



**HAL**  
open science

## Capteurs à fibres optiques répartis pour la surveillance du corium en cas d'accident grave de réacteur nucléaire avec percement de la cuve : le projet ANR RSNR DISCOMS

Pierre Ferdinand, Laurent Maurin, Gwenael Jouvin, Stéphane Rougeault, Guy Cheymol, Philippe Le Tutour, Jean-Charles Jaboulay, Hicham Maskrot, A. Denoix, Christophe Journeau, et al.

### ► To cite this version:

Pierre Ferdinand, Laurent Maurin, Gwenael Jouvin, Stéphane Rougeault, Guy Cheymol, et al.. Capteurs à fibres optiques répartis pour la surveillance du corium en cas d'accident grave de réacteur nucléaire avec percement de la cuve : le projet ANR RSNR DISCOMS. JNOG 2019 - 39e Journées Nationales d'Optique Guidée, Université Paris-Saclay, Jul 2019, Saclay, France. cea-04094221

**HAL Id: cea-04094221**

**<https://cea.hal.science/cea-04094221>**

Submitted on 10 May 2023

**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.



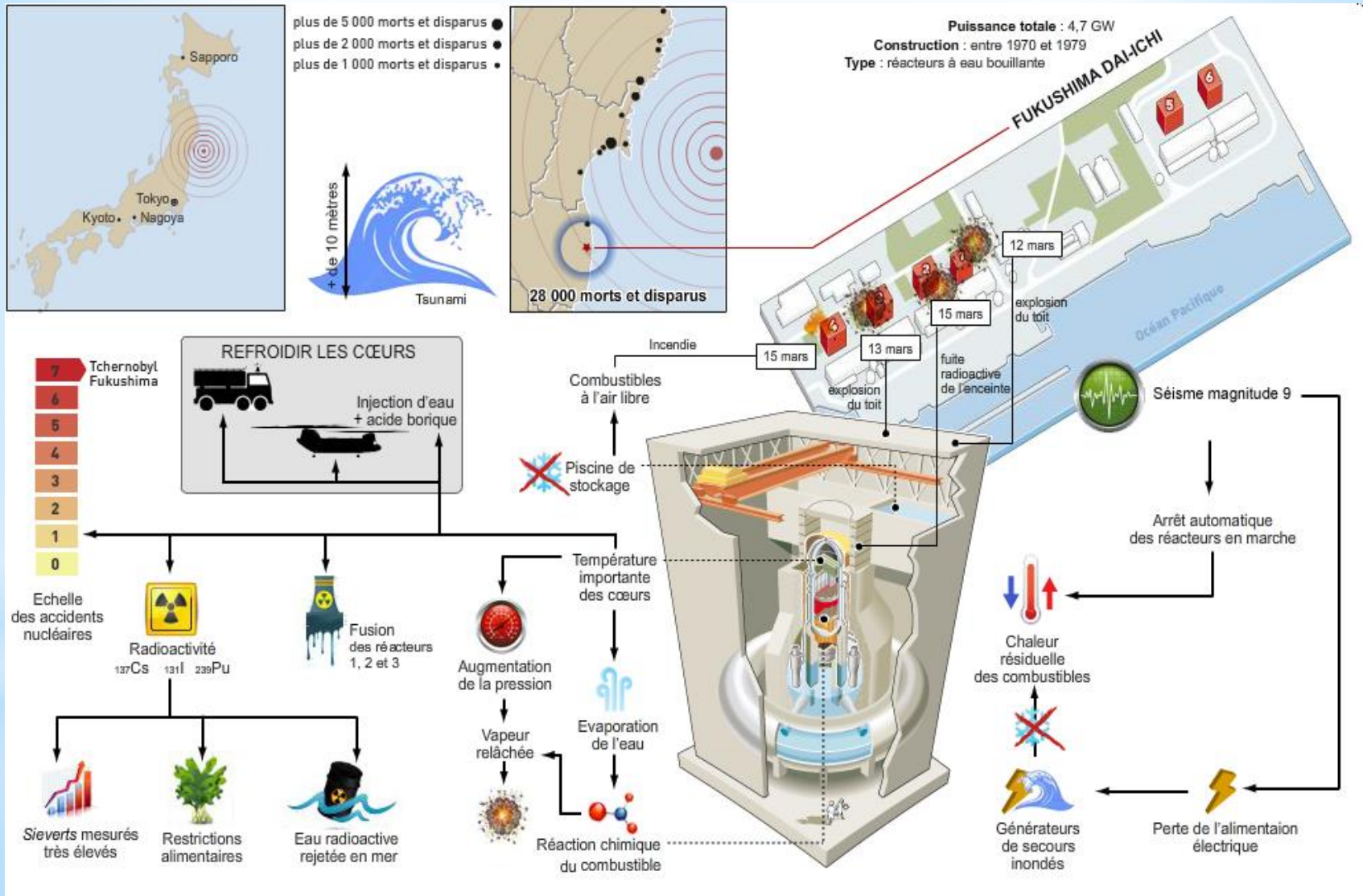
**Capteurs à Fibres Optiques répartis pour la surveillance du corium en cas d'Accident Grave de réacteur nucléaire avec percement de la cuve :**

**Le projet ANR RSNR DISCOMS**  
*(Distributed Sensing for CORium Monitoring & Safety)*

Pierre Ferdinand, Laurent Maurin, *et al.*

[p.ferdinand-lmpsa@sfr.fr](mailto:p.ferdinand-lmpsa@sfr.fr) Tél. : 06 51 06 39 81

# L'accident nucléaire de Fukushima Daiichi en mars 2011



(D'après J. Baruch et A. Bouthier)

# Détection du percement de la cuve & suivi du corium par CFO

**Problématiques** : Connaître l'état de la cuve, du radier (+ chambre étalement [EPR]), du corium ...

**Pour** : Adopter une stratégie adéquate ; garantir un fonctionnement même dégradé ; protéger les opérateurs ; éviter la perte de confinement + conséquences sanitaires / environnementales ...

