

**APPLICATION DES
DEVELOPPEMENTS
NUMERIQUES AU
COMPACTAGE DE TUBES
EN ZIRCALOY 4**

IV. Table des Matières

| | |
|---|------------|
| <i>IV.1. Contexte de l'étude</i> | 136 |
| IV.1.1. L'essai spécifique de compactage | 138 |
| IV.1.2. Le zircaloy 4 irradié | 139 |
| IV.1.2.1. Le zircaloy 4 | 139 |
| IV.1.2.2. Effet de l'irradiation sur le zircaloy 4 | 140 |
| IV.1.3. Recherche du matériau simulant | 141 |
| IV.1.3.1. Influence de l'état métallurgique | 142 |
| IV.1.3.2. Influence du type de sollicitation | 143 |
| IV.1.3.3. Influence de l'écrouissage | 144 |
| IV.1.4. Bilan et matériau simulant retenu | 144 |
| <i>IV.2. Modélisation numérique du compactage</i> | 145 |
| IV.2.1. Validation de la loi de comportement : dépliage d'un demi-tube | 145 |
| IV.2.2. Prise en compte du multi-domaines : compactage de trois tubes superposés | 147 |
| IV.2.3. Prise en compte de la fissuration : compactage d'un tube | 149 |
| IV.2.3.1. Localisation de l'amorçage | 149 |
| IV.2.3.2. Propagation | 151 |
| IV.2.4. Etudes de sensibilité | 152 |
| IV.2.5. Bilan | 153 |
| <i>IV.3. Etude et discussion sur l'influence d'une couche d'oxyde</i> | 154 |
| IV.3.1. Oxydation du zircaloy 4 | 154 |
| IV.3.1.1. Formation de la couche de zircone | 154 |
| IV.3.1.2. Description de la couche d'oxyde | 156 |
| IV.3.1.3. Etude mécanique de l'oxydation | 157 |
| IV.3.1.4. Bilan | 159 |
| IV.3.2. Etude expérimentale de l'oxydation de tubes en zircaloy 4 écroui | 160 |
| IV.3.2.1. Conditions d'oxydation | 160 |
| IV.3.2.2. Observations de microstructure | 161 |
| IV.3.2.3. Courbes Force/Déplacement | 164 |
| IV.3.2.4. Faciès de rupture | 166 |
| IV.3.2.5. Bilan | 169 |
| IV.3.3. Modélisation numérique du compactage d'un tube oxydé | 169 |
| IV.3.3.1. Hypothèses simplificatrices | 169 |
| IV.3.3.2. Simulation numérique du compactage d'un tube oxydé sans fissuration | 170 |
| IV.3.3.3. Sensibilité par rapport à l'épaisseur de zircone | 173 |
| <i>IV.4. Bilan</i> | 175 |

A la différence des trois chapitres précédents qui étaient centrés sur le développement de méthodes numériques, ce chapitre est à vocation applicative. Outre l'intérêt physique et industriel de cette d'application, cet exemple nous permettra de mettre en pratique et de tester les principales caractéristiques du code FORGE2 MULTIMATERIAUX : la non linéarité du comportement, les grandes déformations, l'aspect multi-domaines et multi-matériaux, et la propagation de fissures.

L'étude qui suit consiste à modéliser le compactage de tubes en zircaloy 4 irradiés en réacteur à eau pressurisée (REP), afin de mettre en évidence les mécanismes de déformation et de rupture lors de l'essai de compactage. Pour cela, nous commencerons par présenter brièvement le contexte industriel de l'étude, le fonctionnement d'une centrale nucléaire, et ses principaux constituants. Nous présenterons ensuite plus particulièrement le zircaloy 4, alliage à base de zirconium, et nous verrons les propriétés pour lesquelles ce matériau a été retenu. Puis, nous étudierons les principaux effets de l'irradiation sur les propriétés mécaniques du zircaloy 4. Toute cette **première partie** aura donc pour but de **présenter le contexte de notre étude ainsi que le matériau que nous étudierons**.

Dans la **seconde partie**, nous nous attacherons plus particulièrement à déterminer le **comportement mécanique de tubes en zircaloy 4 pour l'essai spécifique de compactage**. Des essais expérimentaux sur le matériau irradié n'étant pas envisageables ici (les impératifs de sécurité rendent le coût des essais exorbitant), nous chercherons un état métallurgique du zircaloy 4 dont les propriétés mécaniques sont suffisamment proches de celles du matériau irradié pour l'essai de compactage. Cela nous permettra notamment de valider les résultats numériques dans la partie suivante.

La **troisième partie** sera consacrée à la **modélisation numérique de l'essai de compactage**. Outre l'intérêt de cette application pour étudier les mécanismes de déformation des tubes en zircaloy 4 lors du compactage, nous pourrions également utiliser successivement tous les outils importants qui ont été décrits dans les premiers chapitres. Nous commencerons par valider la loi de comportement monomatériau déterminée précédemment sur un essai de dépliage d'un demi-tube. Puis, nous utiliserons les caractéristiques multi-domaines du code pour simuler le compactage de trois tubes superposés. Nous utiliserons enfin les développements en mécanique de la rupture pour modéliser les compactage d'un tube jusqu'à rupture complète.

Dans la **quatrième partie**, nous aborderons le thème de **l'oxydation des tubes en zircaloy 4** entraînant l'apparition d'une fine couche d'oxyde de zirconium (la zircone) sur les faces interne et externe du tube. Nous montrerons la complexité de cette oxydation, et son influence sur les propriétés mécaniques du matériau. Nous présenterons également la modélisation du compactage d'un tube oxydé, en insistant sur les hypothèses simplificatrices nécessaires à l'heure actuelle pour y parvenir. Cela nous amènera finalement à discuter des développements nécessaires pour modéliser avec précision un tel exemple d'application.

IV.1. CONTEXTE DE L'ETUDE

Le parc nucléaire français, décidé et conçu principalement au moment du choc pétrolier de 1973, est maintenant achevé depuis quelques années. Si le nucléaire représente actuellement 17% de l'électricité totale produite dans le monde, la production d'électricité en France est réalisée à 76% par le parc nucléaire (1995).

L'essentiel du parc EDF est composé de réacteurs à eau pressurisée (REP). Ces réacteurs utilisent de l'eau maintenue sous pression à l'état liquide, qui circule dans un circuit primaire, et échange ses calories dans des générateurs de vapeur. La puissance dégagée dans le cœur (1) d'une chaudière nucléaire (Figure IV.1.) permet de chauffer l'eau d'un premier circuit (2). Cette eau est entraînée par une pompe (5), et maintenue en pression par un pressuriseur (4). Cette eau chauffée est ensuite transformée en vapeur à l'aide du générateur de vapeur (3). Enfin l'ensemble de la chaudière est située dans une enceinte de confinement en béton armé (6). Notons que cette enceinte ne sert qu'en cas d'accident, puisque le confinement de toute fuite radioactive est assuré dans un premier temps par les gaines en zircaloy 4 entourant le combustible nucléaire, et dans un deuxième temps par l'enceinte étanche du circuit primaire.

