloque national en calcul des structures (CSMA), 2023.





## Les défis de l'expérience

### Contexte et conduite actuelle des essais de structures

Malgré tous les progrès réalisés par les méthodes numériques, les solveurs et le traitement des données, il demeure toujours une étape cruciale qui consiste à valider par l'expérience les méthodes et critères d'intégrité des structures. L'objectif est aujourd'hui une représentativité et une précision des mesures toujours plus grandes.

À l'heure actuelle, la mise en place de ces démonstrations expérimentales peut se découper en deux grandes étapes. La première consiste à mettre en œuvre des idées ou concepts innovants, se rapprochant de plus en plus des démonstrations en configuration réelle. On entend par là mettre en œuvre des environnements représentatifs pour les études sur les impacts des séismes ou des chargements complexes où, par exemple, la thermique se superpose à des chargements mécaniques ; tout cela appliqué à des éprouvettes représentatives des structures, tant en termes de complexité géométrique que de dimensions proches de l'échelle 1 [1].

Lors de cette première étape, le processus de conception a besoin des données de caractérisation du ou des matériaux utilisés. Dans le cas où les données matériaux ne sont pas disponibles, il peut s'avérer nécessaire de définir dans quel domaine l'obtention de ces données matériaux est indispensable (voir fig. 262).

La seconde étape consiste en la conduite de l'essai. Cette étape est réalisée avec seulement quelques éléments ou informations expérimentales ponctuelles. On peut citer comme éléments : les jauges de déformations, des capteurs de déplacements linéaires ou des mesures de pression globale. Cette instrumentation permet de contrôler la bonne conduite de l'essai selon un schéma prédéfini dans la première étape. Classiquement, les essais sont conduits jusqu'à la ruine de l'éprouvette afin d'être objectivement sûr d'avoir obtenu le maximum de données expérimentales.

Une fois l'essai « structure » effectué, les données expérimentales sont consolidées et une interprétation numérique est entreprise. Celle-ci est généralement une amélioration conséquente de la première étape. Il s'ensuit une analyse des données expérimentales confrontées aux résultats de l'interprétation numérique (voir fig. 263).

À partir de cette confrontation entre données expérimentales et interprétation numérique, des conclusions et recommandations peuvent être proposées et discutées. À titre d'exemple, une confrontation entre l'évolution d'un capteur de déplacement ponctuel par rapport à l'effort appliqué sur la structure est comparée à l'estimation de cette évolution *via* des simulations numériques (voir fig. 264). De cette comparaison, on peut conclure que la simulation reproduit assez correctement les observations expérimentales. L'utilisation des simulations numériques validées permet de définir des grandeurs non mesurables ou à des localisations non instru-

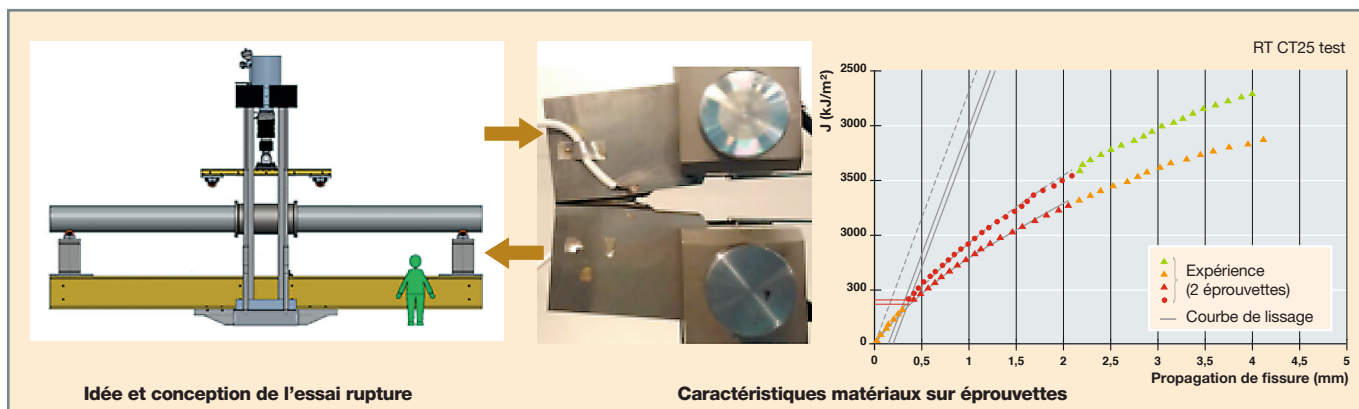
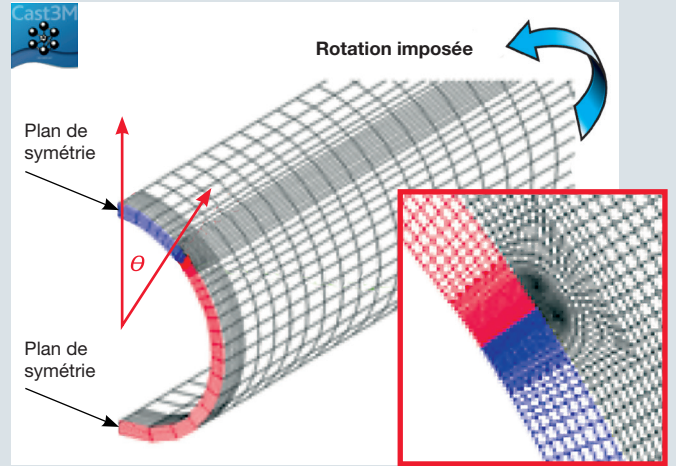


Fig. 262. Première étape : la mise en place de moyens expérimentaux avec des caractéristiques matériaux obtenues sur des éprouvettes standardisées.



Réalisation des essais structures



Interprétation numérique des essais

Fig. 263. De la réalisation de l'essai à l'interprétation numérique des essais de structures, de l'amont à l'aval.

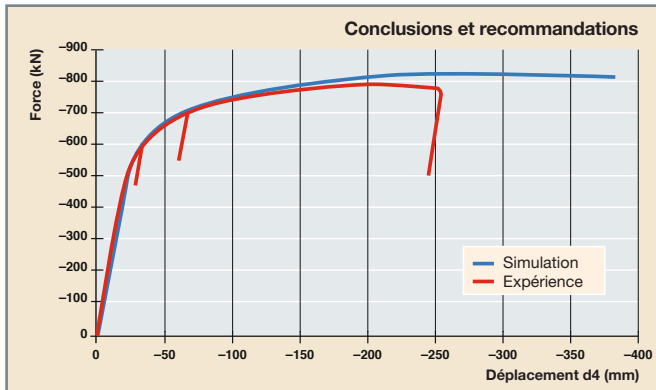


Fig. 264. Processus de comparaison de résultats entre les données expérimentales et les estimations issues du modèle numérique.

mentées, afin de valider et tester des méthodes d'analyse d'intégrité des composants. À titre d'illustration, les simulations numériques permettent de déterminer l'énergie en pointe de fissure, paramètre permettant d'estimer la propagation de celle-ci, mais non mesurable « physiquement ».

La démarche actuelle est principalement fondée sur un processus itératif avec peu de retours d'information d'une séquence à l'autre. Ainsi, les moyens expérimentaux sont dimensionnés à partir des données matériaux disponibles, puis les essais sont réalisés suivant un protocole préalablement établi. Les conclusions et recommandations sont ensuite tirées des interprétations numériques effectuées postérieurement.

## Les défis de l'expérience dans les démonstrations expérimentales

Lors de la première étape, dans la phase de pré-dimensionnement, il est nécessaire d'avoir le maximum de données matériaux disponibles dans le domaine où celui-ci sera sollicité. Cela peut nécessiter de réaliser des campagnes d'essais extrêmement longues et de grande ampleur. Un des premiers défis de l'expérience porte sur la mise en place de moyens expérimentaux permettant d'obtenir, à partir d'un seul essai, une multitude de paramètres identifiés pour les lois de comportement des modèles numériques. On pourra se référer au paragraphe décrivant l'obtention des lois de comportement sur le dispositif IMEC (voir p. 28).

La complexité croissante des essais de validation expérimentale des critères et méthodes d'intégrité amène à relever un second défi de l'expérience : mettre en œuvre un dialogue de plus en plus réactif entre la conduite de l'essai et les simulations de celui-ci afin d'assurer un pilotage et un contrôle fin des essais d'intégrité de structures.

Au travers de deux exemples, nous allons entrevoir la richesse que ce type de dialogue peut apporter.

## Les essais hybrides appliqués aux études sur les conséquences des séismes

Les essais hybrides correspondent à des analyses dans lesquelles tout ou partie d'une structure est modélisée et où seule la zone « critique » étudiée est testée en bénéficiant de l'environnement réaliste obtenu par calculs. En mécanique des structures, et plus particulièrement au CEA, un des objectifs est de développer et valider les méthodologies et



les outils nécessaires à la réalisation d'essais sismiques hybrides, en temps réel, sur la plateforme expérimentale TAMARIS.

Comme indiqué précédemment, réaliser un essai hybride peut être utile lorsque seule une partie de la structure est intéressante à tester et que le reste de la structure est connu et modélisable numériquement. Le concept d'un essai hybride est alors de séparer la structure complète en une sous-structure expérimentale ou physique (SSP), testée, et une autre sous-structure numérique (SSN), calculée. Les efforts d'interaction entre les deux sous-structures sont appliqués à l'aide d'actionneurs hydrauliques (cas des efforts élevés) ou électrodynamiques (cas des efforts faibles). L'introduction de la SSN dans un essai permet donc d'augmenter les capacités d'une installation (ou/et de réduire les coûts), mais la SSN crée aussi de nouvelles contraintes et sources d'erreur pour l'essai : temps réel, erreurs numériques et de mesures pour le calcul de la SSN, erreurs sur le contrôle de la SSP. Les essais hybrides sont encore au stade de la recherche, notamment pour diminuer les erreurs identifiées, parmi lesquelles les erreurs expérimentales sont les plus importantes : erreur de contrôle de l'actionneur, de mesure et de numérisation. Les erreurs numériques sont liées aux hypothèses et approximations faites (e.g. schémas d'intégration en espace et en temps, comportement des matériaux constitutifs...).

Une campagne expérimentale HYCAR (essais hybrides sur une structure en béton armé) a été menée et elle a permis de quantifier les erreurs entre un essai hybride et un essai de référence, et montrer ainsi la capacité du laboratoire à réaliser des essais hybrides dynamiques sur table vibrante et sur une structure non linéaire (voir fig. 265). Les aspects liés au calcul de la sous-structure numérique ne constituent pas un

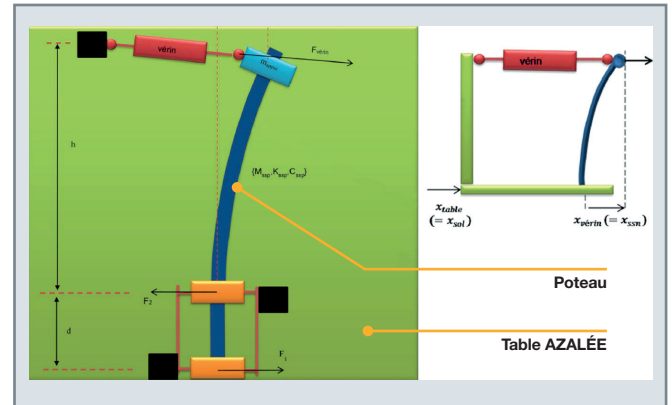


Fig. 266. Principe des essais hybrides réalisés.

objectif important dans cette campagne, l'objectif étant plus de se concentrer sur les aspects expérimentaux qui constituent, pour l'instant, le défi le plus important [2].

Grâce à une stratégie d'essai hybride, il a été possible de réaliser plusieurs essais dynamiques sur une structure de type portique en béton armé en ne testant sur la table vibrante AZALÉE, qu'un seul des quatre poteaux en béton armé de  $0,2 \times 0,4$  m de section (voir fig. 266).

Après une phase expérimentale et numérique de mise au point, deux spécimens de ce poteau, dont les premières fréquences propres étaient de 2,2 Hz et 6,6 Hz, ont été testés à l'échelle 1. Plusieurs essais sismiques ont été effectués afin d'évaluer les performances des essais hybrides pour une large gamme de déplacements, vitesses, accélérations et forces.

