
Simulation de la décompression du réacteur HDR avec le code de dynamique rapide EUROPLEXUS

Serguei Potapov* — Fabienne Bliard** — François Téphany***

* *Electricité de France*
Recherche et Développement Dpt AMA
1 avenue du Général de Gaulle
F-92141 Clamart cedex
serguei.potapov@edf.fr

** *Socotec Industrie*
Analyse Mécanique des Equipements
1 avenue du Parc
F-78180 Montigny-le-Bretonneux

*** *Electricité de France, SEPTEN, Division MS*
12-14 avenue Antoine Dutrievoz
F-69628 Villeurbanne cedex

RÉSUMÉ. Ce papier présente une simulation numérique 3D avec le code de dynamique rapide EUROPLEXUS de la dépressurisation rapide du réacteur HDR (accident de type APRP) où le phénomène de l'interaction fluide-structure est modélisé dans toute sa généralité. Les différents modèles de couplage fluide-structure disponibles dans le code sont rappelés brièvement. La modélisation EUROPLEXUS de l'essai V32 de la campagne HDR est présentée ainsi que les résultats numériques que l'on compare avec les mesures expérimentales.

ABSTRACT. This paper presents a 3D numerical simulation with the fast dynamics software EUROPLEXUS of the depressurisation of the HDR reactor (LOCA type accident) where the phenomenon of fluid-structure interaction is modelled in a general manner. Different models of fluid-structure coupling available in the code are briefly described. EUROPLEXUS model of the test V32 of the HDR test campaign is presented as well as the numerical results compared with experimental measures.

MOTS-CLÉS: dynamique rapide, simulation numérique, interaction fluide structure, dépressurisation du réacteur HDR, comparaison calcul essai.

KEYWORDS: fast dynamics, numerical simulation, fluid structure interaction, depressurisation of HDR reactor, calculation measurement comparison.

1. Introduction

Afin de garantir la sûreté des installations nucléaires, les structures internes des Réacteurs à Eau Pressurisée (REP) sont dimensionnées pour supporter les conséquences mécaniques d'un certain nombre de situations accidentelles hypothétiques dont l'Accident de Perte de Réfrigérant Primaire (APRP). Le scénario de l'APRP suppose la rupture brutale d'une tuyauterie primaire qui provoque une décompression rapide du fluide et l'apparition d'un déséquilibre dans les forces thermohydrauliques sollicitant fortement le circuit primaire et les structures internes du réacteur. A cause de la flexibilité des structures internes et de la densité importante du fluide primaire, le degré de l'interaction fluide-structure est très important. C'est la raison pour laquelle la modélisation fidèle du phénomène de couplage fluide-structure est cruciale dans une simulation numérique pour obtenir les résultats physiquement réalistes.

Pour les fins de validation des modèles physiques et des algorithmes numériques des codes de calcul permettant de simuler les phénomènes dynamiques et thermohydrauliques rapides ayant lieu dans le réacteur après la rupture d'une tuyauterie sous pression, une campagne d'essais à l'échelle un, simulant une dépressurisation d'un réacteur HDR décommissionné, a été réalisée en Allemagne [WOL 81, SCH 84]. L'essai V31.1 a servi de cas de référence pour un benchmark de plusieurs codes de calcul allemands et américains [WOL 82]. Les comparaisons ont montré que les codes effectuant une analyse multidimensionnelle produisaient des résultats sensiblement plus réalistes que les codes adoptant pour la structure une modélisation simplifiée équivalente (en poutres ou sur base modale). Cependant, même les codes faisant appel à des modélisations géométriques 3D adoptaient certaines simplifications (linéarisation du couplage fluide-structure pour le cas de petits déplacements, utilisation de lois de comportement linéaire pour la structure, modélisation de l'anneau massif dans le fond de cuve par un modèle d'obstacle purement cinématique [MOR 84], etc.) qui limitaient la généralité de la simulation dynamique couplée fluide-structure.

Dans ce papier, nous présentons une simulation 3D avec le code de dynamique rapide EUROPLEXUS de la décompression diphasique du réacteur HDR qui s'affranchit de toute simplification dans la modélisation du couplage fluide-structure et dont la démarche reste valable dans une très large gamme de situations géométriquement et physiquement non linéaires.