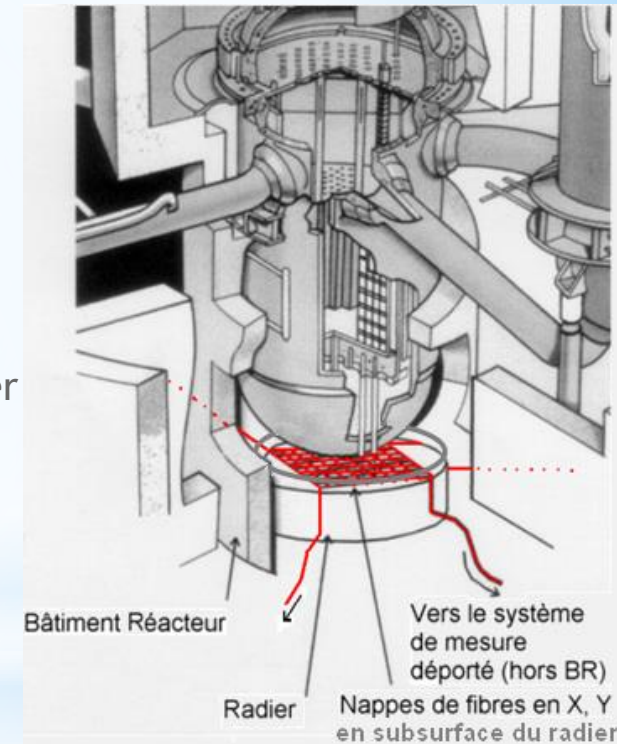
**Besoins** : Résister à l'AG ; Fonctionner sans alimentation ; Surveiller à distance ; en temps réel ...

## Réseau de fibres-capteurs

- **Maillage** de câbles optiques sensibles (*sub-surface du radier*)
- **Redondance** : N câbles (*en cas de ruine partielle de l'installation*)

**Méthode** : Interrogation déportée par « Réflectométrie » :

- **Réflectomètre [OTDR]** : Suivi progression corium + attaque du radier par fibres-fusibles (*localisation de fin de fibre*)
- **Thermique [DTS Raman]** : Profils thermiques
- **'Structurale' [Brillouin]** : Profils de déformations
- **'Structurale' [Rayleigh]** : Suivi très résolu (cm) des déf./Temp.



**Résultats** : Infos temps réel sur : le percement de la cuve, l'avancée du corium, l'état du radier, sa température + l'intégrité de la sous-couche réfractaire de zircone + cinétique de refroidissement du corium



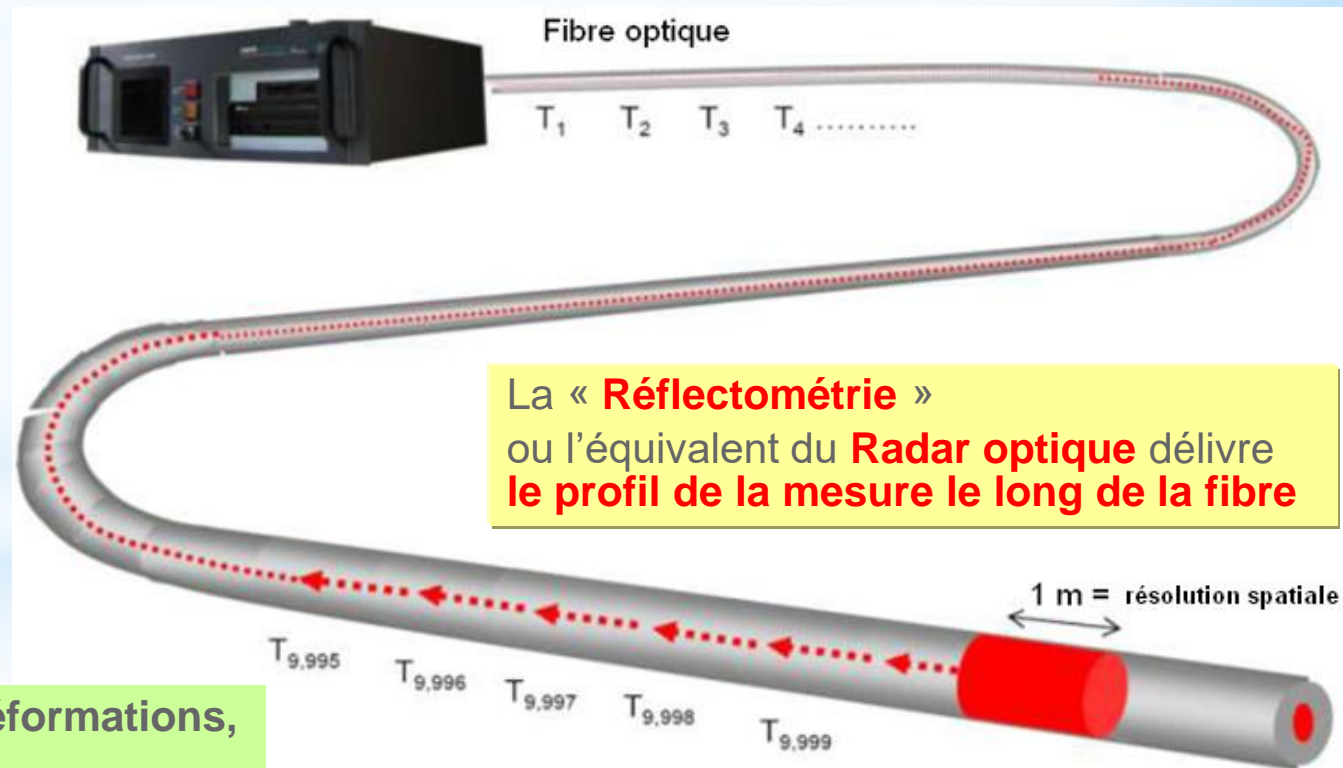
# Mesures réparties par fibres optiques

En tant que capteurs, seules les **fibres optiques** (*continument sensibles*) offrent :

- **Déport** de l'instrumentation ( $\times km$ )
- Grande capacité de mesure / multiplexage
- **Performances métrologiques** (résol.  $< 1^\circ C$  ;  $\pm 10^{-5}$  en déformations ; localisation : 1 m à 1 cm)
- Capacité à **endurer des doses** ionisantes importantes

• Et : **La mesure sans alimentation électrique au niveau de la tranche**

Réseau de  
Capteurs à Fibre  
Optique



La « **Réflectométrie** »  
ou l'équivalent du **Radar optique** délivre  
**le profil de la mesure le long de la fibre**