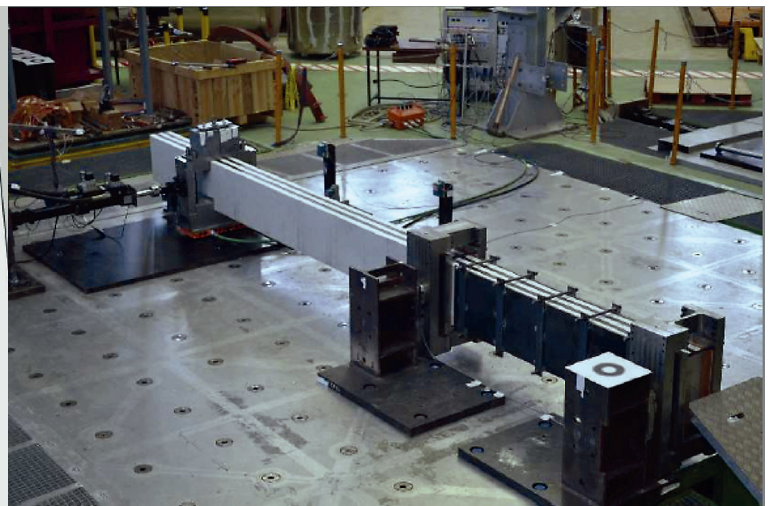
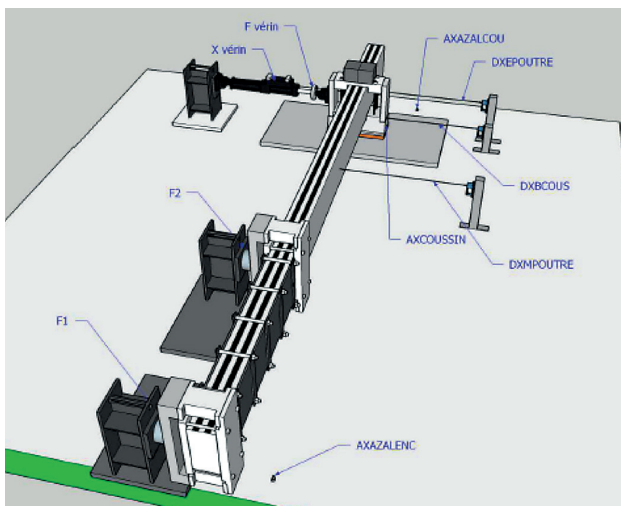


Fig. 265. Configuration d'un essai hybride (HYCAR).

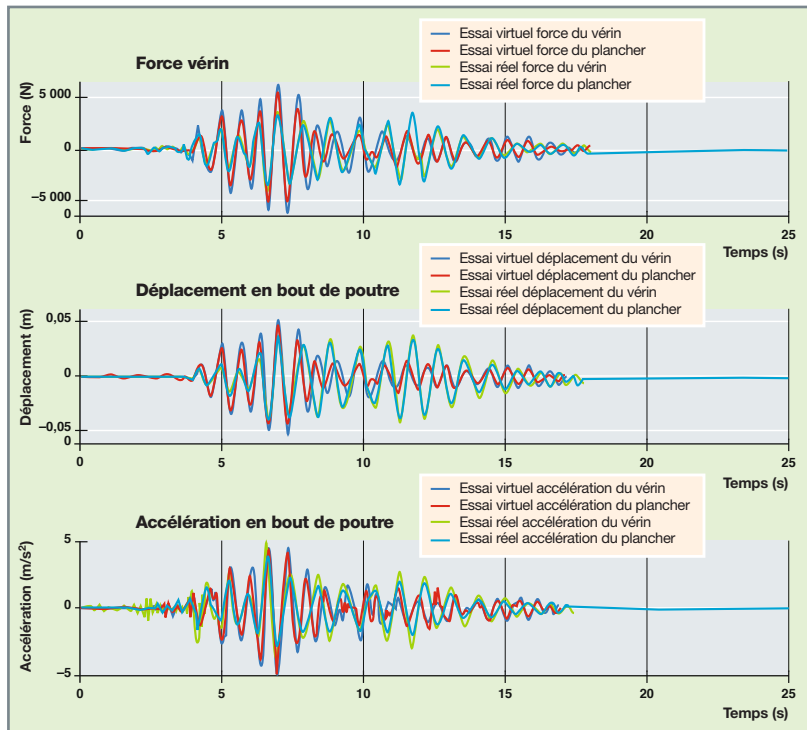


Fig. 267. Comparaisons temporelles entre les essais réels HYCAR et les essais hybrides.

Afin de vérifier la qualité de ces essais, il a aussi été réalisé deux essais de référence pour lesquels le reste du portique était physiquement testé en le supposant équivalent à une masse (celle correspondant à un quart du plancher du portique). Dans l'essai de référence, une masse glissante était donc fixée au poteau tandis que, dans l'essai hybride, à chaque milliseconde, l'accélération de la masse était tout d'abord calculée à partir de la mesure de force puis appliquée à la poutre par l'intermédiaire d'un vérin embarqué sur la table vibrante AZALÉE [3].

Tous les essais hybrides effectués ont été stables, les fréquences et les signaux temporels entre les essais hybrides et de référence sont très proches, même pour un fort endommagement du poteau en cours d'essai (voir fig. 267). Des non-linéarités similaires en début et en fin d'essai ont aussi pu être observées. L'erreur entre les essais de référence et hybrides a été quantifiée à l'aide du travail cumulé de la force d'interaction entre le poteau et la masse du plancher : pour les trois essais sismiques réalisés, l'erreur totale maximale sur le travail cumulé de la force est de 12,4 %. Des simulations ont raisonnablement permis de penser que, sur cette erreur, seul un tiers est imputable à la technique hybride, donc moins de 5 %. De ces 5 % restants, il a été identifié que la majorité provient d'une erreur de contrôle créée par la force dans le vérin et des solutions pour minimiser cette

erreur seront donc testées dans les prochaines années.

Cette campagne expérimentale a donc permis de démontrer la capacité du laboratoire à réaliser des essais hybrides dynamiques sur table vibrante et sur une structure non linéaire. Elle a aussi permis de mettre au point des protocoles d'essais hybrides et d'identifier les difficultés principales de mise en œuvre [4].

L'efficacité de la technique hybride ayant été démontrée et quantifiée dans les conditions de la campagne expérimentale HYCAR présentée ci-dessus, les prochains essais hybrides pourraient être réalisés sans utiliser une maquette de référence qui contraint l'essai à des configurations simples. Il sera alors possible de tester des configurations d'essais hybrides plus complexes, comme celles mettant en œuvre plusieurs degrés de liberté de sollicitation (donc plusieurs vérins) et un modèle numérique de structure plus évolué (non linéaire, avec plus de degrés de libertés) [5].

rique de structure plus évolué (non linéaire, avec plus de degrés de libertés) [5].

### Les essais de structures pour les démonstrations de sûreté des composants

Un autre exemple d'illustration des défis de l'expérimentation porte sur la conduite des essais de structures pour les démonstrations de sûreté des composants. Lors de la phase de dimensionnement, un des dommages contre lequel il faut se prémunir est le phénomène de déformation progressive. Ce dommage se caractérise par l'accumulation de déformation permanente lorsque la structure est soumise à un chargement cyclique [6].

Cependant, deux cas peuvent se présenter :

- Après quelques cycles, la déformation permanente ne croît plus ;
- la déformation globale permanente continue de croître, chaque cycle de chargement entraîne un supplément de déformation et la structure s'éloigne progressivement de sa forme initiale. C'est ce comportement de déformation progressive qu'il faut proscrire.

Dans les référentiels de conception, il existe des critères à vérifier pour éviter ce phénomène, mais ceux-ci sont fondés

sur des considérations très simples et ils sont extrêmement conservatifs, voire non représentatifs de la réalité. La mise en place d'essais de structure permet d'améliorer significativement les critères tout en restant suffisamment conservatif afin de préserver la sûreté des composants [7].

Être capable de réaliser un seul essai qui permettrait d'estimer les limites du domaine de validité des critères constitue un des défis de l'expérience. Cela passe par l'instauration d'un dialogue essais/calculs de plus en plus réactif afin d'assurer un pilotage fin des essais.

Reprenons l'exemple de l'étude du critère de déformation progressive : une éprouvette avec une géométrie représentative est soumise à des chargements cycliques thermomécaniques. Les moyens de mesure de déplacement, tels que la stéréo-corrélation, peuvent être utilisés afin d'obtenir, entre chaque cycle de chargement, l'évolution des déplacements (voir fig. 268). À partir de ces informations mesurées, les déformations permanentes sont déterminées (voir fig. 269). Des simulations numériques sont entreprises afin de conforter l'évolution des déformations observées et d'estimer quelle sera leur évolution en fonction des modifications du pilotage de l'essai [8].

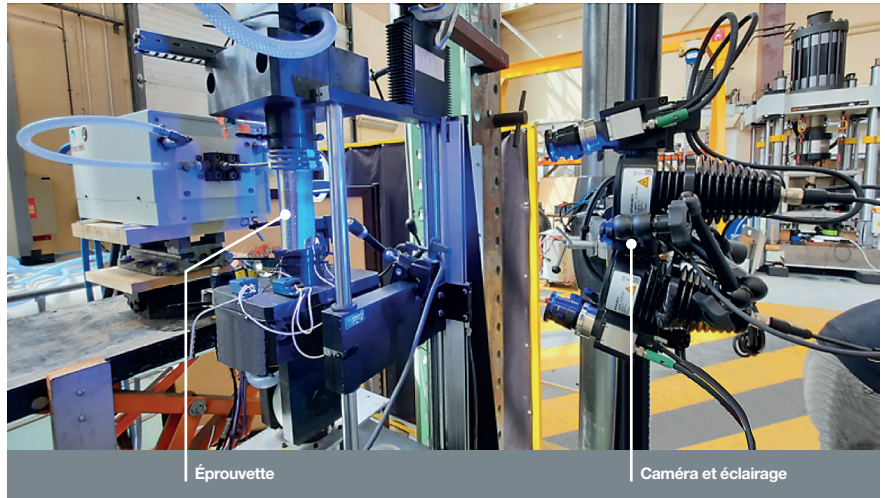


Fig. 268. Un exemple d'un dialogue essais/calculs : étude du phénomène de déformation progressive sous un chargement thermomécanique sur une géométrie tubulaire.

L'évolution du phénomène de déformation progressive prédit est vérifiée par la réalisation de cycles de chargement de consolidation et, une fois le niveau de déformation permanente estimé et validé expérimentalement, de nouveaux cycles de chargement peuvent être appliqués de manière croissante, mais contrôlée (c'est-à-dire suffisamment croissante, mais sans être trop importante, ce qui amènerait à la ruine de l'éprouvette). Cette succession de chargements définis par un dialogue calculs/essais permettra alors de réaliser plusieurs niveaux de sollicitation et ainsi d'obtenir plusieurs points expérimentaux validant les critères et leur domaine de validité (voir fig. 270).

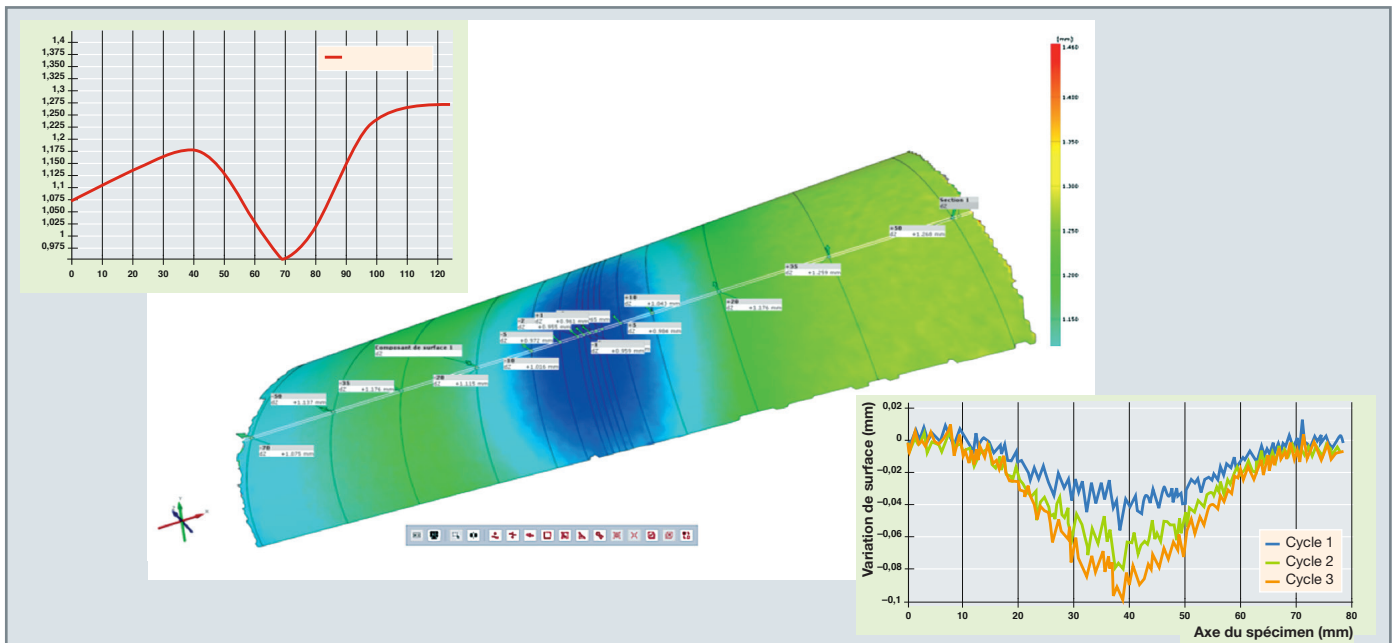


Fig. 269. Analyse et interprétation des données expérimentales à chaque cycle de chargement pour modifier/ajuster les conditions expérimentales en cours d'essai.