Dans les sections suivantes, les bases théoriques d'EUROPLEXUS sont d'abord rappelées avec l'accent sur les différentes modélisations de l'interaction fluide-structure disponibles dans ce code en fonction de la dimension du problème. Ensuite, les éléments du modèle numérique mixte filaire-3D couplé fluide-structure sont exposés, suivis des résultats de la simulation de la dépressurisation rapide du réacteur HDR dont les conditions thermohydrauliques correspondent à l'essai V32 de la campagne HDR. Cet essai est choisi parce qu'il est caractérisé par une décompression la plus sévère parmi les essais de la série HDR réalisés en Allemagne

dans les années 1980 [SCH 84]. Les résultats d'EUROPLEXUS sont comparés avec les mesures expérimentales et les résultats numériques issus de [MOR 84] où l'approche par couplage des codes STEALTH (fluide) et WHAMSE (structure) a été adoptée.

2. Point théorique sur les modèles d'EUROPLEXUS

2.1. Informations générales

Le code de dynamique rapide EUROPLEXUS est né début 2000 de la fusion du logiciel CASTEM-PLEXUS du Commissariat à l'Energie Atomique à Saclay [CHA 79, HOF 84] et du code PLEXIS-3C développé au Centre commun de recherche de la Commission européenne à Ispra [BUN 89]. EUROPLEXUS est dédié à l'analyse numérique des situations accidentelles caractérisées par des phénomènes dynamiques transitoires rapides pouvant survenir dans des installations industrielles composées de structures et de fluides.

Trois formulations du mouvement – lagrangienne, eulerienne et ALE (Arbitraire Lagrange Euler) – sont mises en œuvre dans le code, la formulation ALE étant disponible aussi bien pour les matériaux fluides que solides qui peuvent subir de grandes déformations. Le formalisme ALE est également bien adapté pour traiter les problèmes avec interaction fluide-structure forte puisque le maillage mobile ALE du fluide se déforme de façon à suivre le mieux possible les déformations de la structure avec laquelle il se trouve en contact. La vitesse de déplacement du maillage ALE est indépendante de la vitesse des particules fluides. Dans le cas des tuyauteries souples traitées en filaire, la vitesse du maillage fluide dépend directement du mouvement des éléments de poutres représentant la tuyauterie.

Pour étudier les phénomènes dynamiques transitoires dans les structures et les matériaux solides, EUROPLEXUS résout les équations du mouvement résultant du principe des puissances virtuelles. Pour les fluides, les équations d'Euler qui expriment la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie sont considérées. Les équations d'équilibre dynamique sont intégrées en temps à l'aide du schéma explicite des différences centrées avec un pas de temps variable ; pour les fluides, le schéma d'Euler explicite d'ordre un est utilisé. EUROPLEXUS prend en compte les différents phénomènes non linéaires de nature physique et géométrique. La prise en compte de l'interaction fluide-structure est réalisée de manière forte *via* un algorithme de couplage faisant appel à la méthode des multiplicateurs de Lagrange (ce point sera détaillé dans la section suivante). Toutes les procédures traitant du couplage fluide-structure sont automatisées et ne demandent aucune intervention de la part de l'utilisateur.

Avec EUROPLEXUS, il est possible de bâtir des modèles numériques mixtes en mélangeant des modélisations filaire et volumique 2D/3D, avec un raccordement approprié des champs cinématiques fluide et structure. La possibilité de combiner

dans un même calcul une modélisation filaire (1D) pour les lignes de tuyauteries avec une modélisation 3D fluide et structure du composant, dont on cherche à étudier précisément le comportement dynamique, offre deux avantages majeurs : imposer des conditions initiales et aux limites du problème fluide-structure plus réalistes, tant mécaniques qu'hydrauliques, et avoir des temps de calcul raisonnables même pour les configurations industrielles de taille importante. Dans la présente étude, le couplage 1D-3D n'est utilisé que de façon marginale pour pouvoir appliquer la condition de débit critique à la brèche qui est unidimensionnelle dans le code.

Les capacités d'EUROPLEXUS ont été utilisées pour simuler le comportement dynamique du puits de cuve d'un REP lors d'une explosion vapeur [CAS 95] et pour estimer les effets hydrodynamiques dans un circuit primaire principal du réacteur [POT 00].

2.2. Modélisation du couplage fluide-structure

2.2.1. Couplage en 3D

Pour les parties 2D/3D du système couplé fluide-structure, le traitement des conditions d'interaction permanente de ces deux milieux dans EUROPLEXUS repose sur un découpage imaginaire le long de l'interface fluide-structure [CAS 95], faisant apparaître les forces de réaction \mathbf{r} échangées entre le fluide et la structure au cours du mouvement (figure 1).