Grâce aux effets :

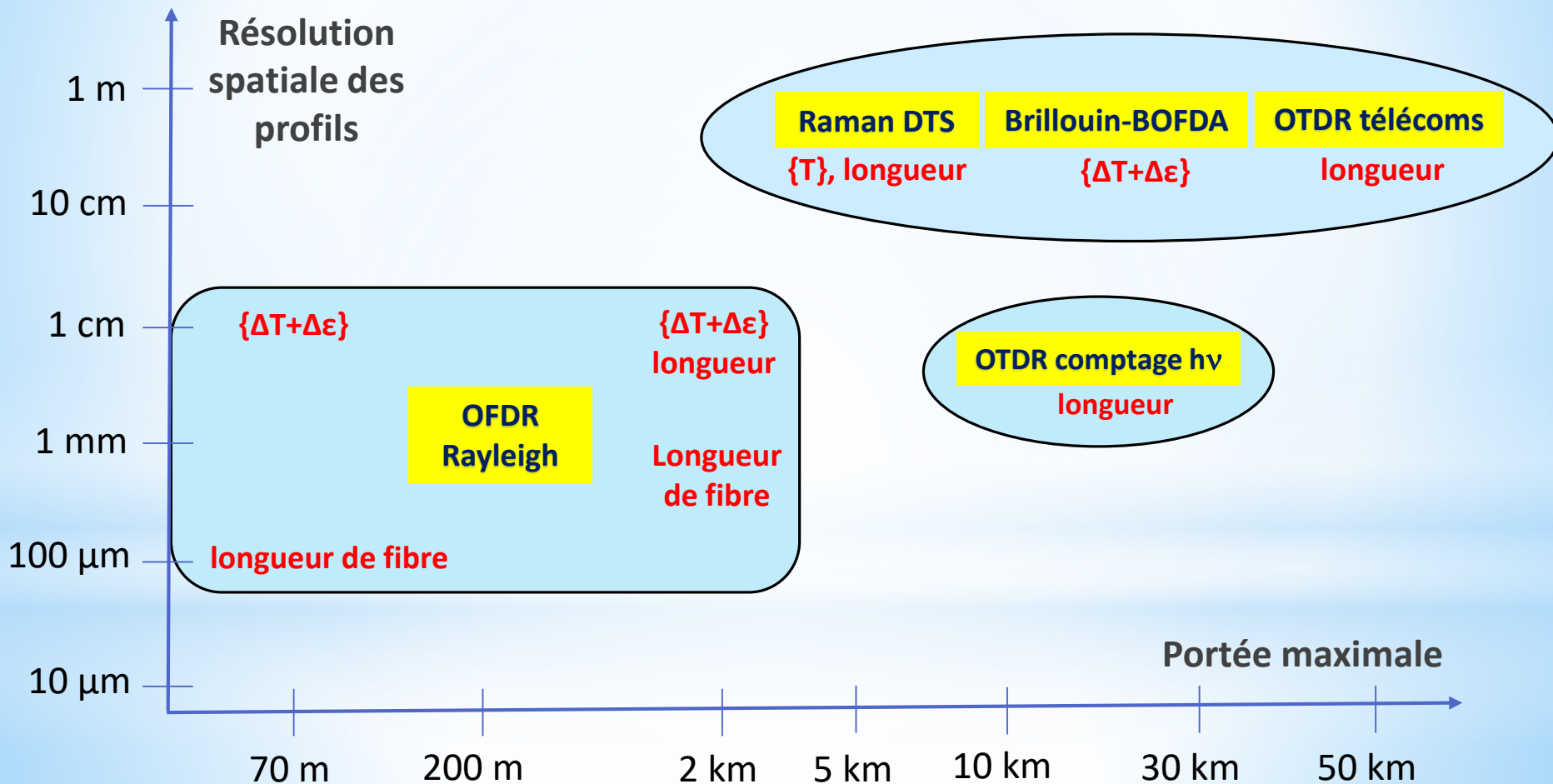
**Raman** => température

**Brillouin & Rayleigh** => déformations,  
courbures, pertes, coupures, ...

# Systèmes de mesure répartie



|           | Rayleigh OFDR            | OTDR comptage de hv | OTDR télécoms     | Raman DTS          | Brillouin-BOFDA     |
|-----------|--------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| Cadence : | 10 s + <i>post-proc.</i> | 20 <sup>+</sup> s   | 30 <sup>+</sup> s | 1 <sup>+</sup> min | 2 <sup>++</sup> min |

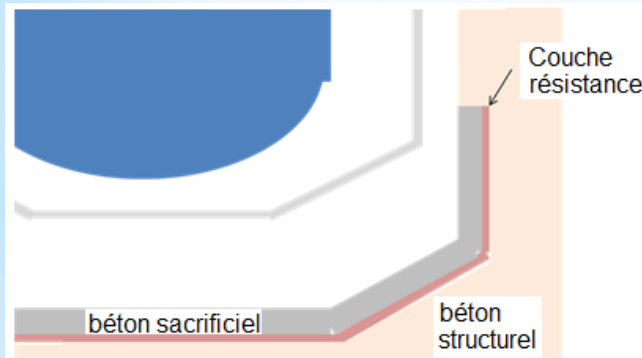


# Choix des fibres Rad-Hard

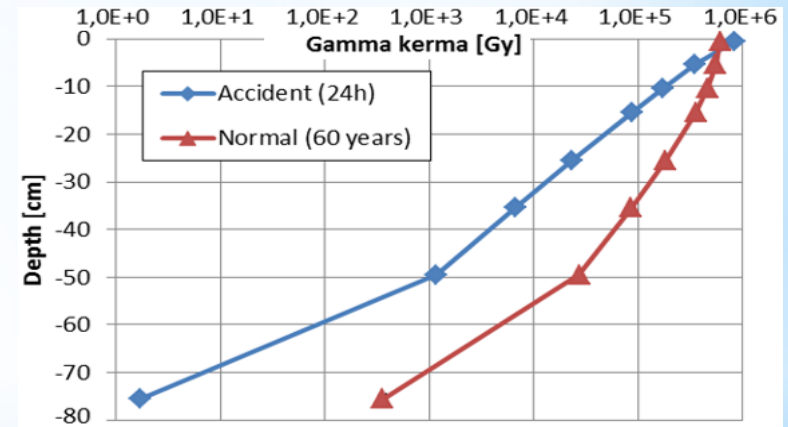
**Dynamique de mesure** des systèmes optiques ~ **20 dB**