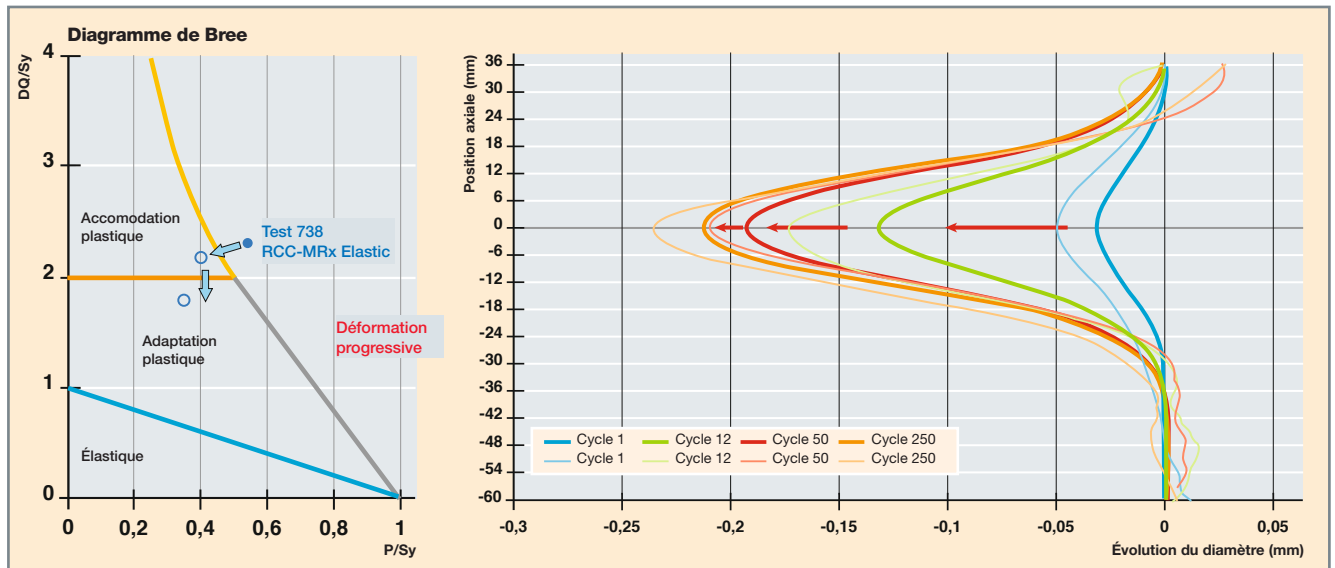


Fig. 270. Capacité de réaliser plusieurs configurations permettant d'identifier un critère avec un seul essai.

## Les évolutions expérimentales

Au-delà des exemples présentés précédemment, concernant la conduite de démonstration expérimentale de sûreté, on peut noter que les défis portent sur la façon d'alimenter correctement les modèles numériques de plus en plus complexes par l'identification de paramètres des lois de comportement, tout en réduisant le nombre d'essais de caractérisation nécessaires à cette identification.

En s'appuyant sur des systèmes de mesures performants (stéréo-corrélation d'images, profilométrie laser, etc.), il est possible d'obtenir de plus en plus de données expérimentales durant la conduite d'essais et celles-ci peuvent être utilisables pour réaliser des simulations à l'aide de calculs par éléments finis et entrer dans une boucle d'interaction avec la conduite de l'essai.

En effet, les solveurs de calculs par éléments finis sont de plus en plus performants et permettraient de réaliser des interprétations numériques rapides tout en intégrant les données expérimentales et de proposer des scénarios de conduite d'essai en temps réel.

**Cédric GOURDIN et Alain LE MAOULT,**

*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*

## ► Références

- [1] P.-E. CHARBONNEL, "Fuzzy-driven strategy for fully automated modal analysis: Application to the SMART2013 shaking-table test campaign", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 152, 107388, doi:10.1016/j.ymssp.2020.107388, 2021.
- [2] M. DIAZ, P.-E. CHARBONNEL and L. CHAMOIN, "Robust energy-based model updating framework for random processes in dynamics: Application to shaking-table experiments", *Computers & Structures*, 264, 106746, doi:10.1016/j.compstruc.2022.106746, 2022.
- [3] M. DIAZ, P.-E. CHARBONNEL and L. CHAMOIN, "A new Kalman filter approach for structural parameter tracking: Application to the monitoring of damaging structures tested on shaking-tables", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 182, 109529. doi:10.1016/j.ymssp.2022.109529, 2023.
- [4] I. HAMADOUC, D. SEYEDI and F. HILD, "Multiscale and multiview DIC for damage detection and quantification", The 7<sup>th</sup> Int. Conference on Computational Modeling of Fracture and failure of Materials and Structures (CFRAC 2023), Prague, Czechia, 21-23 June 2023.
- [5] C. GOURDIN, G. PEREZ, P. LE DELLIU and G. LEOPOLD, "Investigations on Crack Propagation under Cyclical Isothermal and Thermo-mechanical Loadings for A Type 304-L Stainless Steel Used for Pressurized Water Reactor", 12<sup>th</sup> Int. Fatigue Congress, FATIGUE 2018, Poitiers Futuroscope, France, 2018.
- [6] A. BLOUIN, S. MARIE, F. TANKOUA, F. BOLINDER, "ATLAS+ European Project – Prediction of Large Ductile Tearing in Austenitic Piping", *Proceedings of the PVP ASME Conference, Volume 4A : Materials and Fabrication*, Las Vegas, Nevada, USA, July 17-22, 2022.
- [7] J. MACEDO, J.-M. BERGHEAU, S. CHAPULIOT, E. FEULVARCH, O. ANCELET, A. MARTIN, "Thermal structural ratcheting simulation – Evaluation of industrial-used constitutive models", *Thin-Walled Structures*, Vol. 182, Part B, 2023.
- [8] C. GOURDIN, G. PEREZ, I. TOURNIÉ, "Development of Structural integrity testing facilities", *Transactions of SMIRT-26*, Berlin/Potsdam, Germany, July 10-15, 2022.



# Application de la mécanique des structures dans le domaine des nouvelles technologies de l'énergie (NTE)

## Introduction

Alors que l'ensemble de cette monographie a porté sur les applications nucléaires de la mécanique des structures, ce dernier chapitre souhaite aborder le déploiement de l'expertise acquise par le CEA, décrite tout au long des chapitres précédents, dans le domaine des autres énergies bas carbone du champ d'activité de la DES qui participeront au mixte énergétique que la France souhaite déployer pour répondre à l'objectif « zéro émission nette en 2050 ».

La Direction des Énergies du CEA et ses instituts<sup>10</sup> portent l'ambition de développer une solution dite intégrée d'un système énergétique fondé sur des énergies décarbonées [1]. Cette vision systémique est schématisée dans la figure 271.

Une des caractéristiques des NTE est leur caractère décentralisé et intermittent. Elles mettent en œuvre des dispositifs de production localisée d'énergie (production au plus près du besoin de consommation) associés à des moyens centralisés dans le cadre d'une mise en réseau (dispositifs de transport/transformation/*dispatching* de l'énergie), le tout s'inscrivant dans une économie circulaire permettant notamment une optimisation des ressources en matière.

Un ensemble de solutions techniques est ainsi mis en perspective au regard d'une triple exigence :

- Maîtriser les impacts environnementaux ;
- optimiser l'utilisation de ressources critiques (économie de matière) ;

10. LITEN/ISAS/ISEC/INESNE/I-Tésé.

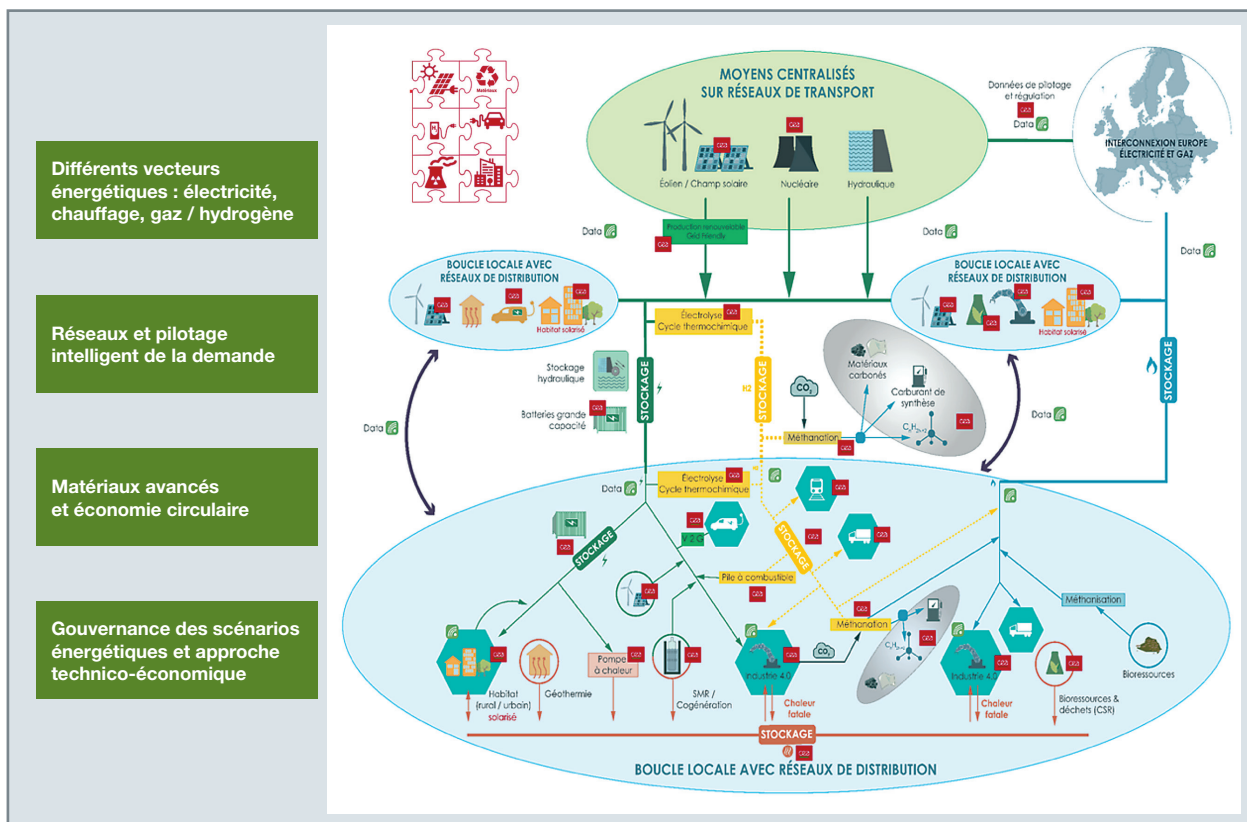


Fig. 271. Vision intégrée 2050+ de la Direction des Énergies (DES) : système énergétique fondé sur des énergies décarbonées.

- inscrire ces solutions dans une approche technico-économique permettant d'en optimiser économiquement l'usage au regard des contraintes techniques.