Dans notre étude, nous allons nous intéresser au comportement mécanique des gaines en zircaloy 4 (appelées crayons) qui contiennent un empilement de pastilles de combustible (oxyde d'uranium fritté). Ces crayons sont obturés par des bouchons soudés, et les pastilles sont comprimées à l'aide d'un ressort aménageant en partie supérieure du crayon une chambre d'expansion qui permet de limiter la pression interne due au relâchement des gaz de fission. Enfin, on pressurise les crayons à l'hélium, de façon à diminuer les contraintes et la fatigue du gainage. Le cœur du réacteur est composé de 205 assemblages combustibles disposés verticalement. Chacun de ces assemblages est constitué de 264 crayons combustibles assemblés en un réseau carré de 17×17 crayons (Figure IV.2.).

Comme nous l'avons précisé précédemment, ces gaines en zircaloy 4 constituent la première barrière de confinement des matières radioactives. C'est pourquoi la tenue sous irradiation des matériaux constituant l'assemblage combustible est un des facteurs essentiels de son comportement en réacteur avec la tenue à la température et à la corrosion. De nombreuses études ont donc été menées sur la mise en forme des gaines en zircaloy 4 [Mulot 1997], [Logé 1999], sur leur tenue en réacteur, mais aussi sur leur oxydation [Parise 1996] et leur hydruration [Prat 1994] en réacteur.

Lorsque ces gaines arrivent en fin de vie, la question de la gestion de ce déchet se pose. Elle constitue la préoccupation principale de l'opinion publique actuellement. De plus, elle est prise en charge intégralement par les exploitants nucléaires, ce qui est rarement le cas dans la plupart des industries.

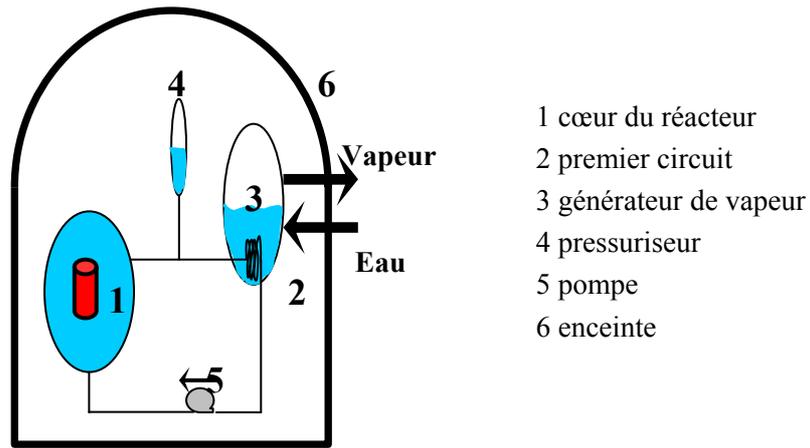


Figure IV. 1. Schématisation d'une chaudière nucléaire

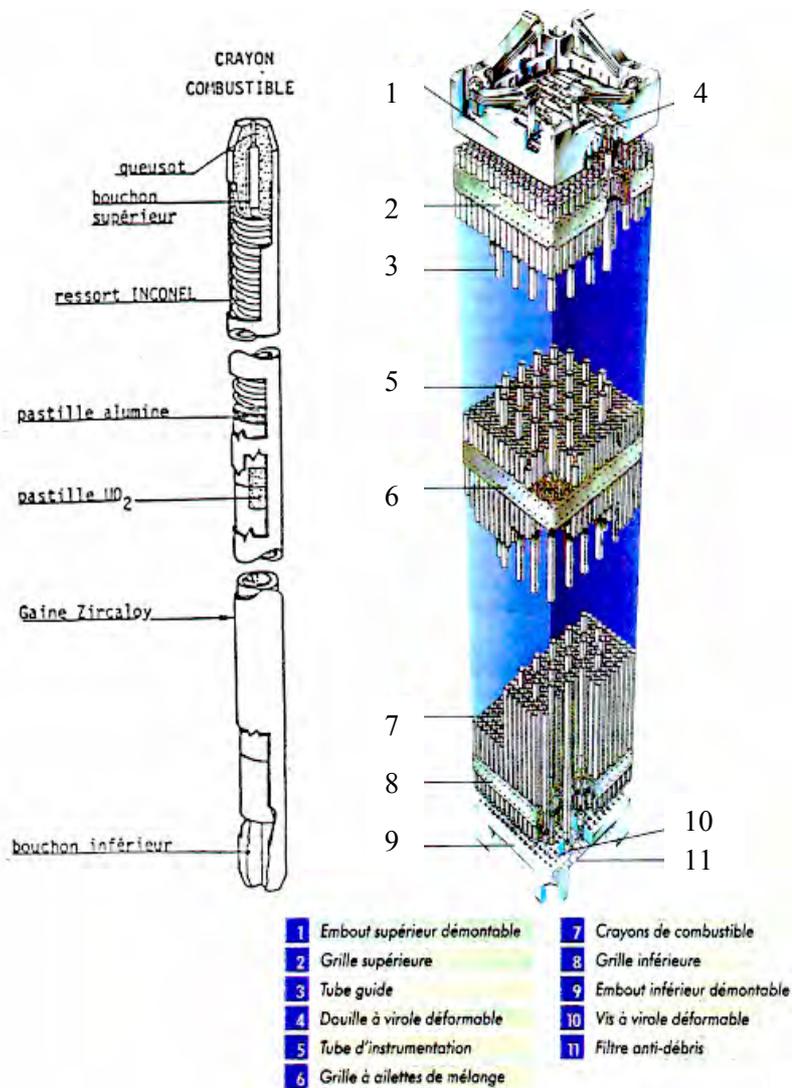


Figure IV. 2. Assemblage de crayons combustibles

L'étude que nous proposons ici consiste à étudier les propriétés mécaniques de tubes en zircaloy 4 irradié provenant de centrales REP. Pour cela nous étudierons les mécanismes de déformation et de rupture des tubes soumis à un **essai de compactage**. Dans une **première partie**, nous présenterons donc cet essai, ainsi que la géométrie des tubes étudiés.

Malheureusement, nous ne pourrons pas valider nos résultats numériques par rapport à des résultats expérimentaux sur le matériau irradié, car les essais ont été jugés très coûteux. Il sera donc nécessaire de trouver un matériau (que nous appellerons matériau simulant) qui ait des propriétés mécaniques très proches de celles du matériau irradié pour l'essai de compactage. Cela nous permettra d'effectuer des compactages expérimentaux et de comparer les courbes Force/Déplacement ainsi obtenues aux courbes numériques. Avant de déterminer ce matériau simulant, nous présenterons dans la **deuxième partie** le **zircaloy 4** utilisé pour les crayons combustibles, et nous étudierons les **effets de l'irradiation** sur leurs propriétés mécaniques.