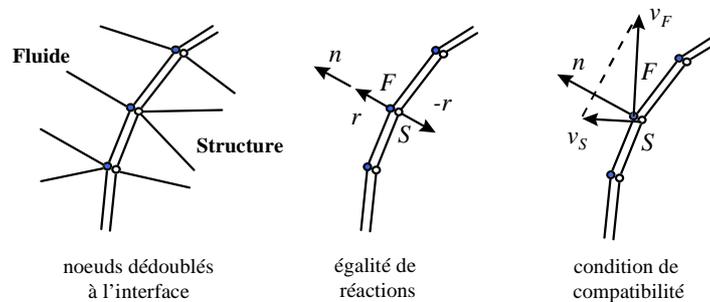


Figure 1. Conditions de couplage en volumique avec un contact permanent

Pour calculer ces forces, on écrit une condition de compatibilité cinématique (non pénétration) à l'interface, ce qui, dans le cas de fluide non visqueux (hypothèse justifiée pour la classe de problèmes considérée ici), s'écrit comme suit :

$$\mathbf{v}^f \cdot \mathbf{n} = \mathbf{v}^s \cdot \mathbf{n} \quad [1]$$

Portant sur les composantes normales des vitesses, l'expression [1] indique qu'il n'y a pas d'adhérence à l'interface et que le fluide peut librement s'écouler le long de la structure. La condition [1] garantit également que le fluide reste toujours en contact avec la structure lors de l'interaction. Pour assurer l'égalité des vitesses normales du fluide et de la structure à l'interface, la condition [1] est imposée de façon forte en utilisant la méthode des multiplicateurs de Lagrange adaptée à la résolution explicite [CAS 95].

L'interface est discrétisée par une double série de nœuds qui fait correspondre à chaque nœud du maillage fluide à l'interface un seul nœud du maillage de la structure. Dans le calcul couplé fluide-structure, les nœuds de la structure sont déclarés lagrangiens, ils définissent à chaque instant la géométrie spatiale de l'interface. Les nœuds du fluide, quant à eux, sont régis par le formalisme ALE et sont considérés comme nœuds esclaves. Grâce à la formulation ALE on peut, d'une part, prescrire leur mouvement de sorte qu'ils coïncident à tout moment du calcul avec les nœuds correspondants de la structure et, d'autre part, assurer un mouvement tangent indépendant du fluide par rapport à la structure.

Les relations de type [1] écrites pour toutes les paires de nœuds de l'interface fluide-structure peuvent se mettre sous forme générale d'un système de N_L relations cinématiques :

$$\mathbf{C} \mathbf{v}^n = \mathbf{b} \quad [2]$$

avec \mathbf{C} la matrice des coefficients des dimensions $N_L \times K_L$, \mathbf{v}^n le vecteur des vitesses nodales contenant K_L composantes impliquées dans les relations cinématiques, \mathbf{b} le vecteur des valeurs imposées. Dans le cas des interfaces mobiles et déformables, \mathbf{C} dépend du temps puisque les normales à l'interface changent de direction, \mathbf{b} est un vecteur nul.

Pour calculer de manière explicite les réactions qui satisfont [2], on écrit à l'instant t^n de calcul les équations d'équilibre pour les degrés de liberté (ddl) concernés :

$$\mathbf{m}^n \mathbf{a}^n = \mathbf{f}_{\text{ext}}^n - \mathbf{f}_{\text{int}}^n + \mathbf{r}^n \quad [3]$$

où \mathbf{m} est la matrice de masse de taille réduite dont les termes correspondent aux ddl de l'interface fluide-structure, \mathbf{a} désigne un vecteur (réduit) des accélérations, $\mathbf{f}_{\text{ext}}^n$ et $\mathbf{f}_{\text{int}}^n$ sont les vecteurs (réduits) des forces imposées et des forces internes, \mathbf{r} est le vecteur des réactions inconnues produites par les conditions aux limites [2].

Comme le calcul des réactions s'effectue au moment où la nouvelle configuration du domaine au temps t^n est déjà connue, $\mathbf{f}_{\text{ext}}^n$ et $\mathbf{f}_{\text{int}}^n$ sont donc connus alors que \mathbf{a}^n et \mathbf{r}^n sont à calculer. Pour le faire, on exprime les K_L réactions comme fonctions de N_L multiplicateurs de Lagrange $\boldsymbol{\lambda}^n$:

$$\mathbf{r}^n = \mathbf{C}^T \boldsymbol{\lambda}^n. \quad [4]$$

Les accélérations \mathbf{a}^n sont exprimées en utilisant le développement de la vitesse en série de Taylor et en prenant en compte [2] :

$$\mathbf{C} \mathbf{a}^n = 2/\Delta t (\mathbf{b} - \mathbf{C} \mathbf{v}^{n-1/2}) \quad [5]$$

En reportant [4] et [5] dans [3], on trouve d'abord les multiplicateurs de Lagrange, puis par [4] les réactions à l'interface. Pour calculer les multiplicateurs de Lagrange on est amené à résoudre à chaque pas de temps un système matriciel, qui a cependant une taille réduite puisque le nombre de ddl à l'interface fluide-structure est généralement petit par rapport au nombre total de ddl du problème. Une fois les réactions calculées, elles sont assemblées dans le vecteur global des forces externes qui sera utilisé dans le calcul des accélérations sur tous les ddl à l'instant t^n .