Ces solutions technologiques labellisées NTE peuvent être thématiquement regroupées de la manière suivante :

- Les solutions de production d'énergie renouvelable : les solutions développées et étudiées au CEA sont principalement le photovoltaïque qui prend une part croissante dans la fourniture d'électricité bas carbone et décentralisée ;
- les solutions de flexibilité : les solutions développées et étudiées au CEA sont les batteries, le stockage thermique, le vecteur hydrogène et la mobilité bas carbone ;
- les solutions de pilotage des systèmes énergétiques ;
- les solutions de transport et de stockage de l'énergie.

## La mécanique des structures au service des NTE – domaines d'intervention

La mécanique des structures englobe l'ensemble des activités permettant d'appréhender le comportement en déformation d'une structure soumise à une sollicitation externe ou interne. Elle fait appel à des activités de simulation numérique en articulation avec la mise en œuvre de dispositifs d'essai, le tout participant au dimensionnement multiphysique et multi-échelle de dispositifs technologiques et son corollaire, les règles de dimensionnement/normalisation. Le dimensionnement est piloté par les exigences suivantes :

- Performance : mettre en œuvre des solutions à **haut rendement énergétique** ;
- durabilité : mettre en œuvre des solutions disposant d'un **haut niveau de performance pendant toute la durée de vie du système** ;
- sécurité : mettre en œuvre des solutions n'engageant pas la **sécurité des installations environnantes et des individus**.

Chaque objectif draine un ensemble de besoins en simulation numérique et expérimentaux que l'on se propose d'aborder de manière non exhaustive à travers des illustrations d'activités portées par le CEA dans le domaine de la mécanique des structures. À ce titre, chaque famille de solutions de type NTE listées dans le premier chapitre est reprise et structure le propos.

### Solutions de production d'énergie renouvelable (photovoltaïque)

L'Institut National de l'Énergie Solaire [2] héberge la majeure partie des activités de R&D et de conception des solutions photovoltaïques du CEA, y compris la conception de processus de fabrication. Pour la mécanique des structures, une solution photovoltaïque est une diapositive modulaire soumise à des contraintes environnementales fortes (vent, chaleur, matière déposée). Il peut répondre à un usage sédentaire (ferme solaire) ou nomade (en appui à la mobilité) et se présenter sous forme rigide (panneau solaire) ou souple (revêtement sur un support existant). La variété d'usage identifié conduit à une variété de sollicitations possibles qui sont autant de sources de déformation (efforts de traction et de flexion) jusqu'à la dégradation du dispositif. Ce besoin de disposer de solutions numériques et expérimentales est d'autant plus prégnant dans un contexte d'économie de matière qui motive l'exploration de solutions alternatives et nouvelles au design rigide largement déployé actuellement pour un usage domestique et industriel. Une illustration de telles solutions exploratoires est le remplacement du cadre rigidifiant des panneaux solaires par un arrimage par câble (illustration en figure 272). Les panneaux solaires ainsi



Fig. 272. Illustration de dispositifs existants de panneaux solaires disposés sur câbles.

regroupés forment un système souple solidaire dont il convient d'appréhender les efforts qui s'appliquent à l'échelle des composants élémentaires (panneau et maillage de câbles) et à l'échelle du système (mouvement d'ensemble et sollicitations sur les dispositifs d'ancrage).

Le programme FLOW (*Frame Less On Wire* – programme de modules sans cadre sur câble) piloté par l'INES a pour ambition le développement de telles solutions technologiques. Un besoin en dimensionnement mécanique de structures sur câble constitue un enjeu de premier plan pour la faisabilité de tels designs. Il passe par la mise en œuvre de dispositifs d'essais mécaniques associée à la réalisation de simulation numérique prédictive en mécanique statique et dynamique avec interaction fluide-structure (IFS), afin d'appréhender la distribution des écoulements autour des modules et les contraintes produites sur les structures. Cet ensemble doit permettre d'alimenter une démarche de compréhension physique des mécanismes d'ondulation en jeu et des conséquences sur les performances (phénomène de *mismatch*), la durabilité (usure des structures) et la sécurité (possibilité de perte d'intégrité du système).

### Solutions de production de flexibilité (SPF)

#### Les technologies SPF étudiées au CEA

Les principales solutions de production de flexibilité (SPF) étudiées par le CEA sont regroupées en deux familles de dispositifs :

- Les dispositifs batterie ;
- les dispositifs hydrogène (pile à combustible, électrolyseur à haute température – EHT).

Parmi les deux familles de dispositifs précitées, la technologie des batteries est la plus mature. Le CEA travaille d'ailleurs sur ce sujet depuis près de 20 ans, contrairement aux

technologies hydrogène qui ne disposent pas du même niveau de maturité, dans la mesure de l'intérêt récent porté sur ces technologies. La technologie batterie apparaît aujourd'hui comme une solution incontournable de la mobilité décarbonée démontrée par l'accélération de l'adoption du véhicule électrifié pour les usages individuels et collectifs. Les technologies actuellement disponibles et largement déployées sont de type « liquide-liquide » (génération 3 ; voir fig. 273). Il s'agit des batteries lithium-ion qui équipent typiquement la génération actuelle de véhicules électriques. Les recherches sont en cours sur des technologies « tout solide » (passage à un électrolyte solide) qui disposent d'une plus grande stabilité électrochimique, d'une meilleure conductivité, avec un gain en durabilité/sécurité/toxicité.

Concernant les dispositifs hydrogène qui rassemblent l'ensemble des technologies apparaissant dans la chaîne de valeur hydrogène (production/conversion/stockage-transport/économie circulaire), deux technologies sont au cœur des activités de R&D, de dimensionnement et de conception dans le domaine des NTE :

- La technologie d'électrolyse à haute température (EHT ou *solid oxide electrolyzer cell* – SOEC) en tant que solution de **production d'hydrogène** prometteuse qui, depuis plusieurs années, est activement étudiée au sein du CEA ;
- la technologie des piles à combustible en tant que systèmes de **conversion power to H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> to power**.

Les EHT font partie de la famille des dispositifs de production d'hydrogène au côté des technologies alcaline et PEM (voir fig. 274). Ils ont la propriété de fonctionner à température élevée (autour de 800 °C), ce qui en améliore le rendement au regard des technologies alcaline et PEM. Un EHT est un dispositif à plusieurs échelles : la cellule constitue l'élément de base portant la réaction d'hydrolyse de l'eau : le stack ou empilement de cellules, le module comportant plu-

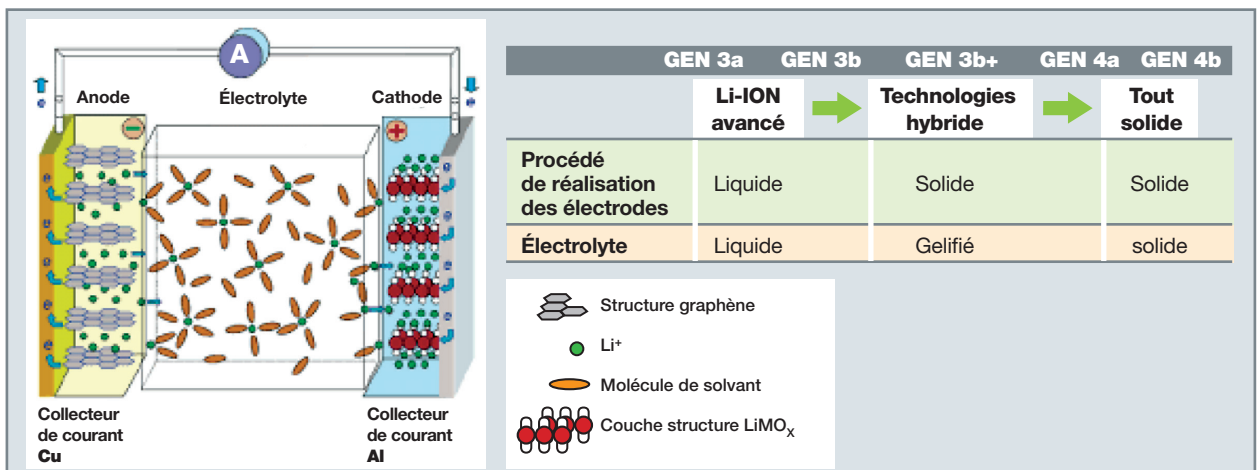


Fig. 273. Les générations de batteries – du « tout liquide » au « tout solide ».

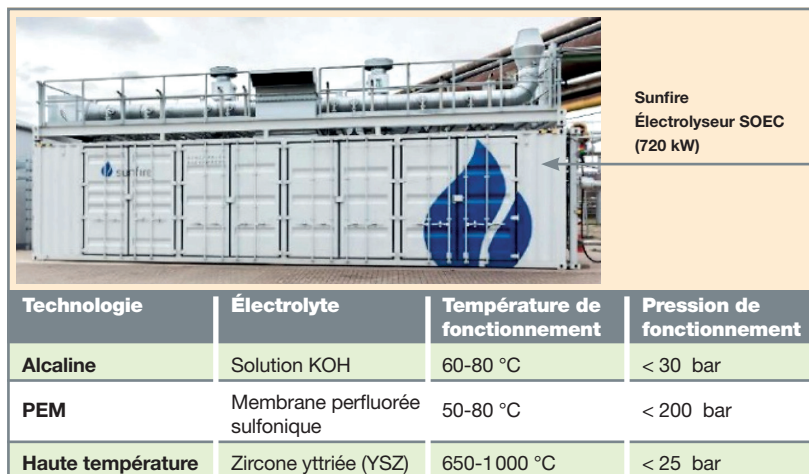


Fig. 274. Panorama des différentes technologies d'électrolyseur.

sieurs stacks, le système regroupant plusieurs modules et ses systèmes annexes de type *balance of plant*.

Les piles à combustible sont regroupées suivant deux technologies : les technologies à basse température (inférieure à 250 °C) et à haute température (supérieure à 500 °C). La figure 275 illustre la technologie la plus mature (piles à combustible à membrane échangeuse de protons – PEMFC) qui se situe dans la catégorie « basse température ». Le principe électrochimique est porté par la transformation de l'hydrogène en tant que combustible en eau avec à la clé la production d'un courant électrique. Ces systèmes sont étudiés pour la mobilité, utilisés seuls ou couplés à une batterie (mode hybride) pour en optimiser l'usage.

### Les besoins en mécanique des structures pour répondre aux exigences du triptyque performance/durabilité/sécurité

Comme pour l'ensemble des NTE, les solutions de production de flexibilité (SPF) doivent répondre aux exigences du triptyque **performance/durabilité/sécurité**, ce triptyque pilotant la démarche d'innovation et les activités de recherche et développement sous-jacentes.

