

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea den

MODÉLISATION DE LA COMPACTION DES POUDRES SUIVANT LE MODÈLE CAM-CLAY

Club Cast3M 2015 | Pascal GIRARDIN
CEADEN/DTEC/SDTC/LTAP
Laboratoire des Technologies Avancées

27 NOVEMBRE 2015

Le problème des déformations géométriques des pastilles

Fabrication des pastilles de combustible nucléaire	P.03
Modélisation de la compaction des poudres nucléaires	P.04
Modélisation du frittage, ou du moins de la déformation induite par le frittage	P.05

Problème de l'identification des paramètres Cam-Clay

Identification des paramètres	P.06
-------------------------------	------

Modélisation et Résultats

Cas-test	P.07
Résultats 'Compaction', 1 élément	P.08
Résultats 'Compaction', 1000 éléments	P.09
Carte de densité, 1000 éléments	P.10
Compaction-Frittage, 1000 éléments	P.11
Etude de sensibilité suivant maillage	P.12
Conclusions	P.13

Fabrication des pastilles de combustible nucléaire

- Fabrication des pastilles :
 - Synthèse de la poudre
 - Mise en forme à froid, dans une presse
 - Frittage
- Un cahier des charges exigeant (densité, géométrie, état de surface, homogénéité, porosité ouverte et fermée, stabilité en température...)
 - Pour les pastilles PWR, BWR : UOX et MOX
 - Pour les pastilles SFR : MOX, pleines ou annulaires.
- Exigence géométrie : Problème des déformations lors du frittage, dues aux inhomogénéité de densité dans le comprimé, dues au frottement sur la matrice lors de la compaction.
- D'où l'intérêt de la séquence :
 - Modélisation de la compaction de la pastille
 - Modélisation du frittage.

Modélisation de la compaction des poudres nucléaires

- Plusieurs principes :
 - Mécanique des Milieux Continus : plusieurs modèles E.F. proposés
 - Méthode des Elements Discrets (DEM)
- Dans la littérature, deux modèles E.F. souvent considérés pour représenter la compaction de poudres:
 - Le modèle Cam-Clay modifié
 - Le modèle Drucker-Prager avec Cap

- Le modèle Cam-Clay modifié :
 - Proposé dans les années 50, nombreuses versions 'modifiées'
 - Surface de charge elliptique, ecrouissage associé
 - Dans Cast3m, version implémentée (avec Cohésion non nulle : **ok**).

Modélisation du frittage, ou du moins de la déformation induite par le frittage

- Plusieurs principes utilisables :
 - Milieu visqueux, et force de frittage (thèse O. Gillia, 2000)
 - Rétreint à partir des infos issues d'une dilatométrie ('Master Curve',...)
 - Rétreint en supposant densité finale homogène

- Rétreint en supposant densité finale homogène : Mis en œuvre dans des travaux de DRT Grenoble, pour des études industrielles
 - Très simple à mettre en œuvre avec Cast3M
 - Pastille comprimée inhomogène, pastille frittée homogène

- Principe : On suppose que le frittage va amener tout point de la pastille à la densité finale (par ex. 95%TD)
 - Les parties du comprimé moins denses ont plus de rétreint
 - On part du champ de densité relative inhomogène du comprimé cru, calculé ch_dens
 - On fait un calcul de rétreint (pseudo-refroidissement), fonction de $(ch_dens - 95\%TD)$

Identification des paramètres

- Identification du frottement poudre/matrice : méth.classique
- Nécessité de partir de la version Cam-Clay telle que programmée. Prise en compte de la cohésion.
- Programmation écrite avec contraintes principales : après recombinaison en fonction des contraintes isostatique P et déviatorique Q , on reconnaît les formules de $Kapa, Lambda$ et $G1$ en fonction des données expérimentales
- Frottement interne M : Formule déduite d'une démonstration CEA/DRT ($df/d\sigma_{r=0}$), mais nous considérons (en plus) une cohésion