La **troisième partie** sera alors consacrée à la **recherche d'un matériau simulant**. Pour cela, nous comparerons les propriétés mécaniques du zircaloy 4 dans **différents états métallurgiques**. Ces propriétés mécaniques provenant exclusivement d'essais de traction et d'éclatement, et le zircaloy 4 étant anisotrope, il sera également nécessaire de déterminer le jeu de paramètres correspondant le mieux à l'essai de compactage.

IV.1.1. L'essai spécifique de compactage

Afin de mettre en valeur les mécanismes de déformation et de rupture dans les tubes en zircaloy 4, nous avons choisi de développer spécifiquement l'essai de compactage. Nous étudierons donc des tronçons de tubes de 30mm de longueur, soumis à un compactage suivant leur génératrice (axe Oz sur la figure IV.3.). Les caractéristiques géométriques des tubes étudiés sont les suivantes :

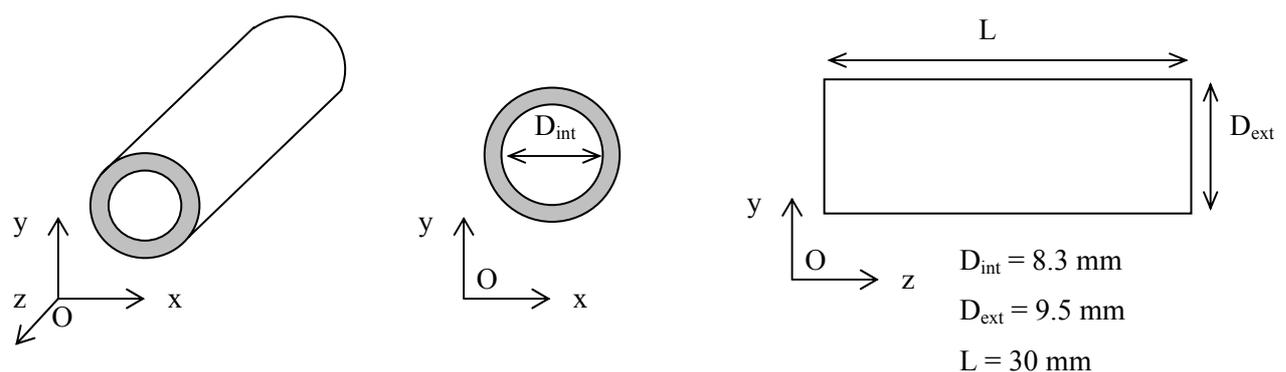


Figure IV. 3. Caractéristiques géométriques des tubes étudiés

Nous modéliserons plus particulièrement trois essais de compactages différents : le compactage d'un demi-tube (ou dépliagepliage), d'un tube, et de trois tubes superposés :

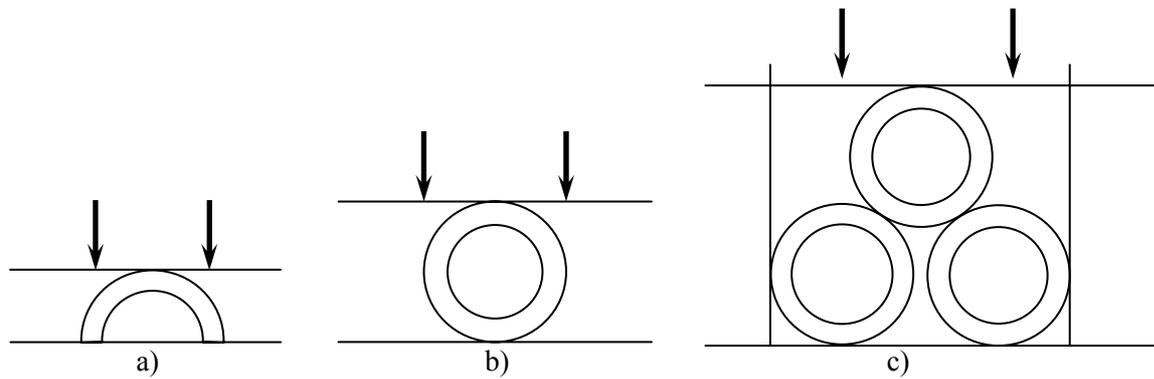


Figure IV. 4. Compactage a) d'un demi-tube, b) d'un tube, et c) de trois tubes superposés

Ces trois configurations nous permettront d'illustrer les différents développements effectués dans le code FORGE2 Multimatériaux. Enfin, dans le dernier sous-chapitre, nous modéliserons le compactage d'un tube oxydé grâce aux caractéristiques multimatériaux du code. Nous déterminerons alors les développements nécessaires à une modélisation plus précise du compactage d'un tube en zircaloy 4 oxydé.

IV.1.2. Le zircaloy 4 irradié

IV.1.2.1. Le zircaloy 4

Comme nous venons de le dire, les crayons combustibles sont réalisés en alliage de zirconium : le zircaloy 4. Le choix de ce matériau provient à la fois de sa transparence aux neutrons, et des ses bonnes propriétés de résistance à divers types de corrosion.

Le zirconium pur est de structure hexagonale compacte à la température ambiante (phase α). Il subit une transformation allotropique à $863^{\circ}\pm 3^{\circ}\text{C}$, température au delà de laquelle il présente une structure cubique centrée (phase β). Il possède un point de fusion élevé (1840°C), un très faible coefficient de dilatation thermique ($5,86.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ à 25°C) et une bonne conductibilité thermique (22W/mK à 300°C).

Il existe principalement trois alliages de zirconium couramment utilisés dans l'industrie nucléaire :

- le zircaloy 2 pour les centrales à eau bouillante :
1,5% Sn – 0,13% Fe – 0,12 % Cr – 0,11% O - 0,05% Ni ;
- le zircaloy 4 pour les réacteurs à eau pressurisée :
1,5% Sn – 0,21% Fe – 0,12% Cr – 0,11% O - <0,005 Ni ;
- les nouveaux alliages au Niobium pour les réacteurs à eau lourde ou pressurisée.