### Améliorer la performance des SPF

implique, dans le cas des batteries et des EHT, une augmentation de la densité de puissance et d'énergie. En complémentarité avec les recherches menées sur l'électrochimie des matériaux, qui est la source première du gain en performance, un effort doit être réalisé sur le design des cellules élémentaires et leur assemblage en pack (batterie)/stack (EHT) afin de répondre à des exigences de compacité et/ou de puissance délivrée. Le **comportement thermomécanique** est à cet égard indispensable à prendre en compte afin de répondre aux problématiques de répartition homogène des températures au sein de la cellule et d'évacuation d'énergie produite par effet joule aux différentes échelles du système, comportement à intégrer typiquement dans l'évaluation de solutions topologiques optimisées (échelle de la cellule), et dans l'identification

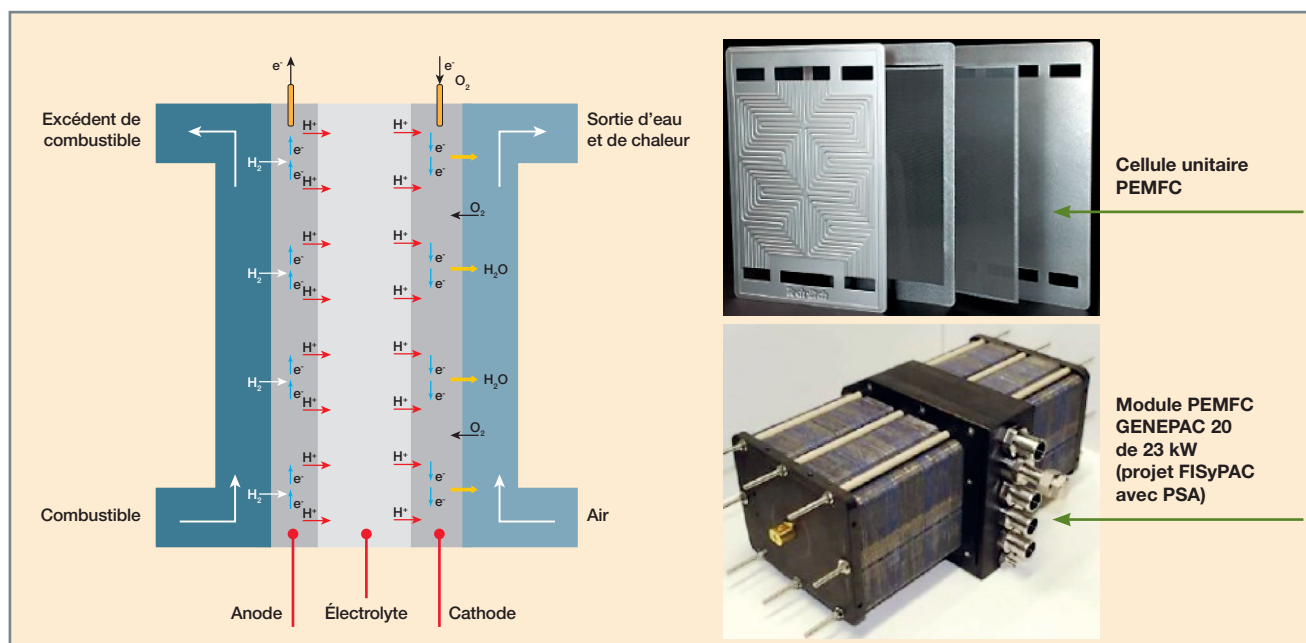


Fig. 275. La technologie PEMFC de pile à combustible [3].





Fig. 276. Dispositifs d'amortisseur antisismique testés sur la plateforme TAMARIS.

d'assemblages multi-échelles optimaux (au regard de la diversité possible de configuration d'assemblage de cellules en pack/stack jusqu'au composant dans le cas des EHT pour atteindre un même niveau de puissance). La thermomécanique intervient également dans le dimensionnement des systèmes de refroidissement et leur design (*échelle balance of plant*) afin d'assurer le maintien des températures de fonctionnement dans une plage optimale (dans le cas des batteries lithium-ion, entre 0 et 40 °C). La **mécanique vibratoire** est aussi à prendre en compte (tout du moins à analyser) quand il s'agit de systèmes susceptibles de subir, en conditions de fonctionnement normal, des sollicitations de type oscillation mécanique (cas des batteries embarquées pour un usage « sur route »). À ce titre, des compétences, tant en termes de simulation numérique que de moyens d'essais, sont disponibles au CEA pour réaliser l'évaluation de l'impact de ces conditions de fonctionnement sur les performances du système. L'appui ainsi apporté peut typiquement permettre le dimensionnement de dispositifs d'amortissement adaptés aux fréquences d'usage, comme illustré en figure 276 sur un équipement « nucléaire » de secours avec la plateforme TAMARIS [4] du Laboratoire d'Études de Mécanique Sismique.

**Améliorer la durabilité des SPF** consiste à analyser notamment le comportement sous cyclage (charge/décharge) afin d'appréhender les mécanismes de vieillissement des matériaux constituants. Ainsi, dans le cas des batteries, le cyclage opéré conduit à l'apparition de **contraintes mécaniques** internes à la cellule avec à la clé une déformation des constituants et une altération des contacts entre électrodes et électrolyte (décohésion de l'électrode, donc perte de connectivité électronique au cours du cyclage dont dépendent grandement la performance de la batterie et donc sa durée de vie). Au-delà du nombre de cycles, on pense également à la dynamique de charge qui va en augmentant avec les usages et représente également des contraintes fortes sur les matériaux avec une altération potentielle des capacités de stockage de la batterie.

Enfin, garantir la **sécurité des systèmes de production de flexibilité** exige, d'une part, de spécifier l'ensemble des situations à risque susceptibles d'engager l'intégrité de la batterie : sollicitations mécaniques (source externe de type choc, chute), sollicitations électriques (source interne de type court-circuit) et thermiques (source externe de chaleur externe). Cela exige, d'autre part, de faire démonstration sur les niveaux de perte d'intégrité des SPF et les systèmes éventuels de mitigation à mettre en œuvre pour la protection des biens et des personnes. Pour illustration, des travaux sont actuellement menés au CEA, dans le cadre d'une collaboration entre plusieurs laboratoires de la DES et du LITEN [5]. Le projet ISILI (cf. focus) combine essais et simulations numériques dans le but d'appréhender les mécanismes d'emballement thermique et leur conséquence sur la batterie.

Ce cas d'application illustre parfaitement les capacités de simulation et les moyens d'essais disponibles au CEA, et plus particulièrement les outils de simulation développés et maintenus en mécanique des structures : EUROPLEXUS [6] pour la dynamique rapide et vibratoire, Cast3M [7] pour la statique et la dynamique lente. Leur modularité et leur capacité de descriptions multi-physiques (seul ou couplé à un autre code) et multi-échelles permettent d'adresser un large spectre de configurations de fonctionnement (nominal sous cyclage, accidentel) d'une SPF, à inscrire au sein d'un environnement de simulation plus large dédié à la compréhension/dimensionnement/conception des dispositifs de production d'énergie décarbonée. La plateforme MUSES [8] développée par le LITEN (voir fig. 278) porte une vision intégrée et évolutive autorisant le positionnement de simulations de référence complémentaires des approches industrielles.

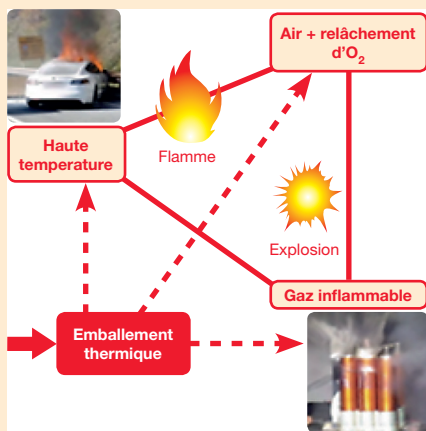
**Focus : Le couple simulation/essais pour une compréhension fine des mécanismes en jeu lors d'un emballement thermique d'une batterie li-ion**

La compréhension des mécanismes en jeu lors de l'emballement thermique de la batterie li-ion participe de la démonstration. L'initiateur à l'origine de l'emballement thermique étant pluriel (mécanique, électrique ou thermique), la chronologie des événements est la suivante :

1. Montée en température ;
2. dégagement de gaz réactifs ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ...), dégagement d' $O_2$  ;
3. montée en pression, combustion, voire explosion ;
4. propagation aux cellules voisines.

Le CEA dispose de l'ensemble des compétences, tant numériques qu'expérimentales, pour explorer finement chacune de ces étapes. Une initiative est en cours au CEA, portée par la mise en commun des compétences de la DES (ISAS) et de la DRT (LITEN) dans les domaines thermique, physico-chimique et mécanique (schématisation du programme de travail en figure 277).

**Phénoménologie**



**Méthodologie d'analyse**

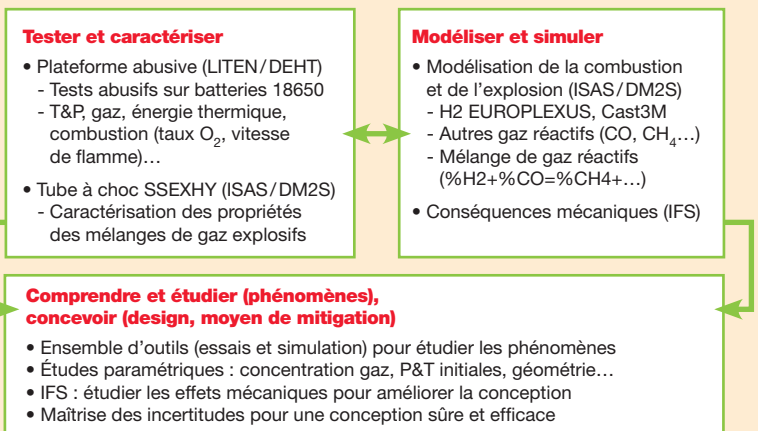


Fig. 277. Analyse phénoménologique et développement d'une méthodologie d'analyse pour une compréhension fine des mécanismes en jeu lors d'un emballement thermique d'une batterie li-ion.



Fig. 278. Description de la plateforme MUSES.



---

## Solutions de pilotage des systèmes énergétiques

Les solutions de pilotage des systèmes énergétiques forment des outils de mise en réseau et d'optimisation d'usage d'un ensemble de moyens de production/transformation/stockage/transport d'énergie situé dans une zone géographique d'intérêt : échelle territoriale (du quartier à la région), échelle nationale, internationale (union européenne). Le Réseau de transport d'électricité (RTE) développe et exploite typiquement l'outil ANTARÈS dédié aux réseaux électriques et gaziers pour l'étude de scénarios dans le cadre d'une interconnexion européenne.

Le CEA, quant à lui, a initié depuis quelques années, et dans le cadre de sa réflexion sur la mise en place d'une approche intégrée de nouvelles technologies de l'énergie, le développement de la plateforme TRILOGY [9] pour la **simulation des réseaux énergétiques multi-vecteurs** (à l'échelle territoriale quartier, territoire isolé). Ce projet agrège un ensemble de travaux réalisés sur ce sujet par le LITEN qui s'enrichit des compétences en simulation numérique et génie logiciel de la DES/ISAS dans l'objectif de disposer d'une plateforme d'aide à la décision dans l'exploration de stratégie de déploiement de solutions de production de flexibilité à l'échelle territoriale.

Le développement de telles plateformes repose sur une représentation synthétique de chaque système énergétique par le biais d'un ensemble d'indicateurs réunis dans un modèle du système et permettant d'en définir les limites d'usage et donc le périmètre d'utilisation. L'utilisateur de ces systèmes convoquera une représentation synthétique plus ou moins simplifiée suivant l'objectif recherché (définir à grande maille un réseau multi-vecteur, optimiser finement l'introduction d'une nouvelle solution de production de flexibilité dans un réseau existant) en puisant dans un catalogue de modèles de fidélité variable. À titre illustratif, on citera les indicateurs qualitatifs suivants : niveau de disponibilité, de performance, contraintes d'inertie. Ces indicateurs portent une connaissance de l'état du système, en particulier de son état mécanique à travers, typiquement, les pertes de performance avec le vieillissement de l'installation, d'éventuelles restrictions en termes de cyclage. Autant de phénomènes étudiés finement pour chaque système dans le cadre d'une activité de dimensionnement/conception et qu'il convient d'exporter sous la forme d'une représentation synthétique en cohérence avec l'échelle système multi-vecteur d'une plateforme comme TRILOGY.

---

## Logistique hydrogène

On s'intéresse dans ce chapitre uniquement aux solutions dédiées au stockage, transport et distribution de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique et qui appelle la mise en œuvre de solutions technologiques bien spécifiques eu égard aux propriétés de l'hydrogène.

Les solutions de logistique hydrogène actuellement mises en œuvre ou étudiées impliquent une mise à l'état liquide *via* l'application des procédés suivants :

- Pressurisation (pression supérieure à 200 bars) ;
- cryogénisation (température à - 253 °C) ;
- hydrogène sous forme organique (LOH – *liquid organic hydrogen*).

Dans la suite, on se concentre sur les solutions de stockage et de transport/distribution sous pression qui sont les plus étudiées au point d'atteindre, pour certaines d'entre elles, une phase de commercialisation.

### Stockage de l'hydrogène en réservoir pressurisé

On s'intéresse plus spécifiquement au stockage de l'hydrogène liquéfié en réservoir pressurisé, solution mise en œuvre typiquement pour les applications de mobilité. Les réservoirs sont regroupés suivant le niveau de pression appliqué pour le stockage (typologie résumée en figure 279). Les études menées par le CEA sont actuellement concentrées sur les réservoirs de type IV et V correspondant à une pression de stockage de 700 bars et au-delà. Depuis des années, une activité de développement de procédés est pilotée par la Direction des Applications Militaires (DAM) sur le site CEA du Ripault afin d'améliorer la conception des réservoirs de type IV, avec à la clé l'identification de solutions garantissant l'étanchéité (liner polymère) et le renfort de la structure (enrobage en fibre de carbone). Les derniers travaux visent en particulier à augmenter les cadences de fabrication et réduire les coûts de production dans une optique d'industrialisation [10].