Pour la détermination des normales à l'interface fluide-structure discrétisée, plusieurs méthodes sont disponibles dans le code [CAS 01] dont :

- la méthode FSA (interaction Fluide Structure en ALE) basée sur des considérations purement géométriques ;
- la méthode FSR (dérivée de FSA) permet de traiter les cas où la structure peut être considérée comme indéformable et donc modélisée en paroi rigide sans être discrétisée ;
- la méthode UP (Pression Uniforme) reposant sur l'équilibre des forces de pression arbitraire uniforme.

Toutes les étapes de la procédure de couplage entre un volume fluide et une structure déformable programmées dans EUROPLEXUS sont complètement automatiques et ne demandent aucune intervention de la part de l'utilisateur.

2.2.2. Couplage en configuration filaire

Pour les parties du système fluide-structure modélisées en filaire (lignes de tuyauteries), le comportement du fluide ainsi que le traitement du couplage fluide-structure est pris en compte dans EUROPLEXUS de façon globale.

On s'appuie sur un élément de tuyauterie couplée TUYA ayant deux nœuds avec 7 ddl par nœud, dont 6 ddl associés à l'élément poutre d'Euler (3 translations et 3 rotations) et 1 ddl associé au fluide sous l'hypothèse 1D d'ondes planes. Puisque l'élément tuyau est déformable en traction-compression et en flexion, le fluide contenu dans cet élément est traité en formulation ALE. Un élément TUBE à deux nœuds (1 ddl de fluide par nœud) permet de modéliser uniquement le fluide contenu dans la tuyauterie et simplifier ainsi le calcul lorsque la tuyauterie peut être considérée comme fixe et infiniment rigide.

Dans les tuyauteries, plusieurs mécanismes d'interaction entre le fluide et la structure existent dont :

- le couplage inertiel par la masse ajoutée du fluide sur la structure dans la direction transversale lorsque le fluide est entraîné par le tuyau dans un mouvement de translation perpendiculaire à son axe longitudinal ;
- le couplage dans les coudes à cause du changement de direction des normales de section aux extrémités de coude, ce qui produit une force exercée sur la paroi ;
- le couplage dans les singularités du circuit : changement de section brusque (évasement de tuyauterie au niveau de gros composants, fond fermé, brèche, interconnexions de plusieurs branches) ;
- le couplage par prise en compte du frottement du fluide contre la paroi (pertes de charge réparties) ;
- le couplage par prise en compte de la pression interne dans la tuyauterie : modification des inerties de flexion des coudes, influence sur le critère de plasticité de von Mises par modification de la contrainte circonférentielle.

Dans EUROPLEXUS le couplage inertiel est pris en compte à travers une modification de la matrice de masse de l'élément TUYA : on rajoute aux composantes de translation de la matrice masse de poutre d'Euler une masse additionnelle due au fluide. La matrice de masse est réactualisée à chaque pas de calcul à cause de la variation de la masse volumique du fluide.

Les effets de couplage par frottement et dans les singularités sont pris en compte par rajout des forces complémentaires aux forces externes appliquées sur la tuyauterie.

Dans les couplages en configuration filaire la rétroaction de la structure vers le fluide se résume dans le fait que le mouvement de la tuyauterie modifie la configuration spatiale dans laquelle le fluide évolue, ce qui est pris en compte grâce au formalisme ALE.

2.2.3. Raccordement des modélisations filaire et 3D

2.2.3.1. Raccord mécanique

Cette liaison permet de générer automatiquement les relations mécaniques entre les degrés de liberté de la tuyauterie modélisée en poutre flexible (éléments TUYA) et une tuyauterie modélisée avec des éléments de coques minces.

On impose que les déplacements des nœuds des coques à l'endroit de raccord et du nœud de la poutre sont égaux et de même pour les rotations du plan de raccord contenant les nœuds des coques et la rotation au nœud extrémité de la poutre. Le vecteur vitesse de chaque nœud de la coque du raccord coques poutre est lié aux vitesses du nœud poutre par les relations classiques du mouvement de corps rigide.