- * 'MU' : coefficient de frottement
- * 'YOUN' : module de Young
- * 'NU' : coefficient de poisson
- * 'RHO' : masse volumique
- * 'E0' : *indice des vides initial*
- * 'M' : *coefficient de frottement*
- * 'P0' : *pression de préconsolidation*
- * 'COHE' : *cohésion*
- * 'KAPA' : *pente élastique dans un diagramme e-log(p)*
- * 'LAMD' : *pente plastique dans un diagramme e-log(p)*
- * 'G1' : *module de cisaillement*

$$(P - \delta P) = (P + COHE) \cdot \exp\left(-\frac{(1 + E0) \cdot \delta \varepsilon_{décharge}^e}{KAPA}\right) - COHE$$

$$G1(EPSE_{max}) = (Q_{comprimé} - Q_{déchargé}) / (2 \cdot \Delta \varepsilon_{décharge}^e)$$

$$KAPA = (1 + E0) \cdot \Delta \varepsilon_{décharge}^e / [\ln(P_{comprimé} + COHE) - \ln(P_{déchargé} + COHE)]$$

$$LAMD = KAPA - (1 + E0) \cdot Tr(\underline{\varepsilon}^p) / [\ln(P_{consolidation} + COHE) - \ln(P0 + COHE)]$$

$$M = \frac{3\sqrt{-3 \cdot COHE \cdot \sigma_r - \sigma_r^2 + 3 \cdot COHE \cdot \sigma_z - \sigma_r \cdot \sigma_z + 2 \cdot \sigma_z^2}}{\sqrt{9 \cdot COHE^2 + 12 \cdot COHE \cdot \sigma_r + 4 \cdot \sigma_r^2 + 6 \cdot COHE \cdot \sigma_z + 4 \cdot \sigma_r \cdot \sigma_z + \sigma_z^2}}$$

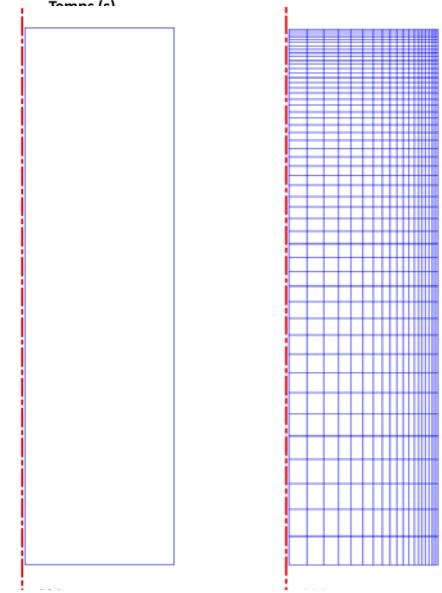
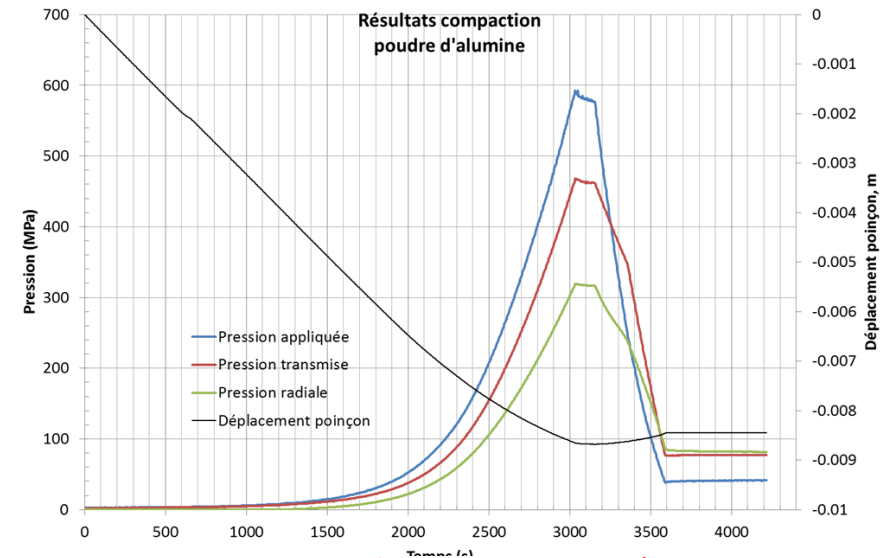
Cas-test

- Objectifs :
 - Modéliser un cas expérimental de compaction, pour vérifier notre méthode d'identification pour Cam-Clay
 - Modélisation du frottement poudre/matrice
 - Etude de sensibilité du maillage.