Sur le plan mécanique, les enjeux sont multiples :

- **Durabilité** : garantir le bon comportement mécanique du réservoir en régime de fonctionnement normal : comportement en fluage sous chargement constant et comportement sous sollicitation cyclique (stockage/déstockage) dont la dynamique ira en augmentant avec les usages (besoin en flexibilité accru) ;
- **performance** : en lien avec la durabilité, atteindre des vitesses de remplissage accrues dans le cadre du développement d'un usage pour la mobilité principalement lourde ;

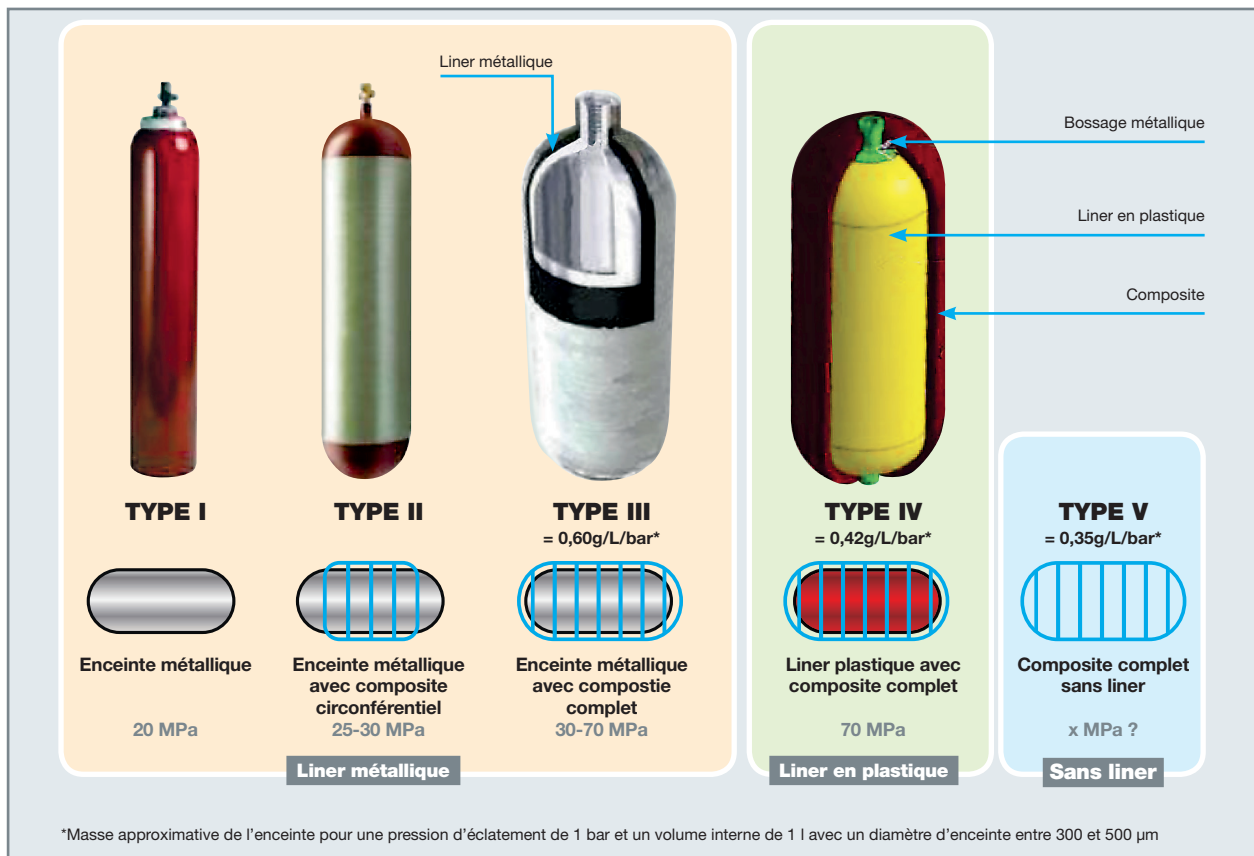


Fig. 279. Types de réservoir utilisés ou étudiés pour le stockage à haute pression de l'hydrogène.

- **sécurité** : maîtriser le comportement sous sollicitation extrême des réservoirs dans un contexte de technologies à hautes voire très hautes pressions.

En appui au dimensionnement et à l'optimisation de campagnes d'essais de réservoirs sous sollicitations, la simulation numérique doit permettre, dans une optique prédictive, l'analyse du comportement des réservoirs en régimes normal (chargement constant, cyclage charge/décharge) et accidentel (explosion) pour la **conception** et le **dimensionnement** de design, ainsi que l'**analyse sous-jacente du comportement thermomécanique**. Ainsi, le couplage thermomécanique est nécessaire eu égard aux objectifs d'augmentation de la vitesse de remplissage induisant des effets thermiques accrus avec un effet sur la limite à la rupture.

### Transport de l'hydrogène

L'hydrogène est acheminé sous forme gazeuse (transport routier et pipeline) et sous forme liquide (véhicule lourd, voie ferroviaire). Dans le cas du transport par pipeline, l'interaction hydrogène/métal, en induisant une modification des propriétés physico-chimiques de l'acier de structure, est à l'origine d'une fragilisation des canalisations de transport. Une analyse mécanique fine est alors à mener en s'appuyant tant sur les dispositifs expérimentaux que sur les moyens de simulation disponibles au CEA afin d'en extraire des règles de dimensionnement et de surveillance (cf. focus).

**Jean-Charles LE PALLEC,**  
*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*  
**Claire GAUTHIER,**  
*Direction des Programmes Énergies*  
**et Laurent BRIOTTET,**  
*CEA-Liten*



Des travaux sont actuellement menés au LITEN afin de maîtriser le comportement de l'acier des composants et dispositifs de transport et stockage sous environnement hydrogène. Ces travaux sont essentiellement portés par la réalisation d'essais consistant à analyser les mécanismes de perméation de l'hydrogène dans l'acier et la fragilisation induite avec, à la clé, l'identification et la caractérisation de seuils à rupture sous sollicitations (essais en traction statique et dynamique ; illustration en figure 280). Un ensemble d'analyse de sensibilité est par ailleurs mené afin de mesurer notamment l'impact de facteurs relevant de conditions réelles de stockage/transport (présence de gaz naturel, d'impureté, d'humidité dans le gaz d'hydrogène). En termes de sollicitations, l'analyse du comportement en fatigue des structures soumis à des chargements cycliques est également à l'étude.

**Acier L485 – Chargement en traction d'une éprouvette – P<sub>tot</sub> = 8,5 MPa**

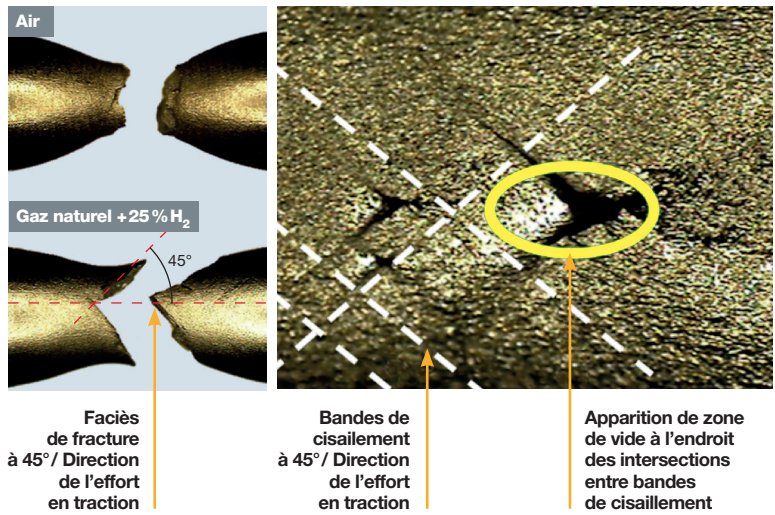
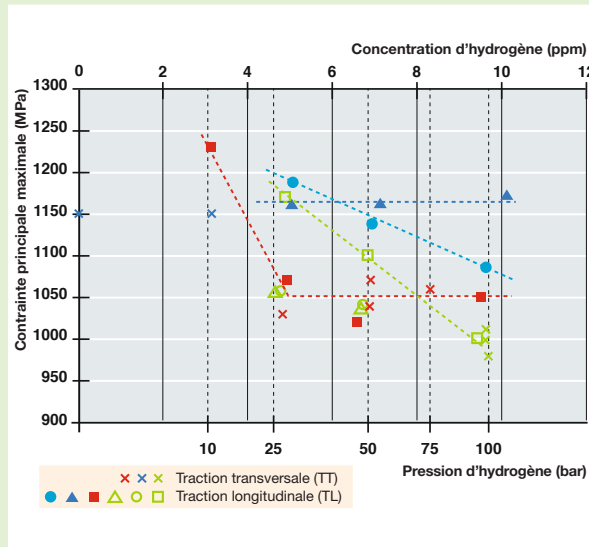
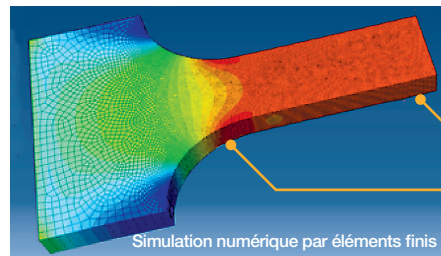
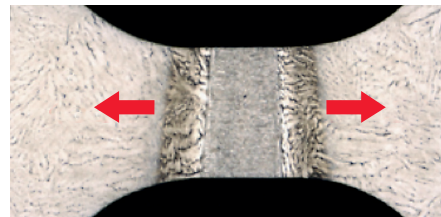


Fig. 280 Analyse du comportement d'une éprouvette en acier L485 en traction sous environnement H<sub>2</sub> [11].

Une attention toute particulière est portée sur le comportement des soudures en présence d'hydrogène sous pression. La surveillance des soudures est une préoccupation récurrente dans le cadre de l'analyse d'étanchéité de systèmes tubulaires. Des essais ont ainsi été réalisés sur éprouvette avec application de sollicitation en traction. Ces essais, repris en figure 281, permettent dès à présent de dessiner de premières corrélations ou tendances reliant contraintes à rupture, pression du gaz d'hydrogène environnant et concentration d'hydrogène dans l'acier.



**Essais de traction transversale (TT)**



**Essais de traction longitudinale (TL)**

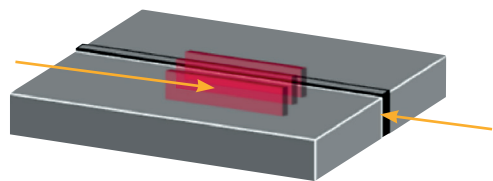


Fig .281. Comportement d'une soudure sous environnement H<sub>2</sub> – identification de seuils à rupture [12].

## ► Références

- [1] CEA DIRECTION DES ÉNERGIES (DES), <https://www.cea.fr/multimedia/Pages/videos/culture-scientifique/energies/vision-integree-du-syste-me-energetique.aspx>, 2021.
- [2] INES, <https://www.ines-solaire.org>, 2023.
- [3] “La pile à combustible PEMFC : une solution très crédible”, *Clefs CEA*, n° 59, 2010.
- [4] TAMARIS (s.d.), base de données d’essais sismiques, <http://data-tamaris.fr>.
- [5] CEA – LITEN (s.d.), <https://liten.cea.fr/cea-tech/liten/Pages/Accueil.aspx>.
- [6] EUROPLEXUS, <http://www-epx.cea.fr>, 2023.
- [7] Cast3M, <http://www-cast3m.cea.fr>, 2023.
- [8] MUSES, [https://www.cea-tech.fr/cea-tech/Pages/cr\\_2017/fonctionnement-des-generateurs-electrochimiques-stockage-batteries.aspx](https://www.cea-tech.fr/cea-tech/Pages/cr_2017/fonctionnement-des-generateurs-electrochimiques-stockage-batteries.aspx), 2018.
- [9] TRILOGY, *Les défis du CEA*, n° 250, « Les réseaux d’énergie du futur », [https://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/les-defis-du-cea/CEA\\_DEFIS\\_250\\_WEB.pdf](https://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/les-defis-du-cea/CEA_DEFIS_250_WEB.pdf), 2022.
- [10] CEA Direction des Applications Militaires (DAM), Avancées technologiques pour les réservoirs de véhicules électriques à hydrogène, *CHOCS Matériaux & Procédés : un savoir-faire spécifique*, n° 51, 2021.
- [11] H. EZ-ZAKI, Étude de la fragilisation par l’hydrogène de l’acier faiblement allié L-485MB en présence de mélange gazeux H<sub>2</sub>/Gaz naturel (GN), thèse de doctorat, université de Lyon, 2021.
- [12] F. CUSENZA, Étude du comportement sous hydrogène d’une soudeure homogène en acier inoxydable martensitique (APX4), thèse de doctorat, université de Bourgogne, 2016.