Dans la suite de notre étude, nous nous intéresserons au zircaloy 4, dont plus de détails sur sa microstructure et son comportement peuvent être trouvés dans [Mulot 1997]. De même, le rôle des différents éléments d'alliage dans le zircaloy 4 sont donnés dans [Logé 1999]. Ces éléments d'alliage ont surtout eu pour but d'améliorer les propriétés mécaniques des gaines, tout en préservant la faible absorption neutronique et la tenue à la corrosion. L'**étain** améliore sensiblement la tenue au fluage des

gaines, tout comme l' **oxygène** qui, de plus, agit sur la charge de rupture et la limite élastique à froid et à 400°C. Le rôle du **carbone** est encore plus actif, surtout à froid, puisqu' il augmente la charge de rupture et la limite élastique d' environ 80 MPa/100 ppm. Le rôle du **fer** et du **chrome** est de limiter la croissance des grains lors de la réaction de recristallisation et d' améliorer les propriétés mécaniques et la tenue à la corrosion. Enfin le **nickel**, convaincu de culpabilité dans la forte hydruration du zircaloy 2, sera quasiment éliminé pour créer le zircaloy 4.

Dans la suite de l' étude, nous nous intéresserons plus particulièrement aux propriétés mécaniques du zircaloy 4. Nous verrons (§IV.1.3.2.) qu' elles dépendent fortement du type de sollicitation que l' on étudie (traction en sens longitudinal ou transversal, éclatement, ...), ainsi que de l' état métallurgique du zircaloy 4 (détendu, hydruré, recristallisé, ...) et de la température.

IV.1.2.2. Effet de l' irradiation sur le zircaloy 4

Lors de l' irradiation, les gaines subissent à la fois une oxydation et une hydruration.

L' **oxydation** des gaines entraîne la formation d' une couche (interne et externe) de zircone. La couche de zircone interne, de faible épaisseur (8 à 10 μm), n' influe pas significativement sur les propriétés mécaniques des tubes. La couche de zircone externe pouvant parfois atteindre un dixième de millimètre a un rôle fragilisant plus important. Des **essais de traction**, réalisés à **25°C** sur des tubes irradiés, ont montré une **fragilisation** du matériau. L' irradiation entraîne une augmentation de la contrainte maximum σ_m , corrélée à une légère diminution de l' allongement total A_t , lorsque le temps passé en réacteur augmente. On remarque également une certaine stabilisation en temps des effets de l' irradiation, aussi bien en résistance qu' en ductilité.

L' **hydruration** est couplée à la réaction de corrosion du zircaloy [Prat 1994]. Lors du processus d' oxydation du zirconium, la réduction de l' eau libère de l' hydrogène au fond des pores de la zircone. La majeure partie de l' hydrogène est relâchée dans l' eau, mais une faible partie (environ 20%) est incorporée dans le tube après traversée de la zircone. Dès que la concentration en hydrogène dans le zircaloy dépasse la limite de solubilité, il y a formation d' hydrures qui précipitent sous forme de plaquettes. A température ambiante, on observe que les hydrures se répartissent de façon hétérogène dans l' épaisseur du tube. Ceci provient du gradient thermique lors de l' irradiation, entraînant une concentration d' hydrogène plus importante dans la moitié externe de la gaine. Les propriétés mécaniques du zircaloy 4 en présence d' hydrures sont influencées par de nombreux facteurs, notamment la distribution des hydrures et la température d' essai. Des études montrent l' importance du changement de mécanisme de rupture dû à la présence d' hydrures, à la température d' essai, ou à l' état de contrainte [Prat 1994].

Les **observations** du faciès de rupture, après traction dans le sens travers, au Microscope Electronique à Balayage (**MEB**) ont montré une rupture transgranulaire ductile à cupules avec de nombreuses fissures secondaires parallèles à la surface du tube et associées à des précipités allongés, dont la rupture présente un aspect fragile.

D'un point de vue mécanique, l'irradiation induit donc une **augmentation de la limite d'élasticité R_e** , couplée à une **fragilisation du matériau** (diminution de la résistance maximum R_m et de la déformation à rupture ϵ_r). Malgré cela on constate, tant en traction sens travers qu'en sens long, que les allongements totaux atteignent plusieurs pour-cent, voire plus de 10%. Cela représente une chute considérable par rapport aux propriétés mécaniques initiales, mais révèle une aptitude encore certaine à la déformation.

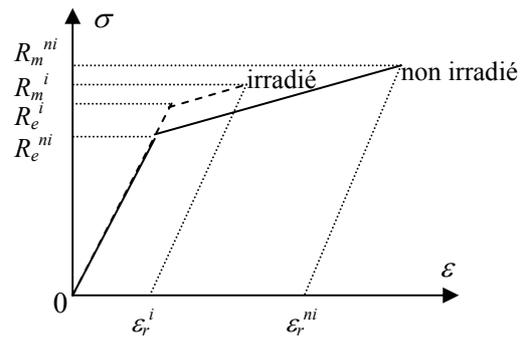


Figure IV. 5. Influence de l'irradiation sur la courbe contrainte-déformation

IV.1.3. Recherche du matériau simulant

Le zircaloy 4 utilisé à l'heure actuelle dans les REP est un zircaloy 4 à bas étain (teneur en étain 1,2% à 1,5%) à l'état détendu. Le rôle de l'étain dans les alliages de zirconium est de minimiser l'effet néfaste de l'azote vis-à-vis de la corrosion. L'amélioration des techniques de fabrication a permis petit à petit de réduire la teneur nécessaire en étain du zircaloy. Cette teneur ne doit cependant pas être trop réduite afin que les gaines conservent de bonnes propriétés mécaniques. L'état détendu est obtenu par un traitement thermique vers 475°C. On observe alors une structure de restauration partielle de l'écroutissage sans recristallisation, où les grains restent allongés avec une densité de dislocations résiduelles forte. Cette structure confère au matériau une résistance mécanique élevée dont les principales caractéristiques sont données dans le tableau IV.1. :

| Matériau | $\sigma_{0,2}$ (Mpa) | σ_m (MPa) | A_r (%) |
|-------------|----------------------|------------------|-----------|
| Zy4 détendu | 635 | 847 | 5,9 |

Tableau IV. 1 Caractéristiques mécaniques du Zircaloy 4 dans différents états.

Ces caractéristiques mécaniques ont été obtenues par essais de traction dans le sens longitudinal du tube (Figure IV.6.) à température ambiante.

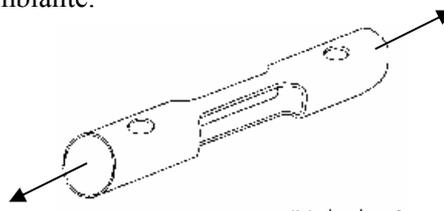


Figure IV. 6. Eprouvette de traction dans le sens longitudinal.

Comme le zircaloy est un matériau anisotrope, rien ne prouve que ces propriétés mécaniques sont adaptées à l'essai de compactage qui nous intéresse. De plus, nous avons vu que l'irradiation induisait

une fragilisation, une corrosion et une hydruration des tubes. Pour modéliser correctement le compactage de tubes irradiés, il est donc nécessaire de trouver :

- un état métallurgique du zircaloy 4 dont les propriétés mécaniques sont les plus proches possibles de celles du matériau irradié ;
- un type de sollicitation dont les caractéristiques mécaniques peuvent être adaptées à l'essai de compactage.