**Norme K1 (AG) :** Pas de neutrons ; Débit photons  $\gamma = 1 \text{ kGy/h}$   
 (surface du radier) Doses  $\gamma \Rightarrow$  opérationnel (40 ans) : 250 kGy } **850 kGy**  
 $\Rightarrow$  accidentel : 600 kGy }  
 $\Rightarrow$  réévaluée par modélisation : **entre 1 et 2 MGy**  
 + (hors AG) : neutrons rapides ( $E > 1 \text{ MeV}$ ) :  **$10^{15} \text{ n/cm}^2$**

## Doses et débits $\gamma$ dans le béton en situations normale vs. accidentelle (EPR)



**Modélisation MCNP**



## Protection par le béton des fibres aux $\gamma$ et n (situations normale et accidentelle)

| Effet de 50 cm d'enfouissement | Neutrons ( $E > 1 \text{ MeV}$ ) : 60 ans d'irradiation | Gamma : 60 ans + 24 h d'Accident Grave |
|--------------------------------|---|--|
| Gen II (parc)                  | ÷ 50  | ÷ 8                                    |
| Gen III (EPR)                  | ÷ 100   | ÷ 90                                   |

**Le béton protège efficacement les fibres contre les radiations**

**Les 60 ans de vie de la tranche plus pénalisantes que 24 h d'AG**

# Irradiation des fibres sélectionnées

## Moyens d'essais :

~ 335 h dans l'irradiateur POSEIDON (Saclay)

Système optique multivoies de mesure des atténuation (en transmission) (14 fibres de 100 m)

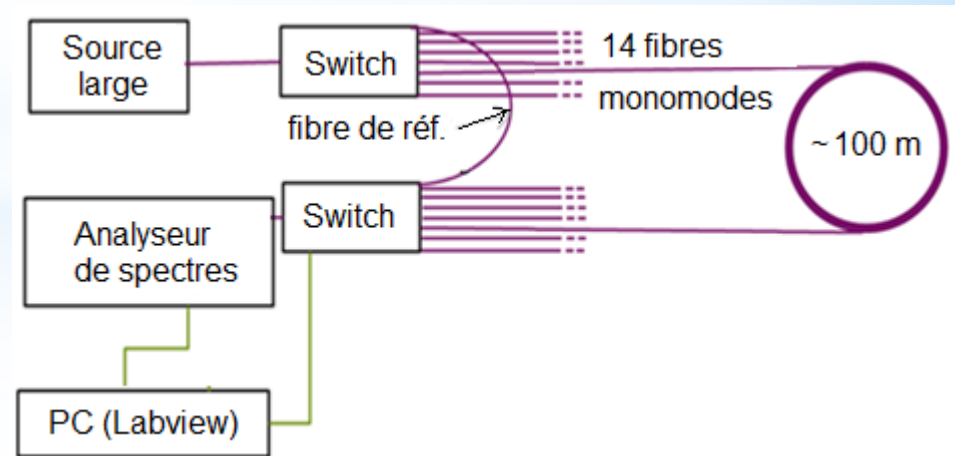
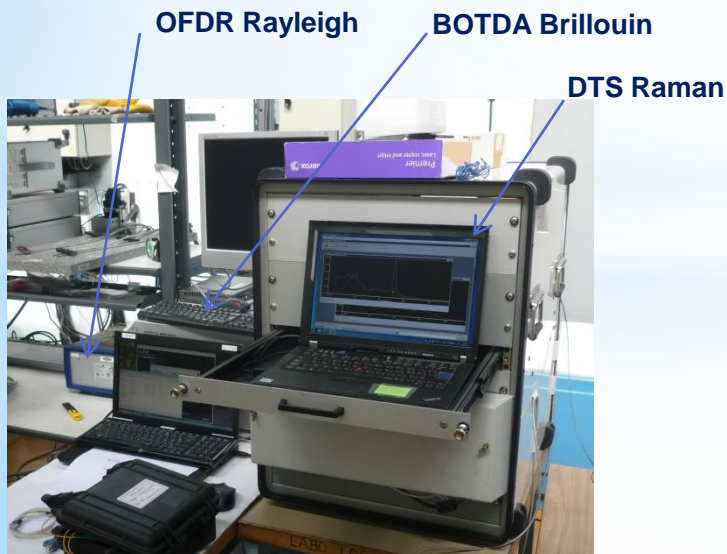
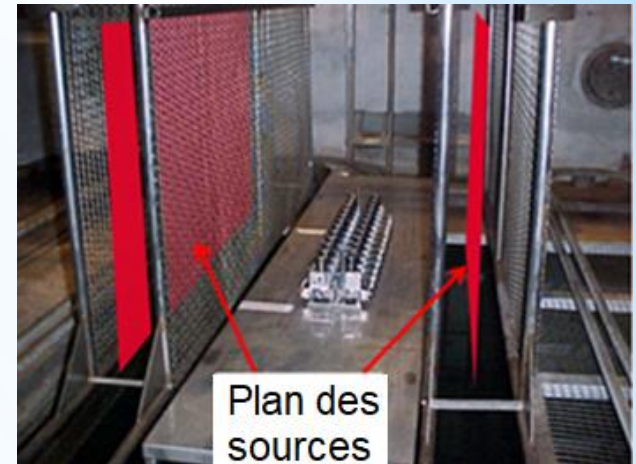
+ 3 réflectomètres (BOTDA, OFDR, DTS)