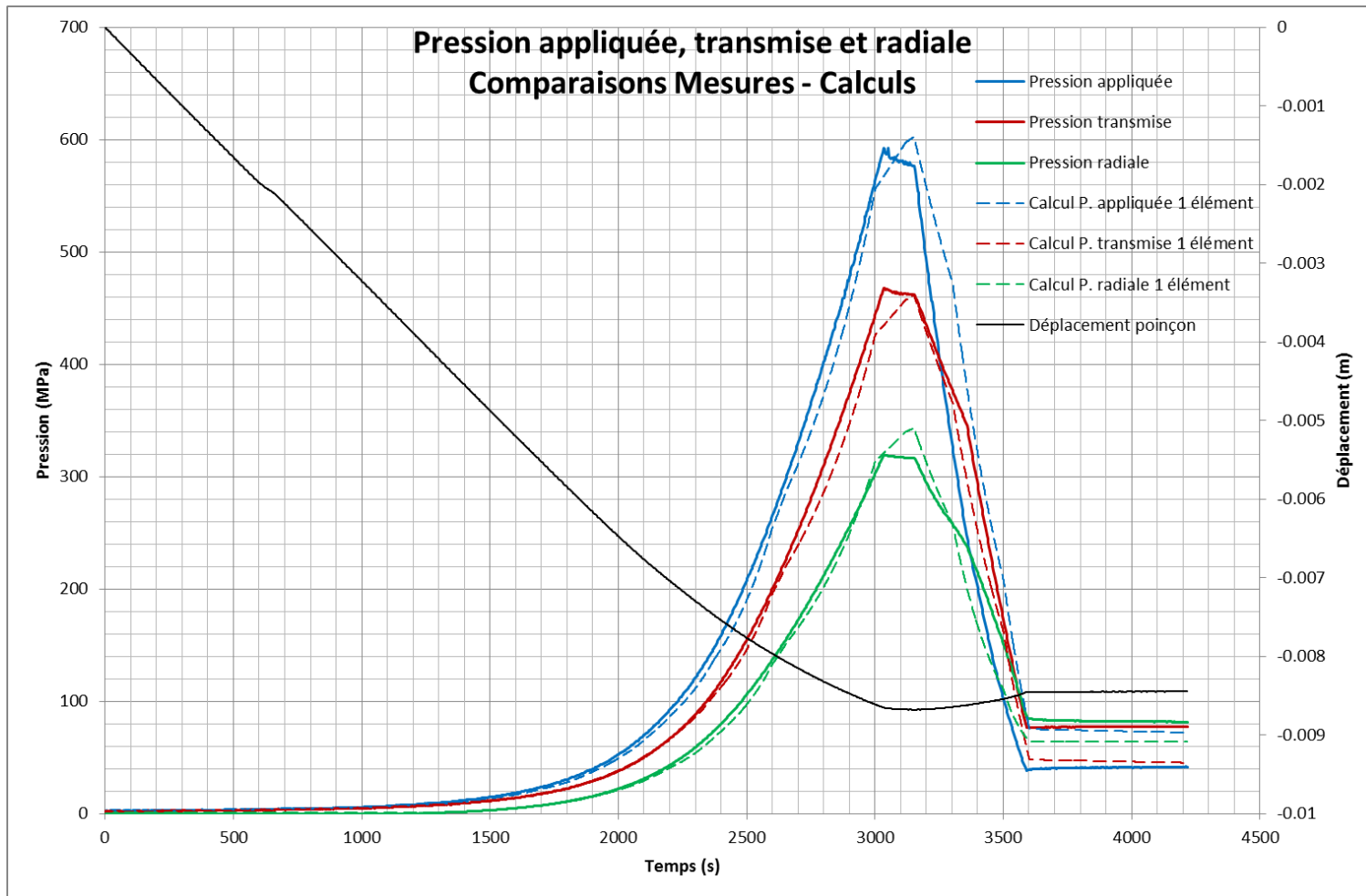
- Colonne de poudre (alumine) compactée (lentement, simple effet) dans une matrice (carbure de tungstène, indéformable).

