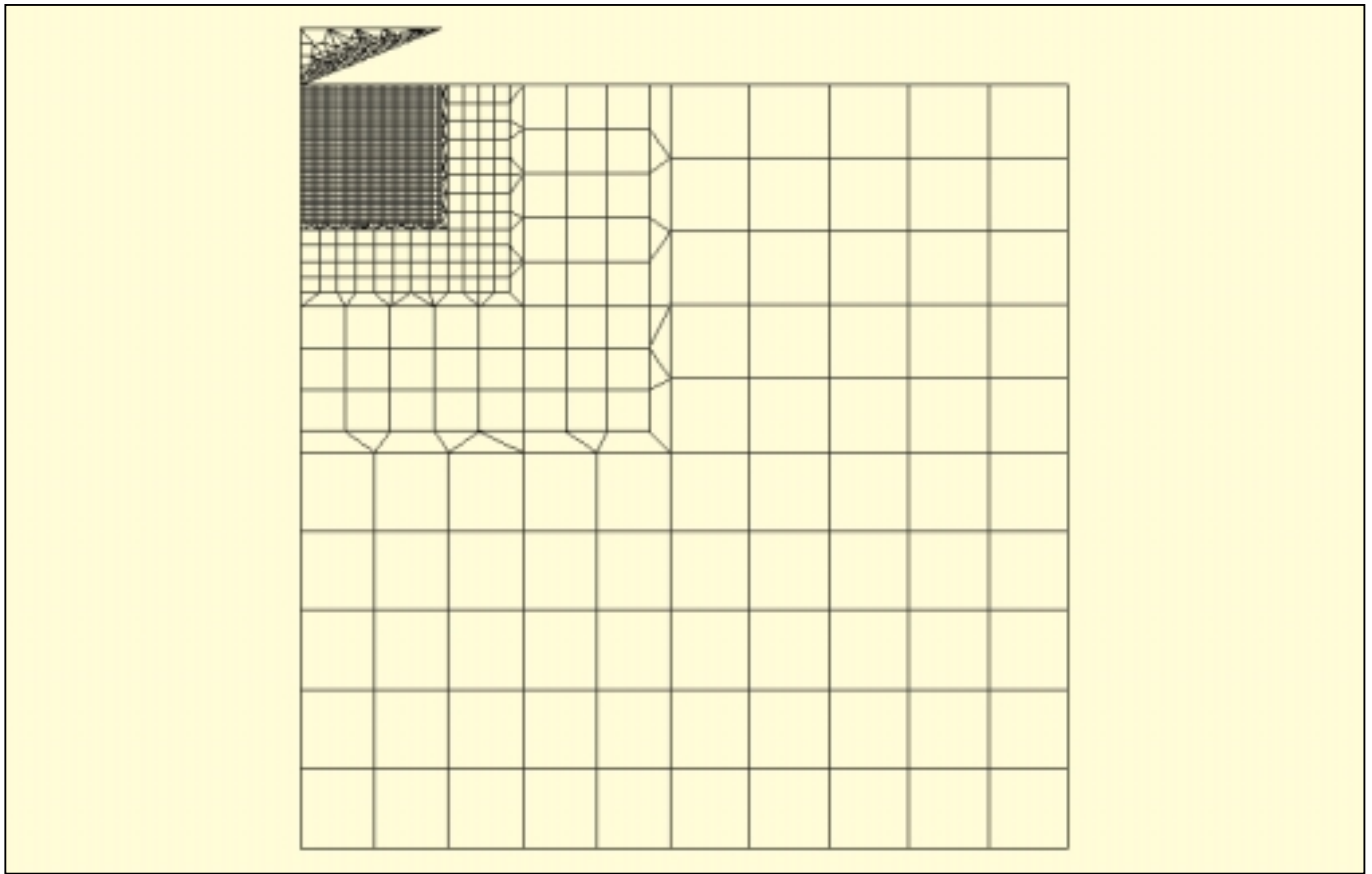


Modélisation de l'indentation



1 Maillage du massif et du poinçon

L'amélioration de la modélisation du comportement thermo-mécanique des pastilles de combustible nucléaire dans leurs conditions de fonctionnement est un enjeu important pour l'optimisation des performances de nos centrales. Pour ce faire, il est nécessaire de connaître avec une bonne précision les caractéristiques mécaniques du matériau. Compte tenu de la taille des pastilles et de leur radioactivité, des essais de traction simple ne sont pas praticables. Par contre, des essais de micro-indentation devraient permettre d'accéder aux constantes élasto-plastiques des matériaux. Deux méthodes sont à l'étude :