## Débit de dose ajustable vs. la distance aux sources $^{60}\text{Co}$ :

~ 6 kGy/h entre les 2 plans sources

→ maximum de dose 2 MGy

20 Gy/h à 1 kGy/h en dehors du plan des sources





# Choix des fibres meilleures Rad-Hard vs. la RIA

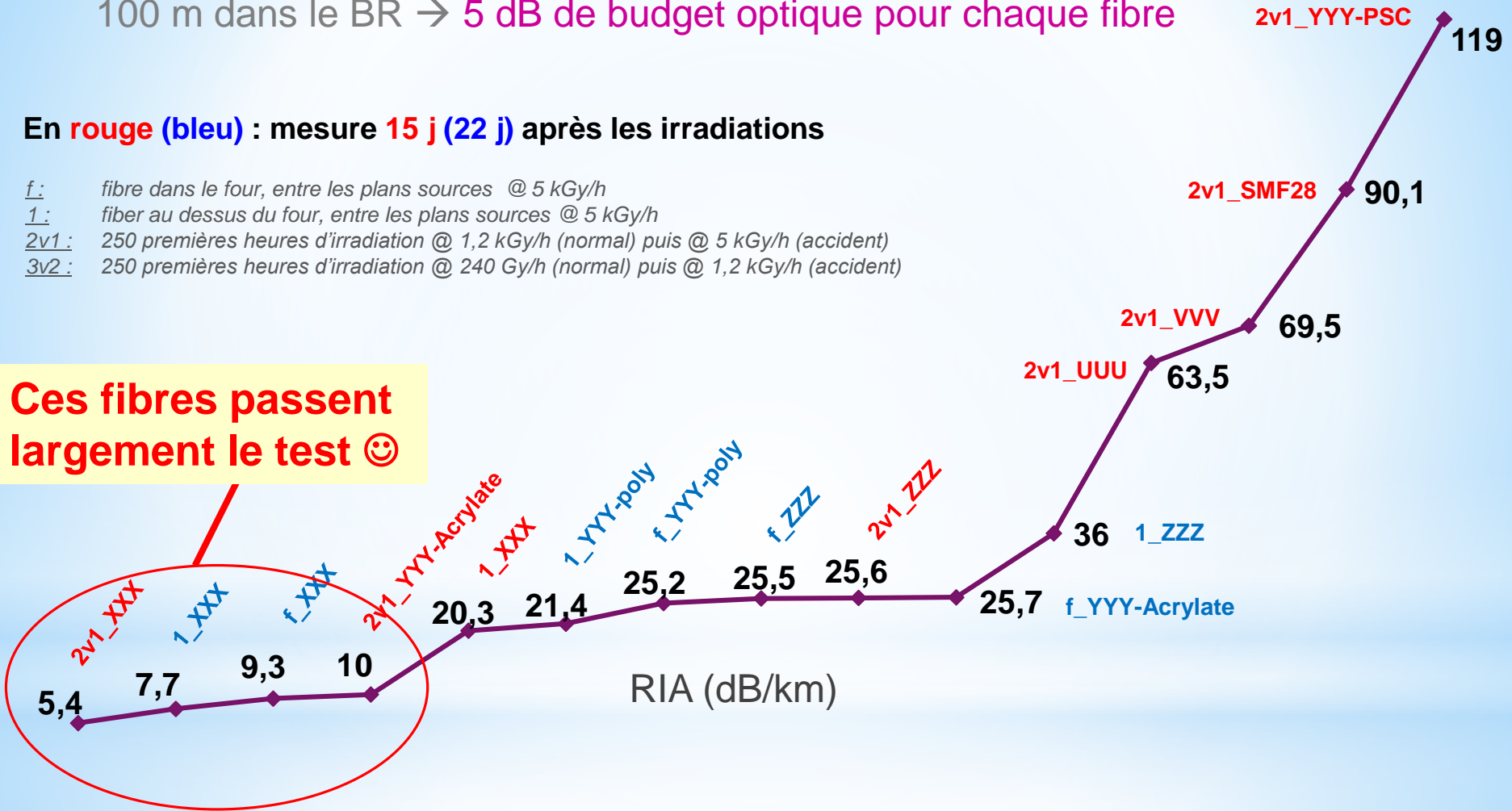
RIA < 50 dB/km à 2 MGy (1310 nm & 1550 nm)

100 m dans le BR → 5 dB de budget optique pour chaque fibre

En rouge (bleu) : mesure 15 j (22 j) après les irradiations

- f: fibre dans le four, entre les plans sources @ 5 kGy/h
- 1: fiber au dessus du four, entre les plans sources @ 5 kGy/h
- 2v1: 250 premières heures d'irradiation @ 1,2 kGy/h (normal) puis @ 5 kGy/h (accident)
- 3v2: 250 premières heures d'irradiation @ 240 Gy/h (normal) puis @ 1,2 kGy/h (accident)

Ces fibres passent largement le test 😊



+ Couche protectrice en C contre la diffusion d'H<sub>2</sub> générée par les câbles polymères

# Qualification des câbles sensibles



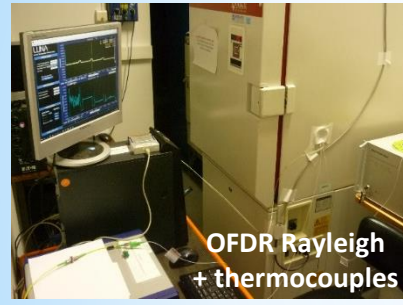
**Temp.** : jusqu'à 85°C / Ø 7,5 mm

**Déformation** : jusqu'à 1% en allongement / Ø 3,2 mm & Ø 7,2 mm

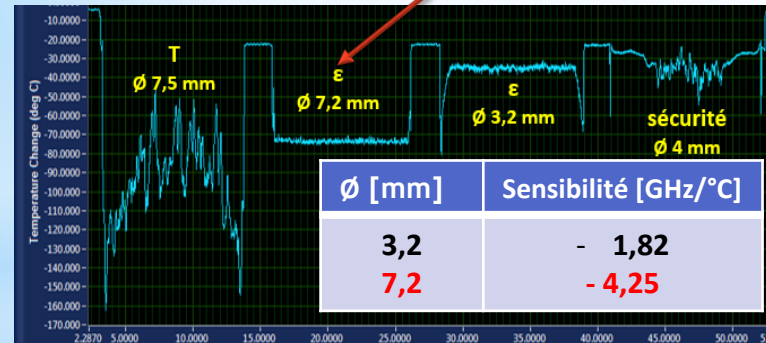
**Sécurité "fusible"** : 90 min à 750°C (continuité – IEC 60331-25) / Ø 4 mm