- Données expérimentales : abaissement du poinçon, contrainte appliquée, transmise, radiale.

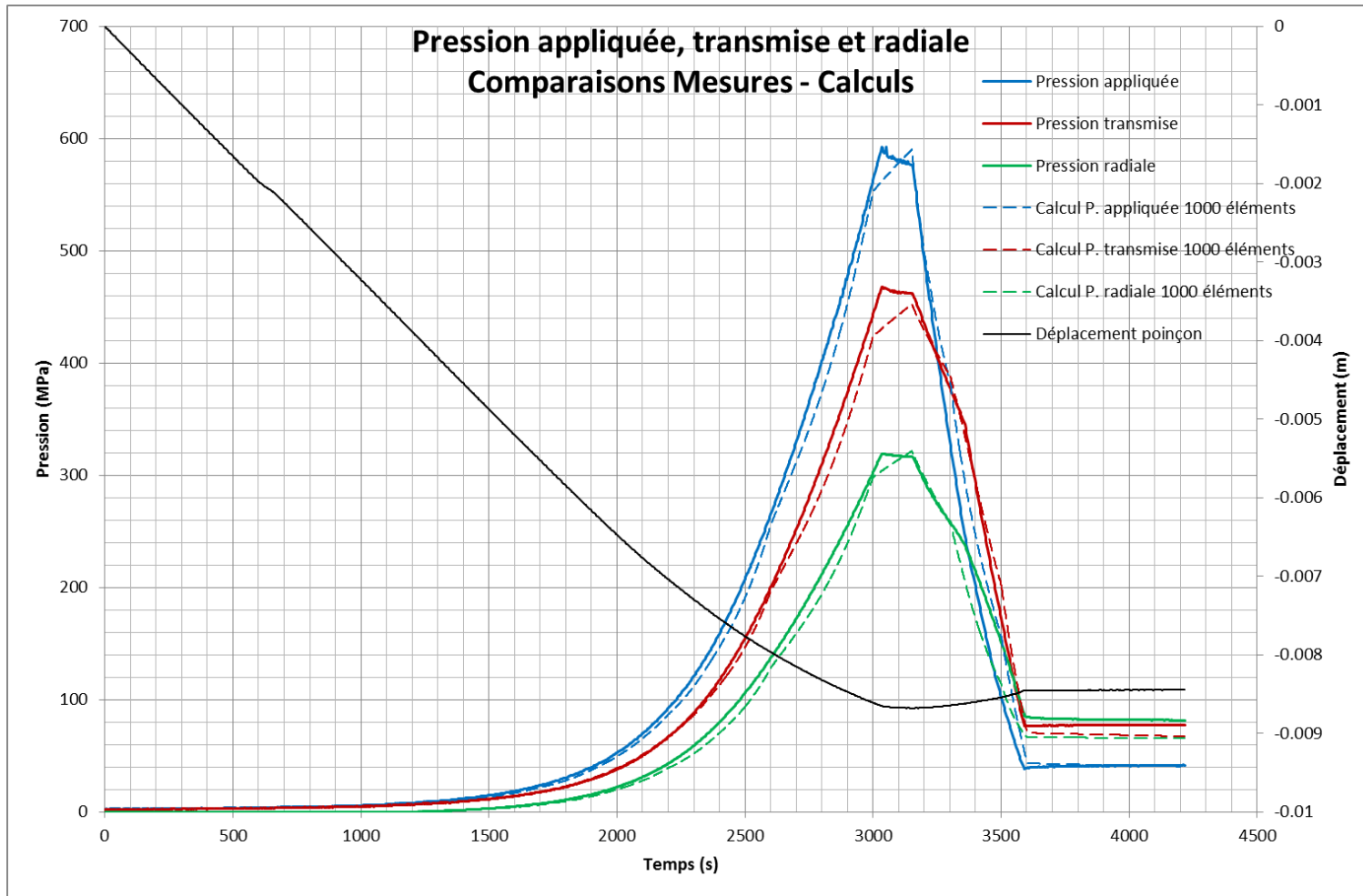
- Maillages : 1 élément, 4 éléments, 40 éléments, 1000 éléments