- l'utilisation de formules analytiques simples, liant ces constantes à une courbe de type charge-décharge obtenue par indentation. Cette méthode est applicable essentiellement dans

le cas de comportements très simples (plasticité parfaite par exemple) ;

- l'utilisation d'un logiciel d'optimisation : à partir du choix d'un modèle de comportement et de valeurs initiales des paramètres, ce logiciel déterminerait les paramètres optimaux de manière itérative, en comparant à la courbe charge-décharge de l'essai d'indentation des courbes obtenues par des calculs numériques représentant cet essai.

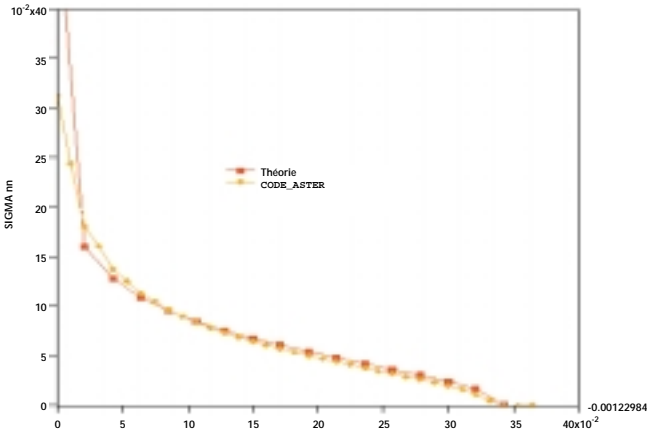
Les résultats présentés ici sont une étape préliminaire qui a permis de qualifier le *Code_Aster* dans le domaine de la modélisation numérique des essais d'indentation.

Plusieurs calculs ont été réalisés, utilisant la nouvelle fonctionnalité du code en matière de contact unilatéral quasi-statique décrite page 2 (mot-clé

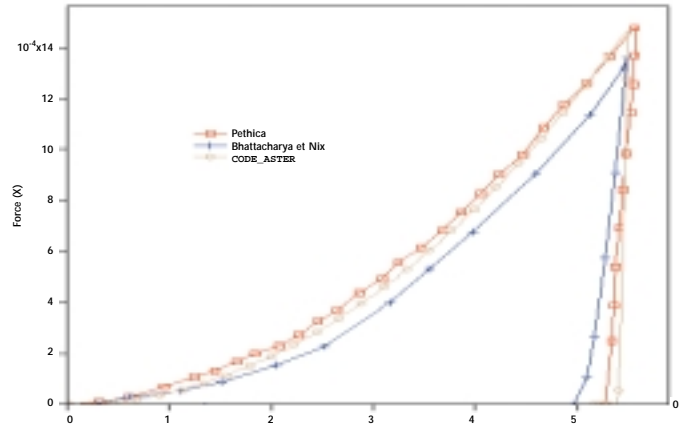
CONTACT de la commande `AFFE_CHAR_MECA`). C'est un contact nœud contre facette avec un appariement automatique réactualisé à chaque itération de Newton de la résolution des équations d'équilibre.

Le premier calcul consiste en l'indentation d'un massif élastique linéaire considéré comme semi-infini par un poinçon conique rigide. Les symétries du problème autorisent un modèle axisymétrique dont le maillage est présenté figure (1). La solution analytique de ce problème étant connue, on peut aisément qualifier le résultat du calcul numérique. Ainsi, pour un calcul en force imposée, on obtient une différence de 3% entre les profondeurs d'enfoncements théorique et numérique, ce qui est une marge d'erreur très acceptable. Sur la figure