## (Fonc<sup>t</sup> normal) Tests en Temp. [4°C ; 85°C]



**Meilleure sensibilité en Temp. pour le câble de déf. Ø 7,2 mm**



## Tests d'allongements -> 1000 µm/m



- hysteresis < 1% PE

**cable pour detection de la chute du corium (> 300 tonnes [EPR])**

## (AG) Continuité -> 750°C



Câble dans le four cylindrique



Câble de sécurité après 2 h à 750°C

Fibre OK

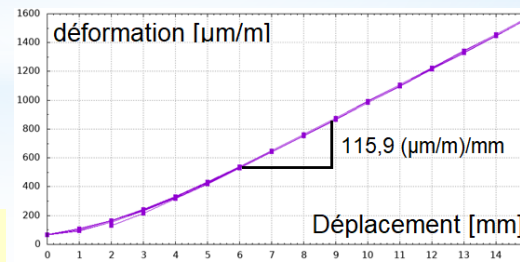


Câble de déformation chauffé à 400°C

Casse entre 400°C & 450°C

**Meilleurs câbles :**

- "sécurité" → tenue > 90 min à 750°C
- "Déformation" : rupture précoce



# Essai VULCANO d'Interaction-Corium-Béton

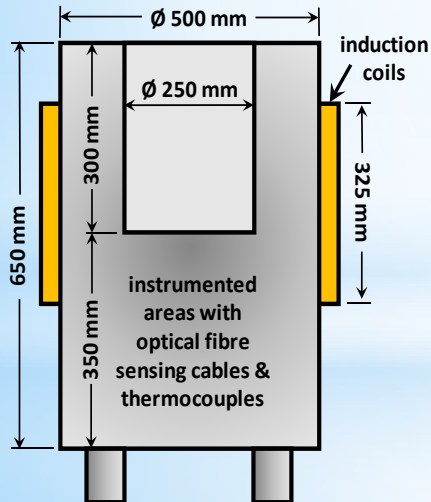
50 kg d' $UO_2$  prototypique + réaction thermitique + chauffage inductif de maintien  
> 100 thermocouples de suivi et de sécurité + CFO noyés dans le béton

- Le creuset

Petite taille => petit câble de "sécurité"  $\varnothing$  4 mm

Résolution spatiale des appareils => câbles spiralés dans le béton (autour, sous la veine)

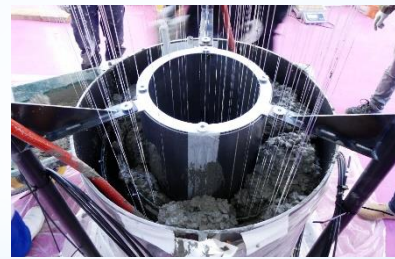
- 5 longueurs de fibres (180 m au total) reliées à 5 instruments de mesure répartie



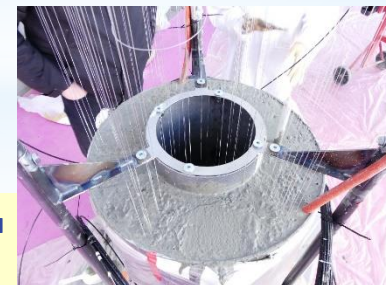
Creuset béton pour essai ICB



CFO & Thermocouples



Coulage du béton



Creuset en béton équipé + boucle inductive



# 5 instrumentations de mesure répartie pendant l'essai VULCANO

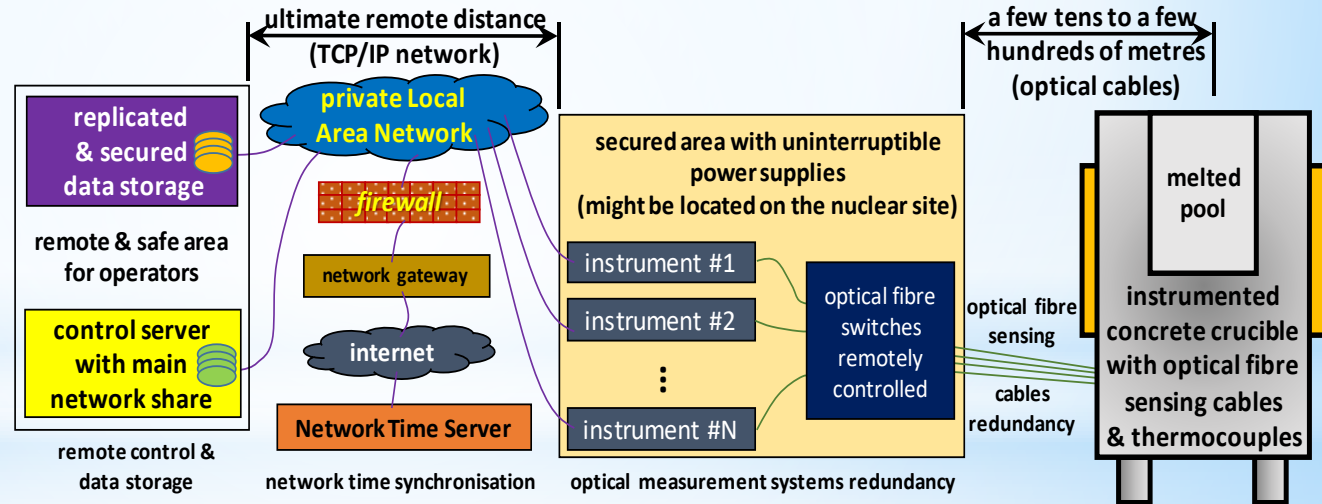
- **DTS Raman**      Température
- **B-OFDA Brillouin**    {temp. + déf.} ; ruptures (*fusible*)
- **OFDR Rayleigh**    {temp. + déf.} ; ruptures (*fusible*)
- **$\nu$ -OTDR**      ruptures (*fusible*)
- **OTDR Télécoms**    pertes, ruptures (*fusible*)



Systèmes + commutateurs

## Principe de l'instrumentation complète avec câbles & redondance

- déportée à 100 m
- connectés (réseau local)
- synchronisés (serveur de temps)
- mesures répliquées en temps réel sur l'IHM



- 90 min d'essai → 6 cm de béton ablaté
- Mesures optiques enregistrée jusqu'au retour à l'ambiante (~ 24 h).