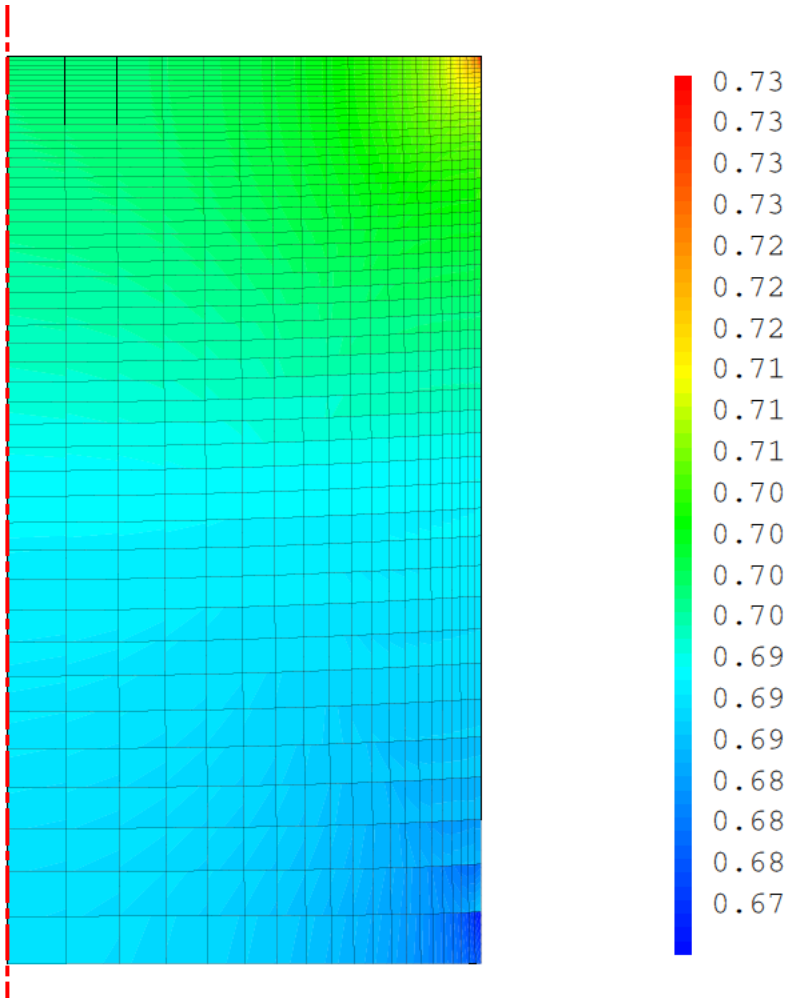
Résultats 'Compaction', 1 élément



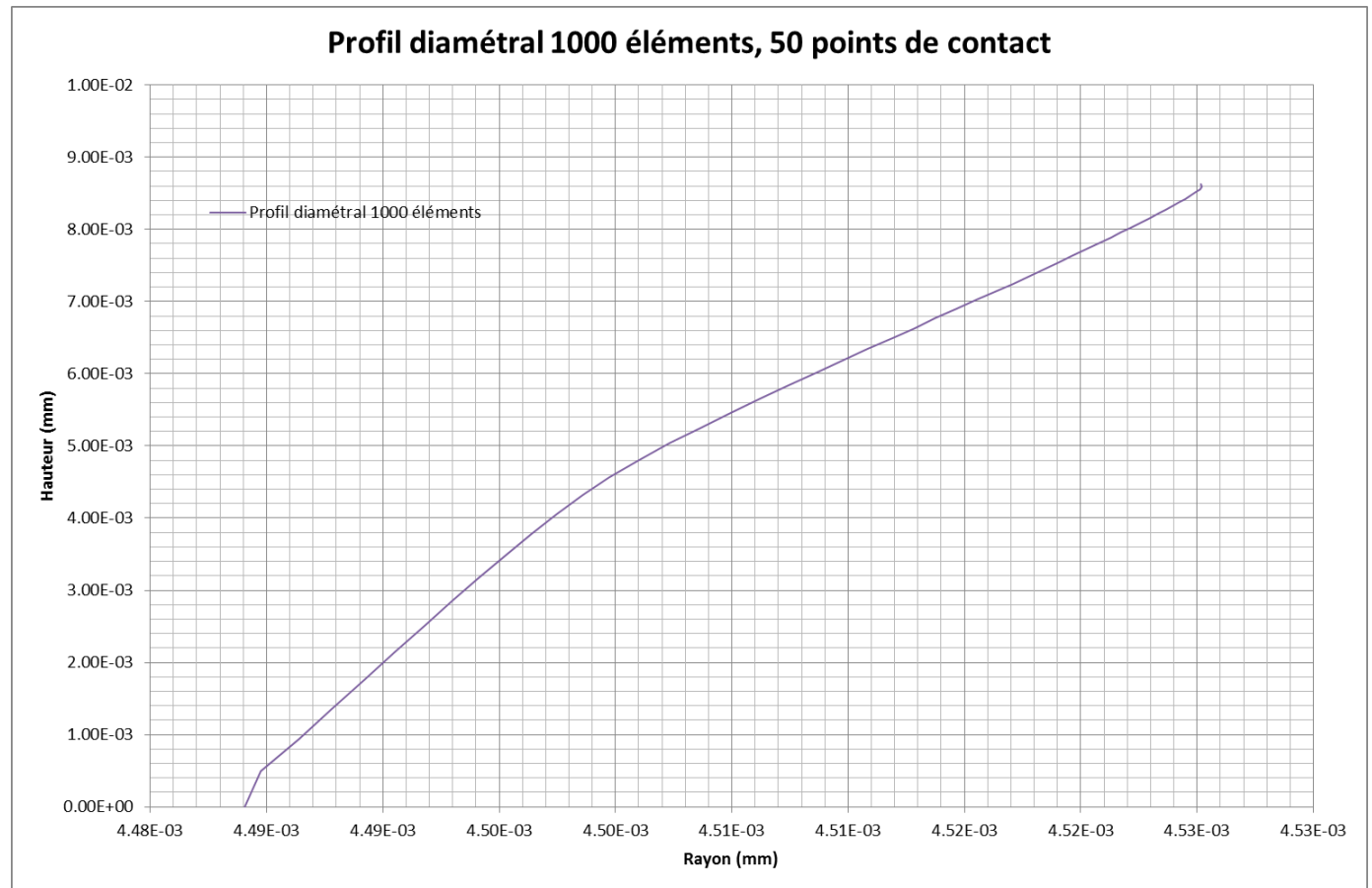
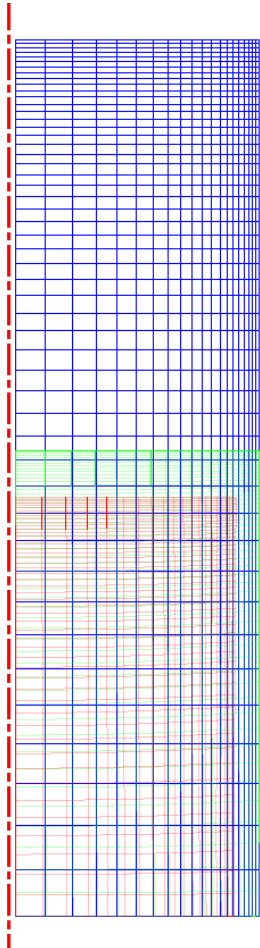
Résultats 'Compaction', 1000 éléments