IV.1.3.1. Influence de l'état métallurgique

Les essais mécaniques sur les tubes irradiés étant très coûteux et difficiles à mettre en œuvre, nous avons recherché un état métallurgique du zircaloy 4 dont les propriétés mécaniques sont les plus proches de celles du matériau irradié. Pour cela, nous avons donc effectué une étude bibliographique pour des essais à température ambiante, en traction dans le sens longitudinal, sur les matériaux suivants :

- A : zircaloy 4 à l'état détendu irradié (données internes CEA);
- B : zircaloy 4 détendu non hydruré [Bouffioux et al. 1995] ;
- C : zircaloy 4 recristallisé non hydruré [Prat 1994] ;
- D : zircaloy 4 recristallisé hydruré [Prat 1994] ;
- E : zircaloy 4 écroui non hydruré [Bouchard et al. 1999] ;
- F : zircaloy 4 écroui hydruré [Prat 1994].

Les caractéristiques mécaniques accessibles pour ce type d'essais sont la limite d'élasticité σ_0 , la résistance maximum σ_m , et l'allongement réparti ε_r . A partir de ces trois valeurs, nous avons tracé sur la figure IV.7. les courbes contrainte/déformation correspondant à chaque matériau.

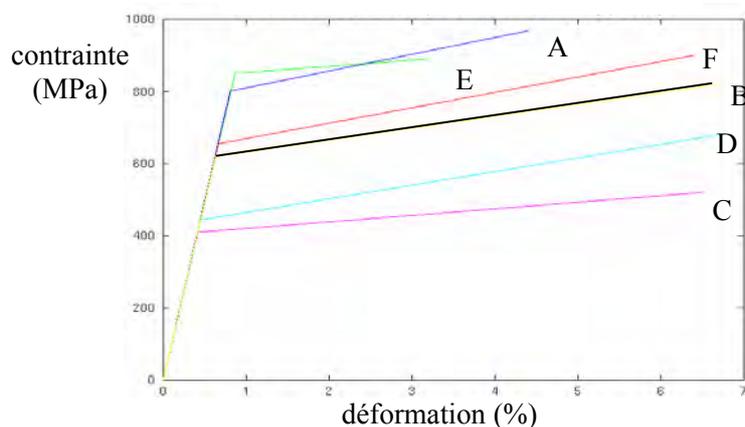


Figure IV. 7. Courbes contrainte/déformation correspondants à différents états métallurgiques

Le zircaloy 4 écroui non hydruré semble être un bon simulant du zircaloy 4 irradié, d'autant plus qu'étant légèrement plus fragile que le matériau irradié, il permet une approche majorante.

Le zircaloy 4 hydruré ne convient pas, car le procédé d'hydruration en température crée une restauration du zircaloy 4, qui le rend plus ductile. De même, le zircaloy 4 détendu non irradié, moins résistant et plus ductile, ne convient pas.

Cette étude montre donc que, parmi tous ces états métallurgiques, les tubes **écrouis non hydrurés** semblent présenter le comportement mécanique le plus proche des tubes irradiés. C'est du moins ce que l'on peut déduire des essais de traction dans le sens longitudinal.

IV.1.3.2. Influence du type de sollicitation

Cependant, avant de déterminer les caractéristiques mécaniques du zircaloy 4 pour la simulation, il est important de remarquer que le zircaloy est un matériau anisotrope. Il sera donc important, dans le paragraphe suivant, d'étudier les caractéristiques mécaniques provenant de différentes sollicitations, afin de choisir celles qui se rapprochent le plus de l'essai de compactage.

Pour un même taux d'irradiation (59 GWj/tU, 5 cycles à l'étage 2), nous avons recueilli les propriétés mécaniques des tubes soumis à des essais de traction dans le sens longitudinal (Figure IV.6.), des essais de traction dans le sens transversal (Figure IV.8.a) et des essais d'éclatement (Figure IV.8.b).



Figure IV. 8. a) traction en sens transversal – b) éclatement

Les essais de traction ont montré une résistance mécanique supérieure dans le sens transversal à celle dans le sens longitudinal, mais une ductilité axiale plus importante. Les essais d'éclatement montrent une déformation à rupture quasi-nulle et une contrainte maximum plus élevée que celle obtenue en traction dans le sens longitudinal ou transversal. Différentes simulations numériques du compactage d'un tube ont été effectuées avec les différents jeux de paramètres (Figure IV.9.) :

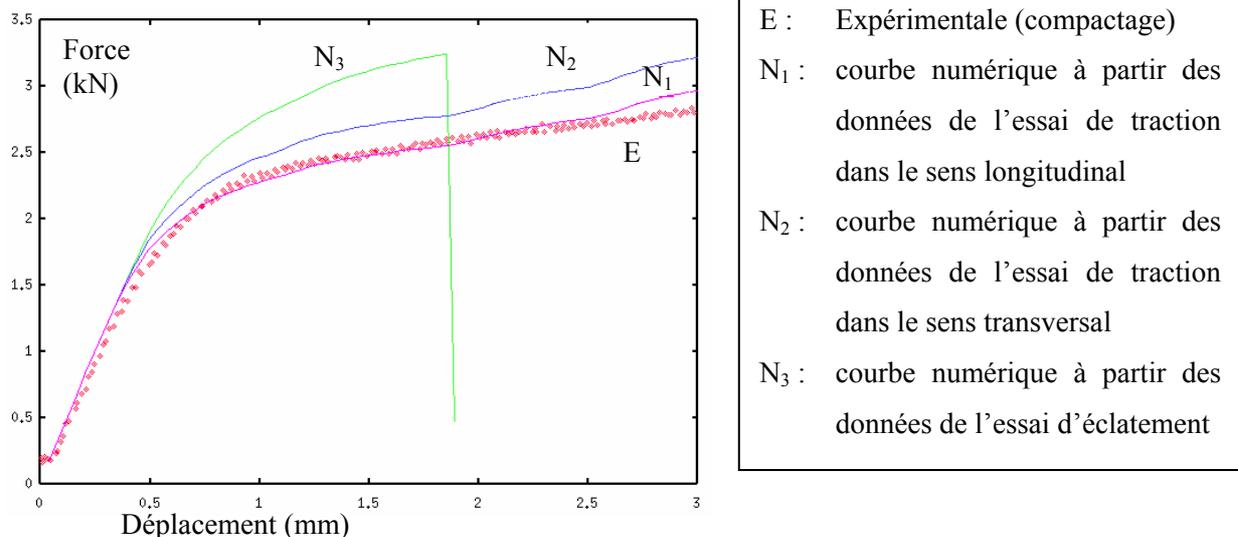


Figure IV. 9. Comparaison de la courbe Force/Déplacement expérimentale et des résultats numériques pour un essai de compactage d'un tube simple

Ces différences montrent la forte **anisotropie** du zircaloy 4. La comparaison des courbes Force/Déplacement obtenues avec la courbe expérimentale sur un essai de compactage (correspondant au matériau écroui) montre que les données provenant de l'essai **de traction dans le sens longitudinal** sont satisfaisantes pour représenter l'essai de compactage [Bouchard et al. 2000c].