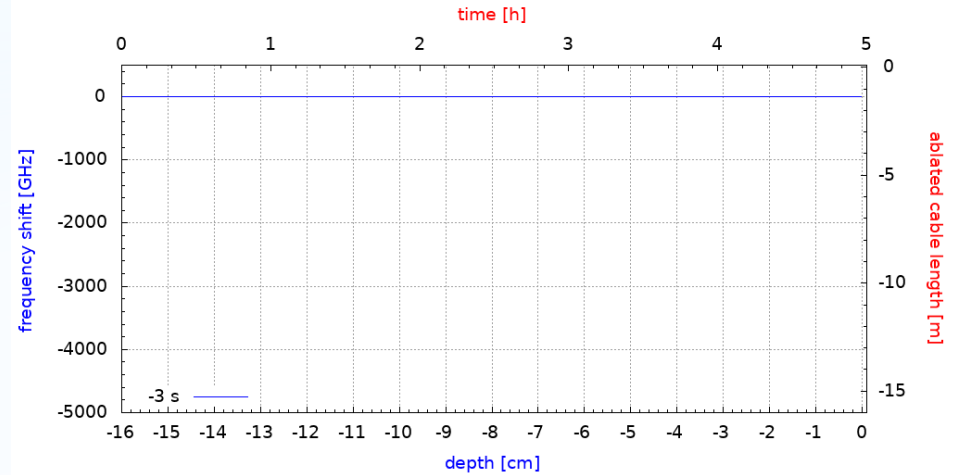


# Mesures en temps réel pendant l'essai



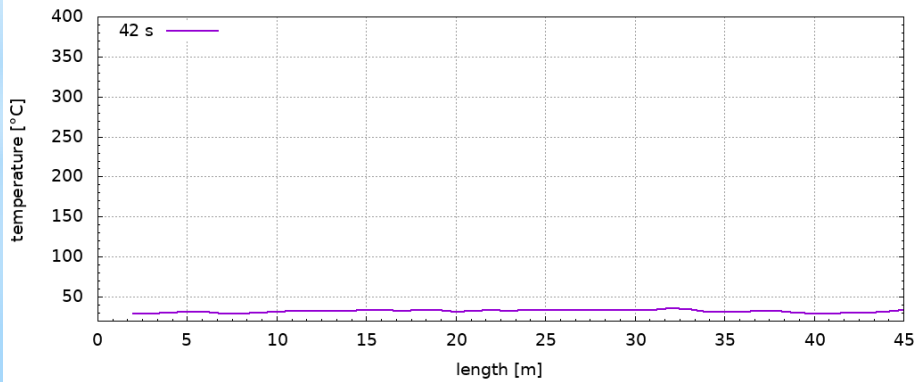
Réaction thermitique d'initiation de la fusion

## ODFR Rayleigh

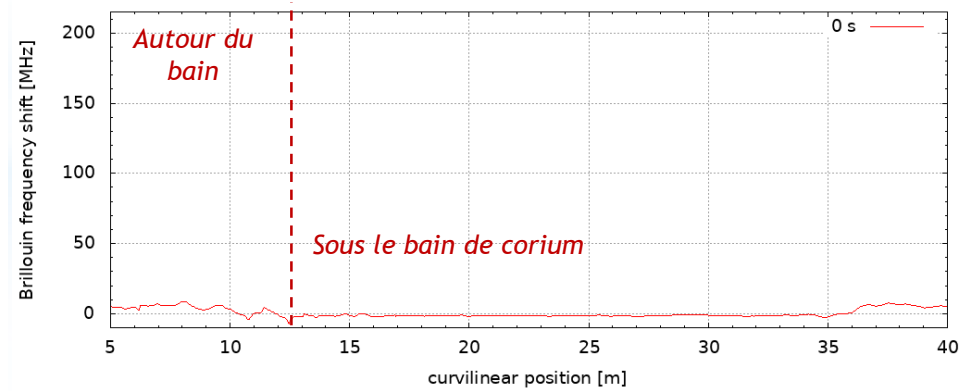


Corium détecté après seulement quelques minutes

## DTS Raman



## Brillouin B-OFDA



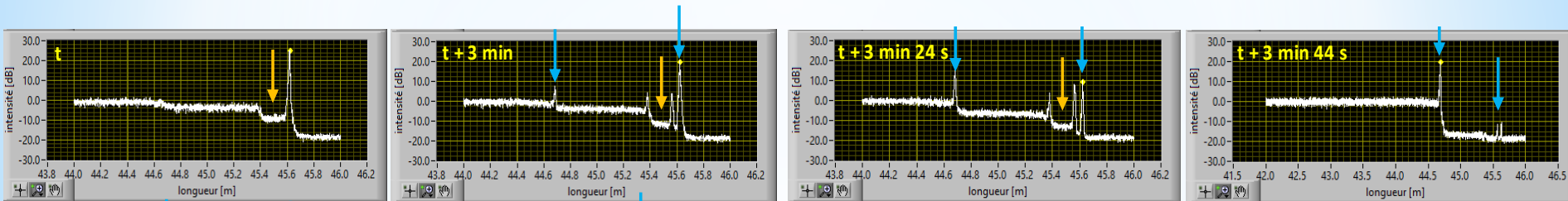
# Mesures de longueur

- OFDR Rayleigh : la rétrodiffusion illustre un processus par étapes :**

Fortes pertes (hautes températures)