## ► Bibliographie

- IPCC, <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle>, 2023.
- Notre environnement, <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/climat/les-emissions-de-gaz-a-effet-de-serre-et-l-empreinte-carbone-ressources/article/panorama-des-emissions-francaises-de-gaz-a-effet-de-serre>, 2018.

## Conclusions







# Conclusions

**D**ans ce document, les occasions ont été nombreuses d'illustrer le caractère central de la mécanique des structures dans la plupart des phases qui mènent de la recherche fondamentale à la conception, puis à l'exploitation sûre des réacteurs nucléaires. Les enjeux forts, dans le domaine du nucléaire et au-delà, témoignent de la richesse de la discipline. Les domaines d'application sont variés (usure, fissuration, vibrations...) et les réponses aux sollicitations à évaluer nombreuses (situations de fonctionnement, chargements incidentels ou accidentels).

En mécanique des structures, comme dans d'autres domaines, l'association de la modélisation, de la simulation et de l'expérimentation reste indispensable. La modélisation vise à rendre compte des phénomènes physiques en jeu. À ce titre, la mécanique des structures peut être vue comme le prolongement naturel de la mécanique des matériaux, dans le développement de lois de comportement adaptées, en y intégrant de possibles effets d'échelle. La simulation cherche à construire des outils prédictifs pour lesquels un équilibre entre représentativité (au sens de la complexité) et coût de calcul doit être systématiquement recherché, en fonction des objectifs affichés (approches semi-analytiques, empiriques ou détaillées par exemple). Enfin, l'expérimentation se pose en tant que démonstrateur, lorsque la simulation n'est pas disponible ou pas suffisamment robuste pour être représentative, ou lorsque des exigences à l'échelle du composant apparaissent (démonstration de tenue d'équipements par exemple). Elle fait également le lien avec la simulation (et la modélisation à une échelle plus petite) en alimentant les modèles numériques et en permettant leur validation.

La spécificité des applications, particulièrement dans le domaine du nucléaire, requiert fréquemment l'association de la mécanique des structures avec une ou plusieurs autres disciplines scientifiques : thermique, neutronique, thermohydraulique... Les simulations multi-physiques sont alors caractérisées par la mise en regard de solveurs disciplinaires, au sens où chaque solveur traite d'une physique spécifique et constitue, de ce fait, le noyau numérique d'un outil de simulation dédié. C'est le cas pour la mécanique des structures, intégrée comme ingrédient pour la résolution de phénomènes multi-physiques plus complexes.

Les progrès obtenus cette dernière décennie en mécanique des structures sont remarquables. En témoignent les contributions proposées dans chacun des chapitres de cette monographie. À titre d'illustration, la recherche d'une réponse déterministe représentative constituait à elle seule un défi par le passé. Aujourd'hui, l'amélioration de la représentativité des modèles et des solveurs de calcul, couplée au développement de méthodologies dédiées (changement d'échelle par exemple), permet d'envisager la prise en compte des incertitudes (matériaux, de géométrie, de chargement) de manière plus ou moins détaillée en fonction de la structure considérée et de la complexité du comportement. Ces progrès permettent également le développement progressif d'outils de suivi des structures, sous la forme de jumeaux numériques, représentation numérisée « vivante », d'un objet physique à toutes les étapes de son cycle de vie. Plus qu'une simple maquette 3D généralement statique, le jumeau numérique permet alors un couplage dynamique entre l'objet physique et sa représentation numérique, par la collecte et l'interprétation de données/mesures en temps réel sur l'objet. Il témoigne ainsi un peu plus du lien constant entre expérimentation (ou mesures) et simulation.

Les défis à relever restent néanmoins nombreux. Certains, propres à chaque thématique d'application, ont été largement discutés dans les différents chapitres de cette monographie. D'autres, plus génériques, peuvent être repris ici :

- Une représentativité accrue des modèles : le développement des moyens de calcul, couplé à celui de l'instrumentation, permet d'envisager la proposition de modèles de plus en plus représentatifs, mais également de plus en plus complexes (prise en compte de phénomènes supplémentaires, remplacement de lois semi-empiriques par des modèles numériques, informations recherchées de plus en plus locales à l'échelle de structures de plus en plus grandes). Cette course en avant, bien qu'indispensable dans la recherche d'une meilleure compréhension et d'une meilleure prédictivité, pose néanmoins quelques difficultés, qui sont autant de défis à relever :

– la robustesse numérique : les équations considérées en mécanique des structures présentent un caractère intrinsèquement non linéaire, qui nécessite l'utilisation de méthodes numériques pour la discrétisation de ces équations et leur résolution. Ces méthodes doivent donc être

robustes et précises, tout en revêtant un caractère générique pour adresser un large panel de structures mécaniques,

– l'efficacité numérique : la complexité accrue des méthodes et des modèles développés conduit inévitablement à une augmentation du « coût » de calcul. Même si des méthodes continuent d'être mises au point (méthodes dites de « changement d'échelle ») pour minimiser cet impact, le développement d'outils disposant d'une architecture logicielle « HPC compatible » est inévitable, dans un cadre de programmation et de structures de données adaptées, tout en tirant profit de l'expérience des codes de calcul développés depuis plusieurs décennies,

– le besoin de validation : la complexité accrue des calculs et la finesse des informations recherchées renforcent la place de l'expérimentation dans le processus de validation, mais nécessite aussi son adaptation, tant en réalisation qu'en instrumentation. Le développement d'essais hybrides, correspondant à des analyses dans lesquelles tout ou partie d'une structure est modélisé et où seule la zone « critique » étudiée est testée, semble ici une voie prometteuse ;

- au-delà de la représentativité du modèle unitaire (au sens de l'obtention de la réponse déterministe), la construction d'une réponse intégrant les incertitudes (de modélisation, des matériaux...) devient progressivement atteignable. Néanmoins, compte tenu des dimensions caractéristiques des structures considérées et du coût unitaire de l'appel à l'outil de calcul scientifique, le développement de méthodes adaptées devra être poursuivi (propagation d'incertitudes, métamodélisation...) afin d'enrichir la réponse probabiliste actuellement limitée à des grandeurs d'intérêt bien choisies. L'utilisation plus systématique des données de mesure (lien entre expérimentation et simulation) devra également permettre de réduire les incertitudes sur certaines données d'entrée (analyse inverse, méthodes bayésiennes...);

- les développements réalisés en mécanique des structures pour le domaine du nucléaire revêtent généralement un caractère suffisamment générique pour envisager une ouverture à des domaines applicatifs plus larges. Cette évolution, déjà engagée au CEA, est certainement à poursuivre : nouvelles applications (nouvelles énergies par exemple), nouveaux matériaux... La thématique devra ainsi accompagner les nouveaux défis technologiques des prochaines années (réacteurs modulaires dans le domaine du nucléaire, réduction de l'empreinte carbone et prise en compte de l'analyse du cycle de vie dans la construction par exemple...);

- enfin, la mécanique des structures devra tirer parti de l'émergence de nouvelles disciplines, pour certaines déjà bien développées dans d'autres domaines applicatifs. L'intelligence artificielle et les méthodes d'assimilation de données associées (« apprentissage machine » par exemple) en sont un parfait exemple. Associer ces nouvelles technologies numériques à la mécanique des structures permettra certainement (et permet déjà pour certaines applications), sous réserve de garantir leur robustesse, à la fois d'améliorer la capacité prédictive de la simulation et d'enrichir l'exploitation des essais expérimentaux et des résultats de mesure.

**Ludovic Jason,**

*Département de Modélisation des Systèmes et Structures*







# Table des matières

Préface	7
Introduction	9
Un bref historique de la mécanique des structures	9
Pourquoi la mécanique des structures dans le nucléaire ?	11
Objet de la monographie	16
<b>La mécanique des structures – les outils de la modélisation</b>	<b>17</b>
La méthode des éléments finis en mécanique des structures	19
Introduction	19
Équations de la mécanique des structures	19
<i>Forme locale de l'équation du mouvement d'un milieu matériel</i>	19
<i>Formulation variationnelle de l'équation du mouvement</i>	19
Non-linéarités	20
Méthode des éléments finis en mécanique des structures	20
Introduction	20
Maillage	20
<i>Formulation « éléments finis » de l'équation du mouvement</i>	21
Intégration numérique	22
Loi de comportement	22
Recherche de l'équilibre	23
Les lois de comportement	27
Introduction	27
Description et constitution des lois du point de vue des approches empiriques : essais de caractérisation	27
<i>Détermination et constitution des lois : l'apport des approches multi-échelles</i>	30
Conclusions	35
Des phénomènes de plus en plus complexes : un besoin de compréhension et de validation par l'expérience	37
Introduction et contexte	37
Réduction d'échelle, loi de similitude et représentativité	38
Quelques plateformes remarquables pour adresser les différents domaines de la mécanique des structures	39
<i>La plateforme expérimentale TAMARIS</i>	39
<i>La plateforme expérimentale RESEDA</i>	41
Conclusions	45
Incertitudes, approches probabilistes et sensibilité	47
Introduction	47
<i>Vision générale de la simulation numérique</i>	47
Cas d'application	48
Éléments de contexte	48
Définition du problème	49
<i>Estimation des courbes de fragilité sismique à l'aide d'un processus gaussien</i>	50
<i>Résultats d'application</i>	52

Conclusion	55
<b>La démarche « jumeaux numériques »</b>	<b>57</b>
Définition et usages	57
Objectifs et enjeux	57
Implications technologiques/techniques	58
<i>La (ou les) plateforme(s) de calculs</i>	59
<i>Les données</i>	60
<i>Les outils transversaux</i>	60
Quels critères pour une construction réussie ?	61
Exemples d'utilisation de jumeaux numériques dans le domaine de la mécanique des structures	62
<i>L'approche JN pour le génie civil en contexte urbain</i>	62
<i>L'approche JN pour le générateur de vapeur</i>	62
<b>La mécanique des structures – sollicitations des composants des réacteurs</b>	<b>67</b>
<b>Soudage (maîtrise des procédés de soudage et leurs effets thermo-métallurgiques-mécaniques sur les matériaux et les structures) – Fabrication additive</b>	<b>69</b>
Introduction	69
La simulation numérique des procédés de soudage et de fabrication additive et de leurs effets	69
Un exemple de modélisation multi-physique : le procédé arc TIG	70
Simulation des effets du soudage : modélisation thermique	71
Simulation des effets du soudage : microstructures de solidification	71
Simulation des effets du soudage : modélisation thermo-métallo-mécanique	72
Fissuration à chaud et fissuration par relaxation	73
Distorsions de soudage	77
Vers la normalisation de la simulation numérique	77
Conclusions et perspectives	77
<b>Vibrations sous écoulement</b>	<b>81</b>
Introduction	81
Couplage fluide-structure avec risque d'instabilité fluide-élastique pour le générateur de vapeur	81
<i>Problématique principale</i>	81
<i>Démarche expérimentale</i>	81
<i>Modélisation pour l'étude de la stabilité du système fluide-structure couplé</i>	83
<i>Résultats en monophasique</i>	84
<i>Cas des écoulements diphasiques</i>	85
Interaction fluide-structure à plusieurs échelles sous écoulement majoritairement axial pour l'assemblage de combustible REP	87
<i>Interaction fluide-structure à l'échelle crayon/grille</i>	87
<i>Interaction fluide-structure en dynamique à l'échelle assemblage</i>	89
Simulation numérique de référence en interaction fluide-structure	91
Simulation numérique dans le cas d'écoulements diphasiques	92
De la recherche aux applications industrielles	94
Développement de méthodes numériques pour l'établissement de courbes de réponse et le suivi de bifurcation	95
<b>L'usure, un phénomène d'endommagement complexe, multi-physique et multi-échelle</b>	<b>99</b>
Introduction	99
Contexte et enjeux industriels	100