IV.1.3.3. Influence de l'écrouissage

Les trois caractéristiques mécaniques que nous étudions ($\sigma_{0,2}$, σ_m , A_r) ne nous donnent malheureusement aucune indication sur la loi d'écrouissage de notre matériau. Afin de déterminer cette loi, nous avons effectué plusieurs simulations numériques du compactage, avec les données mécaniques de l'essai de traction dans le sens longitudinal, mais avec différentes lois d'écrouissage : écrouissage linéaire, et écrouissage puissance avec différents coefficients d'écrouissage. Puis, nous avons comparé les différentes courbes Force/Déplacement numériques à la courbe expérimentale pour l'essai de compactage (§IV.2.1.). Cette comparaison [Bouchard et al. 1999] montre que la loi d'**écrouissage linéaire** est la plus appropriée.

IV.1.4. Bilan et matériau simulant retenu

Les différentes études effectuées nous permettent de choisir le matériau simulant suivant : **zircaloy 4 écroui non hydruré**. Pour la simulation numérique, il faudra de plus prendre les propriétés mécaniques provenant de l'essai de **traction dans le sens longitudinal**, et utiliser une **loi d'écrouissage linéaire**. Les caractéristiques mécaniques qui seront donc utilisées pour modéliser le monomatériau seront les suivantes :

| | σ_0 (MPa) | σ_m (MPa) | ε_d (%) | ε_t (%) | ν | E (MPa) |
|-------------------|------------------|------------------|---------------------|---------------------|-------|---------|
| zircaloy 4 écroui | 850 | 880 | 2.1 | 2.3 | 0.3 | 80000 |

Tableau IV. 2. Caractéristiques mécaniques du zircaloy 4 écroui choisi pour modéliser le compactage

Les études précédentes ont permis de valider le zircaloy 4 écroui d'un point de vue mécanique global. Nous avons également étudié le matériau d'un point de vue microstructural. Plusieurs observations ont donc été effectuées au microscope optique et au MEB. Ces observations (dont nous parlons plus en détail au §IV.3.2.) montrent la structure de grains enchevêtrés des tubes en zircaloy 4, qui découle directement du procédé de mise en forme : le laminage à pas de pèlerin [Mulot 1997]. De plus, les observations au MEB du faciès de rupture (Cf. §IV.3.2.) après compactage des tubes écrouis sont très ressemblantes aux observations effectuées sur le matériau irradié : après un amorçage fragile, la rupture est à dominance ductile à cupules.

IV.2. MODELISATION NUMERIQUE DU COMPACTAGE

Maintenant que nous avons déterminé les caractéristiques mécaniques du matériau étudié, nous allons modéliser le compactage et comparer les résultats par rapport à des études expérimentales qui ont été menées en parallèle sur les tubes en zircaloy 4 écroui. La longueur des tubes étant de 30mm, une modélisation en déformation plane suivant une section est acceptable. Les comparaisons s'effectueront à la fois sur les courbes Force/Déplacement, et sur les déformations géométriques des tubes.

Nous commencerons par valider les caractéristiques mécaniques et la loi d'érouissage choisies sur un essai simple de compactage d'un demi-tube. Puis, nous appliquerons la caractéristique multi-domaines du code en compactant un assemblage de 3 tubes superposés. Les outils développés en mécanique de la rupture seront ensuite utilisés pour modéliser la rupture lors du compactage d'un tube monomatériau. Enfin, nous montrerons qu'une fois le code validé, des études de sensibilité par rapport à différents paramètres peuvent beaucoup nous apporter sur le plan de la compréhension des mécanismes de déformation.

IV.2.1. Validation de la loi de comportement : dépliage d'un demi-tube

L'essai de dépliage que nous proposons de modéliser ici (Figure IV.10.), s'effectue sur un demi-tube, provenant de la découpe de nos échantillon de 30mm suivant leur génératrice. Les caractéristiques mécaniques utilisées sont celles du zircaloy 4 écroui, provenant de l'essai de traction dans le sens longitudinal. La comparaison de la déformation du demi-tube entre la simulation et l'expérience est très bonne, comme le montre la figure suivante :