Modélisation de l'indentation



2 Profil théorique et numérique de σ_{nn} en fonction de l'abscisse pour le calcul élastique



3 Comparaison des résultats du calcul élasto-plastique avec la littérature

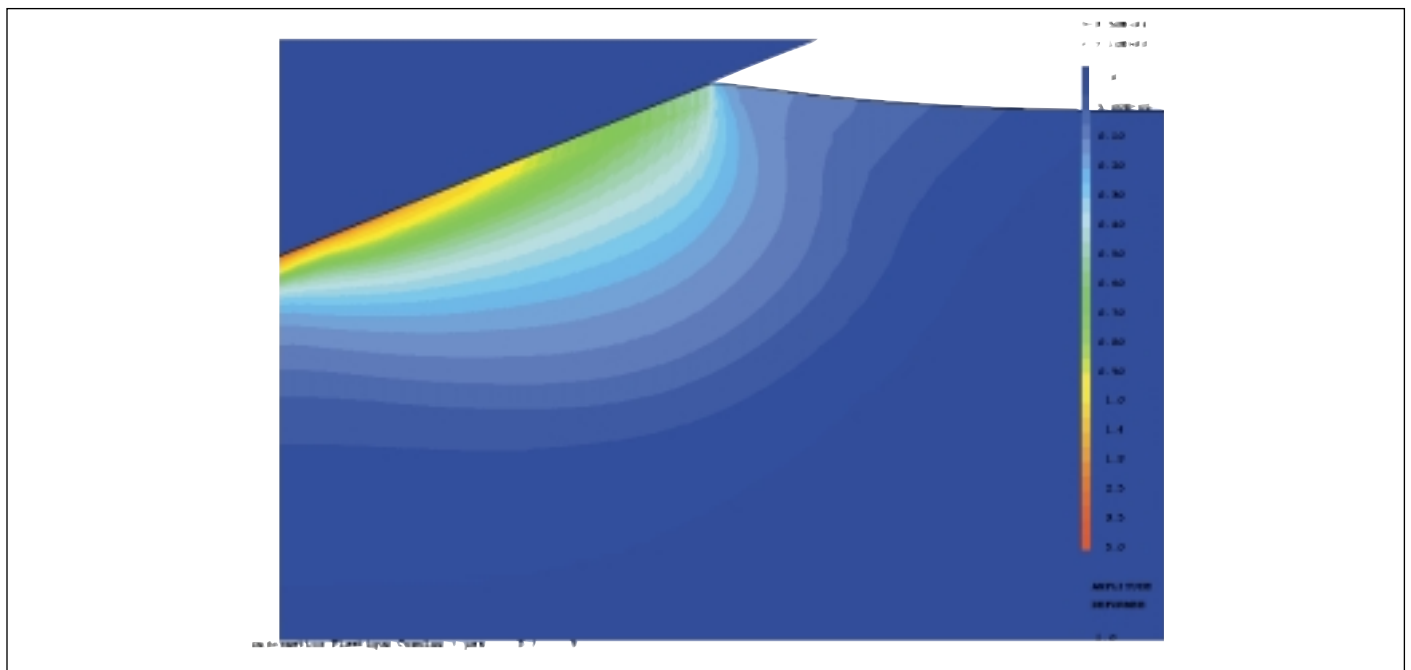
(2) sont représentés les profils théorique et numérique de la contrainte normale de contact en fonction de l'abscisse. L'adéquation de ces deux courbes confirme la qualité du calcul, même si la singularité (contrainte « infinie ») en pointe d'indenteur ne peut être décrite par un calcul éléments finis classique. De plus, les champs de contraintes et de déformations apparaissant dans le massif sont en accord avec ceux prévus par la théorie.

Des calculs en élasto-plasticité ont aussi été réalisés. Il s'agit de l'indentation conique d'un massif de nickel obéissant à une loi d'érouissage iso-

trope linéaire. Ces calculs ont été réalisés en géométrie réactualisée (fonctionnalité `PETIT_REAC`) : cela permet de réaliser un calcul en grandes déformations avec de grands glissements entre les surfaces en contact. La solution analytique de ce problème n'étant pas connue, la démarche de validation a été différente. La courbe d'indentation représentant la force de réaction du massif en fonction de l'enfoncement du poinçon a été comparée à celle obtenue par Bhattacharya et Nix, qui utilisent une modélisation du contact par pénalisation, ainsi qu'à celle obtenue par Pethica à partir d'essais expérimentaux. On constate sur la figure (3) que

la courbe obtenue avec le *Code_Aster* se situe entre les courbes obtenues dans les deux publications. La déformation plastique cumulée est présente sur la figure 4.

Les calculs effectués ont permis, non seulement de qualifier le *Code_Aster* pour la modélisation de l'indentation, mais aussi de valider la méthode d'obtention des caractéristiques reposant sur l'usage de formules analytiques : on obtient une erreur inférieure à 10 % sur le module d'Young. Les valeurs obtenues pour la limite d'élasticité sont moins bonnes, mais elles peuvent néanmoins être utilisées comme valeurs initiales dans



4 Déformation plastique cumulée pour le calcul et elasto-plastique