Ruptures brutales au niveau des zones affaiblies

Plusieurs pics de Fresnel => détection automatique de fin de fibre difficile



- OTDR télécoms**

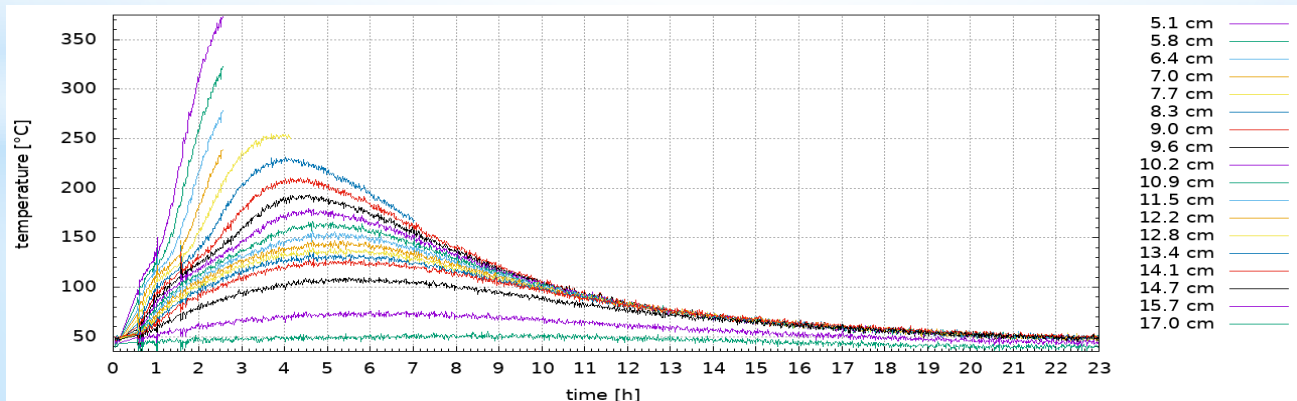
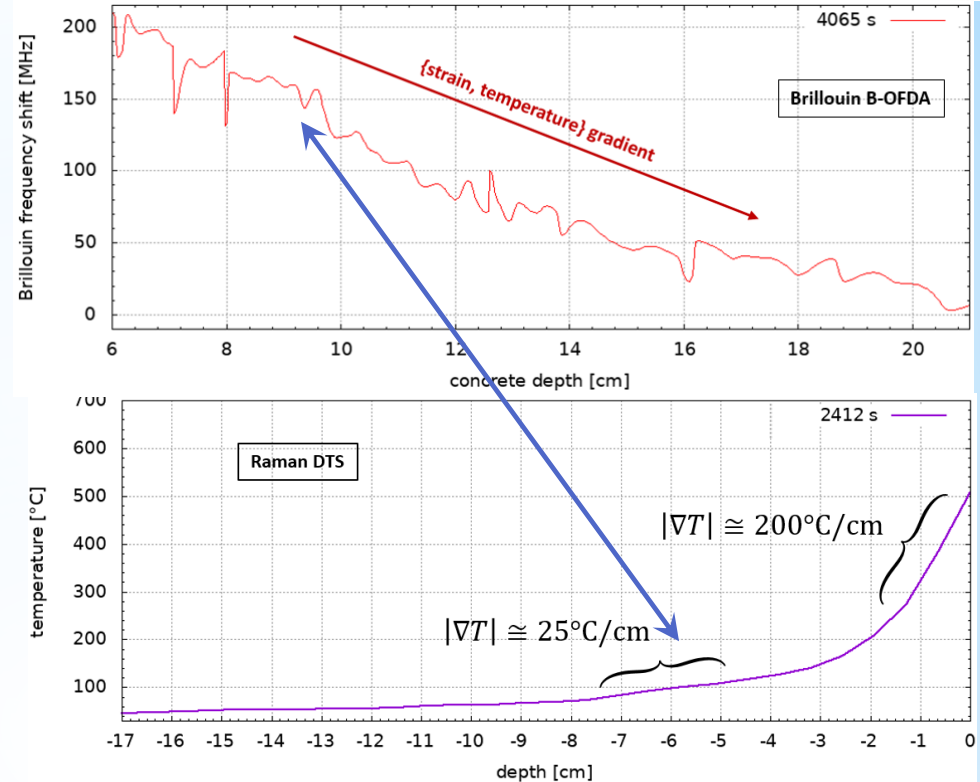
- Pics de Fresnel visibles mais ...
- de fortes pertes => détections manuelles ...

- OTDR à comptage de photons**

- Fresnel disparu 90 min proche du corium
- => non validé pour détecter le corium

# Mesures de température & de gradients

- Dès 6 cm de profondeur : Mesures Brillouin & Raman comparables  
Gradient  $\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C/cm}$
- Gradients (DTS Raman) compatibles avec les modélisations  
 $\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C/cm}$  proche de la surface
- Profils lors du refroidissement  
 $\Rightarrow$  surveillance long terme possible



- **Démonstration réussie** lors de l'essai d'ICB de la surveillance déportée

Profils de **température** jusqu'à 500°C (DTS mono- $\lambda$ )

Profils de {**déf. + temp.**} (Brillouin B-OFDA & OFDR Rayleigh)

- **OFDR Rayleigh** : mesures très bruitée → non retenu
- **OTDR comptage de photons** : pic de Fresnel disparaît à l'approche du corium → seulement utilisable pour la surveillance long terme (refroidissement)

**Longueurs** de fibres obtenues par **OTDR télécoms** ainsi que par **DTS Raman**

- **Recommandations** pour l'équipement des centrales

**DTS Raman** insensible à la RIA pour mesure des profils de temp. **jusqu'à 700°C**

**BOTDR** (Brillouin spontané) pour mesures des profils {temp. + déf.}

- Pour des mesures **jusqu'à 1000°C**
- Fondées sur un instrument dont la mesure est insensible aux radiations
- Et, si besoin, capable de séparer température et déformation

Voire, un OTDR pour déterminer les longueurs (si non-fournies par d'autres)



*Remerciements à tous les personnels scientifiques & techniques impliqués (ordre alphabétique) :*

V. Arounassalame, S. Balleydier, L. Barbot, J.-M. Bourbotte, V. Bouyer, A. Brodin, M. Brovchenko, A. Caillaux, G. Cheymol, F. Compagnon, P. Correggio, P. Coste, F. Damian, V. Dauvois, B. Dechenaux, F. Delaunay, A. Denoix, D. Doizi, C. Dufresne, I. Duhamel, D. Duval, P. Ferdinand, S. Fourrez, P. Gandrille, C. Guenaut, H. Hamrita, J.-F. Haquet, G. Helleux, N. Huot, J.-C. Jaboulay, C. Journeau, G. Jouvin, V. Kondrasovs, J. Lecloarec, M. Leroy, P. Le Tutour, H. Makil, H. Maskrot, V. Matou, L. Maurin, O. Meziani, J. Miss, D. Molina, G. Musoyan, Y. Ouerdane, F. Pouillé, L. Rabin, L. Rémy, B. Ricque, S. Rougeault, M. Sagan, A. Souchon, Q. Souquet, P. Téna, M. Valérian, N. Vaslier, J.-F. Villard.

+ Remerciements spéciaux pour Antony Lebeau (ANR/RSNR)

***Merci à tou(te)s  
pour votre attention***