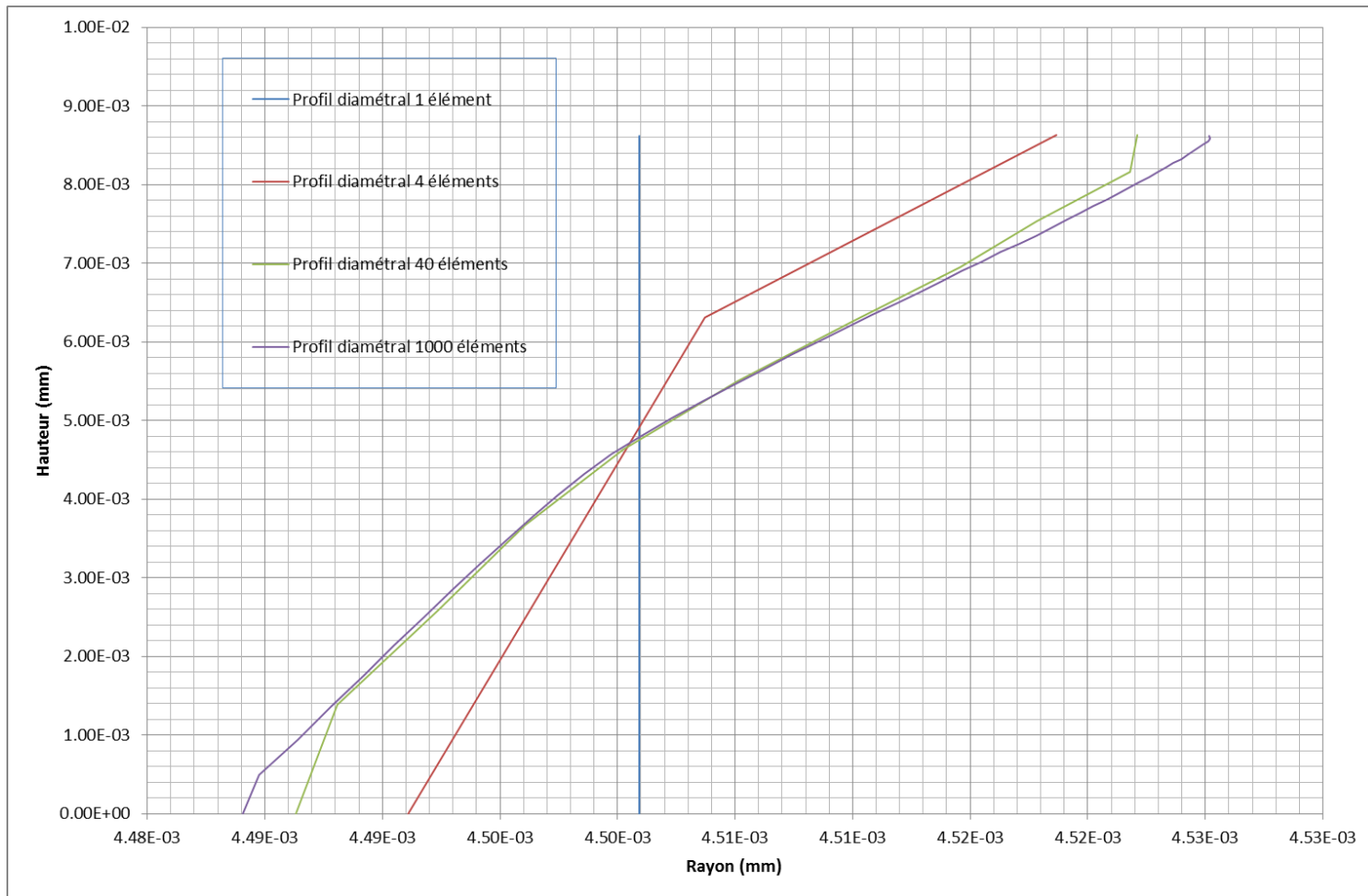
Carte de densité, 1000 éléments



Compaction-Frittage, 1000 éléments



Etude de sensibilité suivant maillage



Conclusions

- Modélisation de la compaction : méthode efficace pour retrouver les contraintes d'essai

- Améliorations possibles :
 - Essais interrompus pour améliorer précision *Kapa* et *G1*
 - Modèle Drucker-Prager avec Cap dans Cast3M ?

- Méthode directe pour évaluer les déformations dues au frittage
 - A venir : étape de vérification expérimentale, sur la géométrie de la pastille frittée

Merci de votre attention !

Avez-vous des questions ?

Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Marcoule | BP 17171, 30207 Bagnols-sur-Cèze Cedex
T. +33 (0)4 66 39 75 51

Etablissement public à caractère industriel et commercial | R.C.S Paris B 775
685 019

DEN
DTEC
SDTC