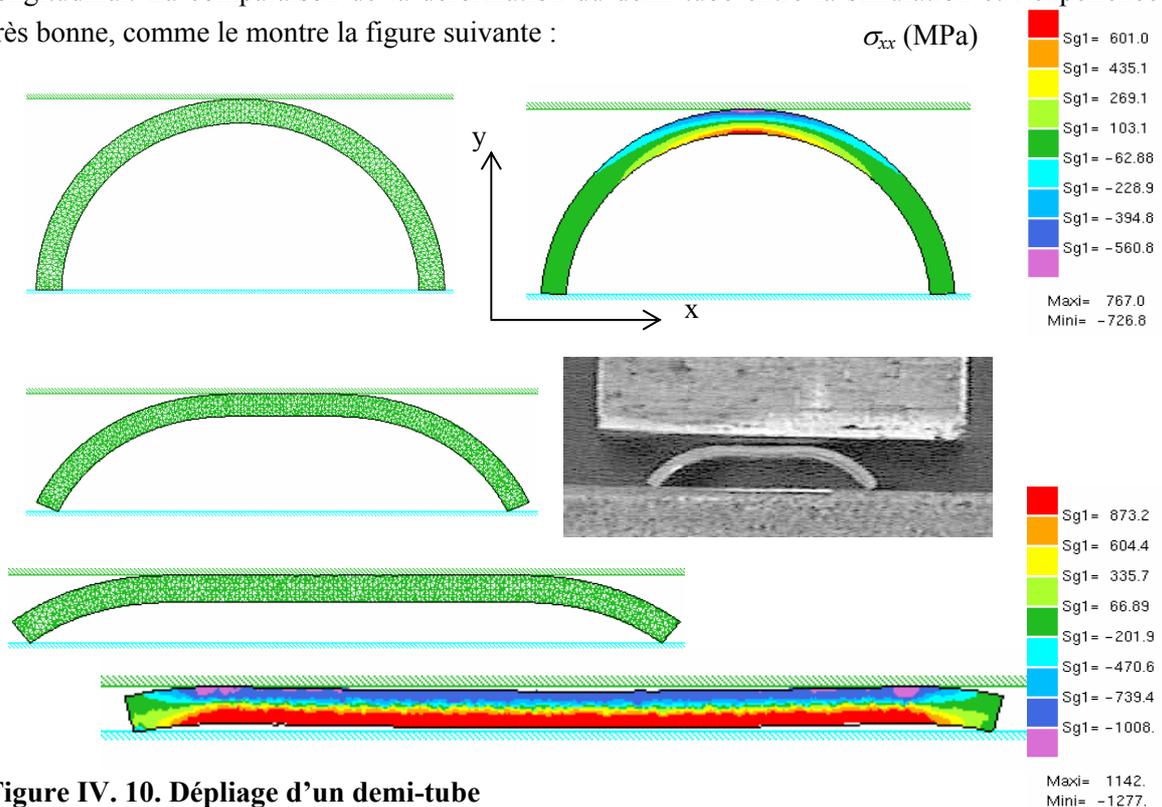


Figure IV. 10. Dépliage d'un demi-tube

De plus, le compactage du demi-tube s'effectuant librement et sans rupture, nous pouvons comparer les courbes Force/Déplacement provenant de la simulation et de l'expérience :

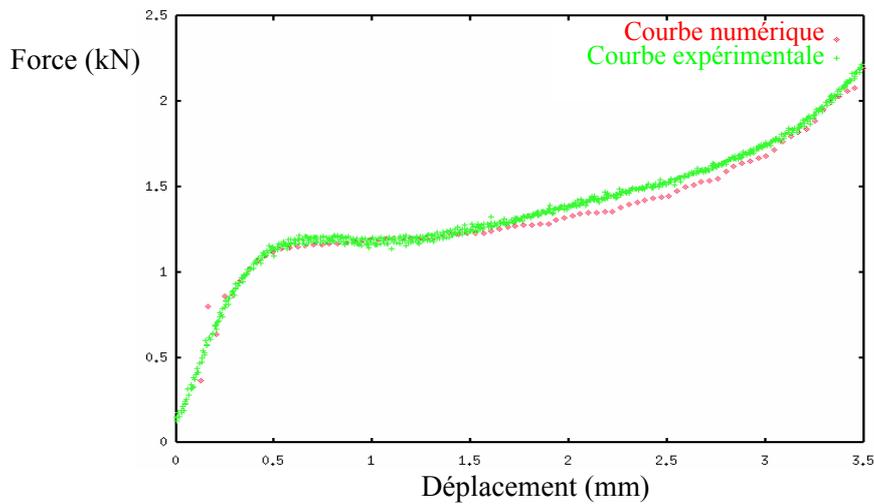


Figure IV. 11. Essai de pliage : Courbes Force/Déplacement numérique et expérimentale

Outre le fait que la comparaison entre les courbes numérique et expérimentale soit excellente, il faut souligner que les données mécaniques ayant servi à la simulation numérique proviennent d'un essai de traction longitudinale. Ces données semblent tout à fait convenir à l'essai de dépliage, et a fortiori à celui de compactage que nous proposons dans la suite.

Avant de passer au compactage de trois tubes, nous modélisons le compactage d'un tube sans rupture, et nous utilisons trois lois d'écroutissage différentes. La figure IV.12. montre la bonne ressemblance de la simulation numérique d'un point de vue qualitatif, puisque l'on observe (comme lors de l'expérience) un décollement du tube sur ses parties inférieure et supérieure, initialement en contact avec l'outil.

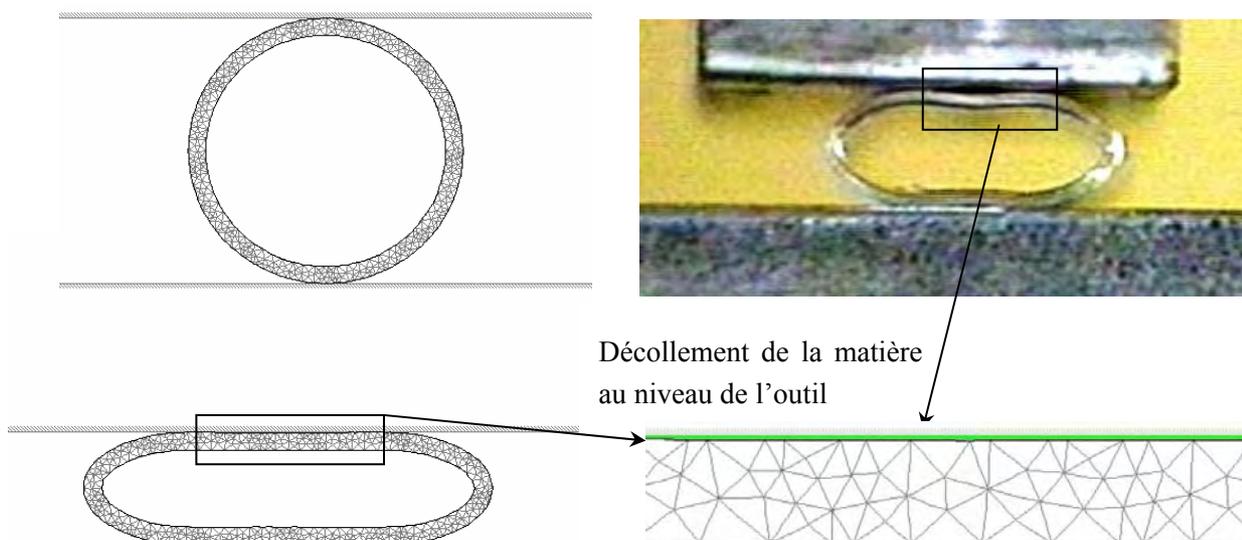


Figure IV. 12. Compactage d'un tube

D'un point de vue quantitatif, cette fois, nous avons utilisé les propriétés mécaniques du matériau écroui, en utilisant trois écrouissages différents : un écrouissage linéaire et deux écrouissages de type puissance avec des coefficients $n=0,05$ et $n=0,4$. Les lois d'écrouissages puissance sont du type : $\sigma_0 = \sqrt{3}K_0(\bar{\varepsilon} + \bar{\varepsilon}_0)^n$, où σ_0 représente la courbe d'écrouissage, K_0 est la consistance du matériau, $\bar{\varepsilon}$ la déformation plastique, $\bar{\varepsilon}_0$ le terme de régularisation de l'écrouissage et n le coefficient de sensibilité à l'écrouissage. La comparaison des courbes Force/Déplacement obtenues pour ces trois écrouissages avec la courbe expérimentale confirme que l'écrouissage linéaire est le plus adapté à notre essai de compactage.