La démarche de R&D mise en œuvre pour comprendre et prédire le phénomène d'usure	100
Analyse des composants usés en réacteur	101
Réalisation d'essais d'usure de laboratoire représentatifs du REX	102
Utilisation de lois et modèles pour prédire l'usure dans l'industrie nucléaire	105
Conclusion	109
<b>Mécanique de l'élément combustible sous irradiation</b>	<b>111</b>
Introduction	111
La simulation combustible (PLÉIADES/ALCYONE), multi-échelle et multi-physique	111
Représentation à deux échelles du crayon combustible	111
Un problème multi-physique	112
Les modèles physiques au cœur de la simulation combustible	113
Produits de fission, vecteur isotopique	113
Modélisation des produits de fission gazeux (évolution de la microstructure sous irradiation)	113
Analyse thermochimique, relâchement de produits de fission corrosifs	113
Modélisation thermique	113
Spécificités de la modélisation mécanique du crayon combustible	114
Modélisation de la fissuration du combustible	114
Fissuration, plasticité, contact unilatéral... un problème fortement non linéaire	114
Validation intégrale	115
Conclusions	116
<b>Fatigue des zones de mélange</b>	<b>123</b>
Un événement déclencheur : l'incident sur le circuit RRA de CIVAUX	123
Mise en évidence de la fatigue thermique : les essais de fatigue thermique	125
Moyens d'essais de fatigue sous chargement équibiaxial purement mécanique avec et sans conditions REP (P = 300 bars et T = 300 °C) : FABIME2e	126
Les essais de fatigue équibiaxiale avec et sans conditions REP (P = 300 bars et T = 300 °C)	129
Conclusion	131
<b>L'étude de la rupture – l'exemple de l'Effet WPS (<i>warm pre-stress</i>) ou préchargement à chaud</b>	<b>133</b>
Contexte	133
Démarche mise en œuvre	134
Principaux acquis expérimentaux	135
Vérification de l'effet WPS sur les aciers 18MND5 et 16MND5 sous chargement uniaxial	135
Confirmation de l'effet WPS sur l'acier 18MND5 sous chargement biaxial	136
Confirmation de l'effet WPS sur l'acier 16MND5 irradié	136
Développement et validation d'un modèle mécanique numérique	138
Proposition et validation d'un critère analytique : le critère ACE	139
La codification	140
<b>Vieillessement des structures en béton armé et précontraint.</b>	
<b>Application aux enceintes de confinement de centrales nucléaires</b>	<b>143</b>
Généralités sur les enceintes de confinement de centrales nucléaires	143
Évaluation du comportement mécanique des enceintes de confinement	146
De l'enceinte de confinement vers son volume structurel représentatif (VSR)	147

<i>Les lois de comportement pour le béton et la caractérisation de la fissure</i>	148
Évaluation des transferts de fluide dans les enceintes de confinement	150
Conclusions et perspectives	152
<b>Gestion des transitoires incidentels : l'exemple du gerbage dans les réacteurs de quatrième génération et du couplage entre codes</b>	<b>155</b>
Introduction sur la neutronique	155
L'exemple de l'expérience Godiva	155
Le cas des réacteurs au sodium	157
<i>Problématique principale</i>	157
<i>La simulation numérique de cœurs des RNR-Na déformés</i>	157
<i>Les arrêts d'urgence par réactivité négative dans PHÉNIX</i>	157
<i>Les essais de gerbage dans PHÉNIX</i>	157
<i>Interprétation des essais</i>	159
Conclusions	160
<b>La modélisation des agressions externes</b>	<b>161</b>
<b>Le risque sismique</b>	<b>163</b>
Pratique habituelle	163
Mouvements sismiques transférés	166
Isolation sismique	167
Méthodes expérimentales	169
Essais sur table vibrante	170
Essais pseudo-dynamiques	170
Vers un dialogue calcul-essai en génie parasismique	172
Comparaison essai-calcul	172
Recalage de modèles à partir d'essais sur table vibrante	173
Focus sur la modélisation numérique « avancée » des structures en béton armé	175
Approches de modélisation disponibles	175
Modélisation avancée du béton	177
<b>Chutes et impacts</b>	<b>185</b>
La modélisation des chocs et impacts	185
Lois de comportement des matériaux	185
Gestion des contacts	188
Comportement de l'élément impactant : l'exemple de la chute d'un emballage	189
Un matériau particulier : le bois	190
Les méthodes de pré-dimensionnement	191
La simulation numérique pour la conception	193
Essais de chute et similitude	195
Bilan	196
Comportement des structures de génie civil sous impact	196
Contexte	196
Évaluation de la réponse sous impact par la modélisation	197
Bilan	201
<b>Onde de choc et effets sur les structures</b>	<b>203</b>
Des structures, des fluides et des interactions	204
Modélisation des fluides par la méthode des volumes finis	204
Modélisation des fluides dans les tuyauteries par des éléments 1D	206
Modélisation de l'interaction fluide-structure	206
Des fonctionnalités spécifiques et complémentaires	209
Modélisation des fluides : des lois de comportement spécifiques	209
Des méthodes pour réduire la taille et le temps de calcul des modèles : AMR et mapping	209



<i>Des solveurs différents pour des problématiques variées</i>	213
<b>De la validation à l'utilisation industrielle</b>	214
<i>Les essais HDR pour la validation de la modélisation de l'APRP</i>	214
<i>Fouettement de tuyauterie : les essais AQUITAINE II</i>	215
<i>Explosion de vapeur, accident de dimensionnement du confinement et essais MARA</i>	217
<i>Validation de la modélisation des explosions</i>	217
<b>Conclusion</b>	220
<b>De la codification à la conception</b>	223
<b>Codification et méthodes d'ingénierie (processus, exemples) : l'exemple du RCC-MRx</b>	225
<b>Place de la mécanique des structures dans les codes et normes</b>	225
<b>Les apports des réacteurs RNR Na pour le code</b>	226
<b>Le réacteur RJH et le code</b>	227
<i>Prise en compte du retour d'expérience du réacteur Jules Horowitz</i>	227
<i>Un exemple d'application du RCC-MRx : le dispositif SND (source neutronique de démarrage) du RJH</i>	227
<b>Conclusions</b>	229
<b>Pôles de compétences : l'assistance réglementaire – contexte, généralités, fonctions pôles et exemple du pôle ESP</b>	231
<b>Les pôles de compétences au CEA</b>	231
<b>Focus sur le Pôle de Compétences équipements sous pression/ équipements sous pression nucléaires</b>	231
<b>Les nouveaux défis technologiques : l'exemple du génie civil pour les structures mixtes et les constructions modulaires</b>	235
<b>La modularité</b>	235
<b>Les structures mixtes</b>	236
<i>Description des éléments d'une structure mixte</i>	236
<i>Les avantages des modules en acier-béton</i>	237
<i>Les projets innovants comme catalyseurs du développement des structures steel concrete</i>	238
<b>De la conception à la réalisation en passant par la simulation, l'expérimentation et l'usage des codes : l'exemple de la fusion</b>	241
<b>Introduction</b>	241
<b>Les projets autour de la fusion</b>	241
<i>Le projet ITER</i>	241
<i>Le projet DEMO</i>	242
<b>La couverture tritigène</b>	243
<b>Les TBM (test blanket modules)</b>	243
<i>Design des TBM</i>	244
<i>Les analyses de conception selon le RCC-MRx</i>	244
<i>Les études de fabrication</i>	245
<b>Conclusion</b>	250
<b>Vers une évolution des approches de simulation et expérimentale/ouverture vers les NTE</b>	253
<b>Les défis numériques</b>	255
<b>Enjeux de la simulation numérique en mécanique des structures et défis associés</b>	255

<i>La simulation numérique pour l'analyse du comportement sous sollicitations externes de l'enceinte de confinement d'un réacteur nucléaire</i>	255
<i>La simulation numérique pour la maîtrise du procédé de fabrication additive par arc-fil (WAAM)</i>	256
<i>La simulation numérique au service de l'analyse du comportement d'un générateur de vapeur en régime nominal</i>	256
<i>Dénominateurs communs</i>	256
<b>Premier défi : la robustesse des méthodes numériques</b>	<b>256</b>
<i>Problèmes non linéaires et méthodes itératives</i>	256
<i>Arithmétique flottante</i>	259
<b>Second défi : le calcul à haute performance (HPC) pour adresser les problèmes de grandes tailles</b>	<b>260</b>
<i>Approches classiques pour le parallélisme des problèmes de mécanique</i>	260
<i>Résolution des systèmes linéaires distribués</i>	261
<i>Équilibrage de charges</i>	261
<i>Portabilité des performances</i>	261
<b>Troisième défi : le couplage multi-physique</b>	<b>262</b>
<i>Cadre générique pour les problèmes de couplages multi-physiques</i>	262
<i>Vers le couplage monolithique</i>	263
<b>Les outils de simulation : situation actuelle et perspectives</b>	<b>263</b>
<i>Forces et limitations des codes patrimoniaux</i>	263
<i>Unification implicite/explicite et objectifs futurs</i>	264
<i>Architecture logicielle</i>	265
<b>Conclusion</b>	<b>265</b>
<b>Les défis de l'expérience</b>	<b>269</b>
<b>Contexte et conduite actuelle des essais de structures</b>	<b>269</b>
<b>Les défis de l'expérience dans les démonstrations expérimentales</b>	<b>270</b>
<i>Les essais hybrides appliqués aux études sur les conséquences des séismes</i>	270
<i>Les essais de structures pour les démonstrations de sûreté des composants</i>	272
<b>Les évolutions expérimentales</b>	<b>274</b>
<b>Application de la mécanique des structures dans le domaine des nouvelles technologies de l'énergie (NTE)</b>	<b>275</b>
<b>Introduction</b>	<b>275</b>
<b>La mécanique des structures au service des NTE – domaines d'intervention</b>	<b>276</b>
<i>Solutions de production d'énergie renouvelable (photovoltaïque)</i>	276
<i>Solutions de production de flexibilité (SPF)</i>	277
<i>Solutions de pilotage des systèmes énergétiques</i>	281
<i>Logistique hydrogène</i>	281
<b>Conclusions</b>	<b>285</b>
<b>Conclusions</b>	<b>287</b>

Alors que le nucléaire civil connaît un véritable regain d'intérêt, il faut savoir aussi exactement que possible de quoi on parle, qu'il s'agisse du nucléaire proprement dit ou des sciences et techniques qui lui sont associées. Pourtant, les documents de synthèse de bon niveau scientifique sur ce type d'énergie sont rares... Pour combler cette quasi-lacune et donner à ses travaux l'éclairage qu'ils méritent, le CEA dresse, sous forme de courtes monographies, un tableau complet des recherches en cours dans le domaine de l'énergie nucléaire civile.

Celles-ci étant pluridisciplinaires et de nature diverse, la série de monographies de la DES explore et synthétise des thèmes aussi différents, mais complémentaires, que les réacteurs du futur, le combustible nucléaire, les matériaux sous irradiation ou les déchets nucléaires...

S'adressant à la fois à des scientifiques dont ce n'est pas le domaine de compétence, mais qui sont en quête d'information, et à un plus grand public curieux de son environnement technologique présent et futur, les monographies de la DES présentent les résultats récents de la recherche dans leur contexte et avec leurs enjeux.

## La mécanique des structures

**L**a mécanique, dans son aspect le plus primaire, est très probablement la plus ancienne des sciences de la nature, non pas car la plus simple mais parce qu'elle répond à des besoins existentiels de l'être humain : se loger, s'abriter, se protéger, se déplacer... en un mot : « bâtir ». Bien que la mécanique puise ses racines dans les savoirs anciens liés notamment aux réflexions d'Archimède ou Aristote, l'histoire de la mécanique moderne débute avec les travaux de Galilée. Les trois siècles qui lui ont succédé ont été fondamentaux pour la construction de la mécanique des structures telle que nous la pratiquons aujourd'hui.

La mécanique des structures englobe des applications diverses, des physiques complexes et couplées. Si la mécanique des structures est une thématique scientifique transverse, les articles de cette monographie sont consacrés à son application dans le monde du nucléaire et tout particulièrement celui des réacteurs. Ce volume s'achève sur la valorisation, des compétences acquises par la DES dans le cadre des réacteurs nucléaires, dans le domaine des nouvelles technologies de l'énergie en lien avec la mise en place de stratégies de décarbonation des usages domestiques et industriels.