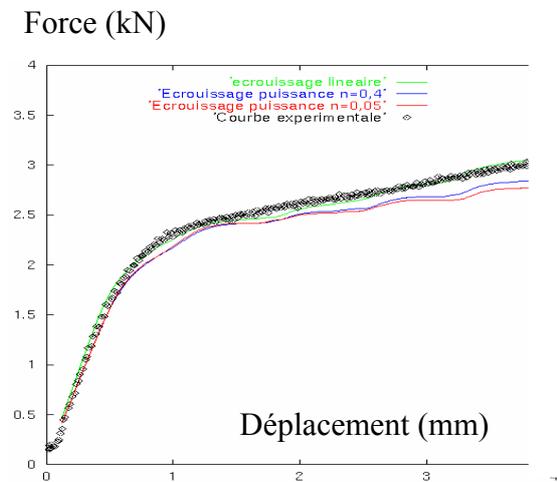


Figure IV. 13. Courbes Force/Déplacement pour trois écrouissages différents

Les bonnes comparaisons obtenues pour l'essai de dépliage et de compactage d'un tube montrent que la loi de comportement, déterminée dans le sous-chapitre précédent, permet de modéliser avec précision les essais de compactage qui nous intéressent.

IV.2.2. Prise en compte du multi-domaines : compactage de trois tubes superposés

Nous allons maintenant utiliser la caractéristique multi-domaines du code en modélisant le compactage de trois tubes superposés. Deux outils verticaux seront disposés de part et d'autre des tubes de façon à maintenir l'ensemble. Le maillage étant coïncidant aux interfaces, le contact entre les tubes sera collant.

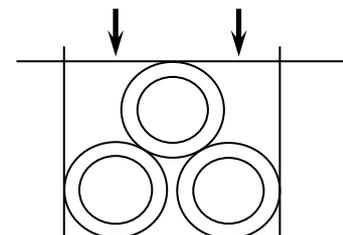


Figure IV. 14. Compactage de 3 tubes

Il est important de souligner la grande difficulté à modéliser un tel essai. Les grandes déformations subies par les tubes nécessitent de remailler régulièrement les trois tubes de façon à garder des éléments de bonne qualité. Ces remaillages doivent être effectués avec précaution au niveau du contact entre les tubes. De plus, ce contact doit être géré en permanence, puisque à chaque incrément les tubes s'interpénètrent.

La figure IV.15. montre les résultats de la simulation numérique, et une photo de l'essai expérimental. On retrouve là encore une bonne adéquation sur la déformation des tubes durant le compactage. On remarque que le tube supérieur se déforme de façon importante avant que les deux autres ne commencent à se déformer significativement.

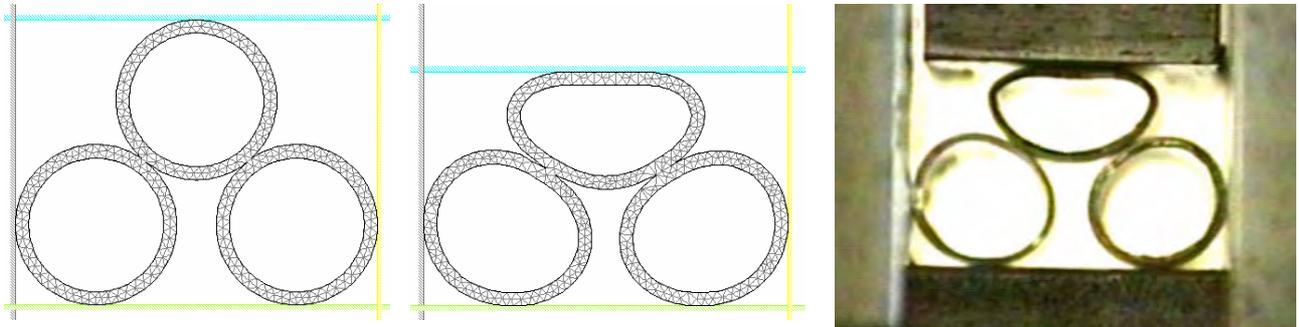


Figure IV. 15. Modélisation numérique et essai expérimental du compactage de trois tubes

Nous ne modélisons pas encore la fissuration sur cet essai, cependant il est possible de visualiser les contraintes dans les tubes, de façon à prévoir où les fissures pourront s'amorcer. Nous pouvons comparer sur la figure suivante, les champs de contrainte σ_{xx} (Figure IV.16.a) et σ_{yy} (Figure IV.16.b). Les zones rouges correspondent aux zones qui sont en traction et qui pourront être à l'origine de la rupture. Au même incrément, nous remarquons que les niveaux de contraintes σ_{xx} et σ_{yy} sont très proches. Les contraintes σ_{yy} sont légèrement supérieures, et sont surtout localisées sur les côtés latéraux externes du tube supérieur. C'est à cet endroit que la première rupture apparaît lors de l'expérience.

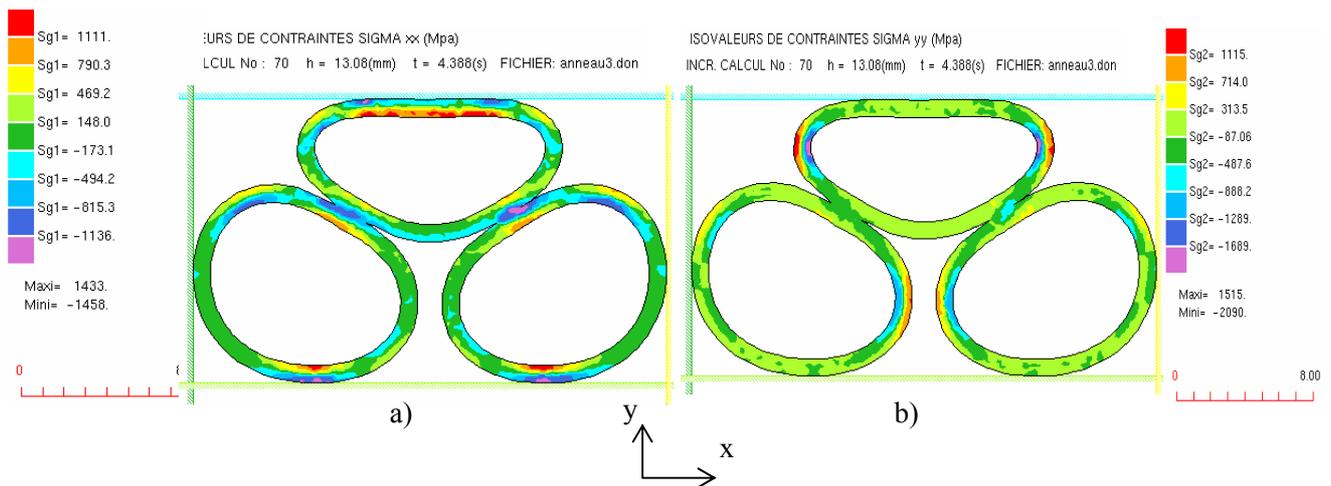


Figure IV. 16. Champs de contraintes lors du compactage de trois tubes