La liaison coques poutre revient à utiliser l'hypothèse des poutres au niveau du raccord 1D-3D, c'est-à-dire à supposer que la section du maillage en coques raccordée à la poutre est indéformable et que tous les nœuds intervenant dans la

liaison restent coplanaires au cours de la déformation. Il faut donc éviter de mettre le raccord dans les endroits où les déformations locales ne peuvent pas être négligées devant la déformation globale d'ensemble.

2.2.3.2. Raccord fluide 1D-3D

Le raccordement des maillages fluide filaire 1D et volumique 3D est assuré par l'intermédiaire des éléments TUBM et TUYM.

L'élément TUYM permet de raccorder un maillage fluide filaire contenu dans un tuyau flexible modélisé avec les éléments TUYA à un maillage fluide volumique (figure 2). Cet élément s'appuie sur un nœud à 1ddl du maillage filaire et une surface fluide (éléments 2D) du maillage 3D.

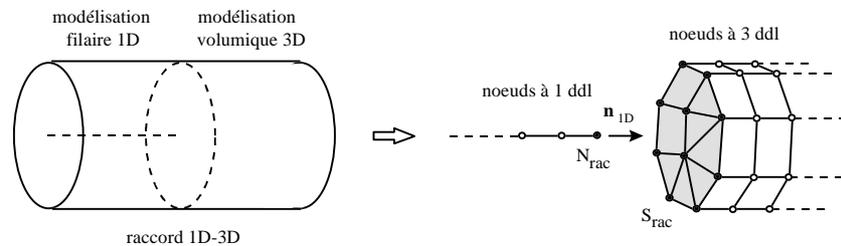


Figure 2. Raccord fluide 1D-3D

La surface S_{rac} est caractérisée par une normale unitaire définie comme suit :

$$\mathbf{n} = \frac{\Delta_S}{\|\Delta_S\|} \quad \text{avec} \quad \Delta_S = \sum_{k=1}^{N_f} \mathbf{A}_k$$

où \mathbf{A}_k est le vecteur associé à la k -ème face 2D de la surface S_{rac} , dirigé le long de la normale à cette face et ayant une longueur proportionnelle à l'aire de la face.

L'élément de raccord fluide assure la continuité des débits volumiques entre le maillage filaire et le maillage volumique, faisant appel à la méthode des multiplicateurs de Lagrange. Cette continuité est imposée par N_s relations de type [1] entre le nœud N_{rac} et N_s nœuds de la surface S_{rac} dans la direction de l'axe longitudinal de la partie filaire de la tuyauterie :

$$\alpha \frac{A_{3D}}{A_{1D}} (\mathbf{v}_{3D})_k \cdot \mathbf{n}_{1D} - v_{1D} = 0 \quad k = 1, \dots, N_s \quad [6]$$

Dans [6], A_{1D} et A_{3D} sont respectivement les aires des surfaces 1D et 3D (S_{rac}) à raccorder ; $(\mathbf{v}_{3D})_k$ est le vecteur vitesse (3 composantes) du fluide au nœud k de S_{rac} ; \mathbf{n}_{1D} est la normale à la section du tuyau 1D ; v_{1D} est la vitesse (1 composante) fluide au nœud N_{rac} du tuyau ; α est le coefficient permettant d'assurer la continuité des débits en prenant en compte d'éventuels écarts entre les maillages 1D et 3D à l'endroit du raccord (symétries ou discrétisation grossière en 3D).

A cause du mouvement et de la déformation du maillage de la structure (filare et 3D), le maillage fluide est lui aussi mobile et déformable étant régi par le formalisme ALE. Pour le raccord TUYM, il est nécessaire de réactualiser à chaque pas de temps la normale \mathbf{n} de la surface S_{rac} et de gérer le mouvement des nœuds du maillage fluide 3D appartenant à cette surface. Les nœuds du contour de S_{rac} suivent le mouvement de corps rigide imposé par la liaison mécanique coques poutre. De ce fait ils peuvent être considérés comme lagrangiens. Par contre, les nœuds internes de cette surface sont régis par le formalisme ALE et peuvent par conséquent avoir un mouvement quelconque bien que restreint dans le plan défini par le contour de S_{rac} .

Les tuyauteries rigides et fixes modélisées avec les éléments TUBE se connectent au maillage volumique par l'élément de raccord TUBM déduit de TUYM. Les raccords TUBM et TUYM imposent que les vitesses du fluide sur la surface S_{rac} du maillage 3D sont toutes égales et dirigées selon la normale à la face.

3. Description du problème physique

Le dispositif expérimental HDR est composé d'une cuve relativement épaisse munie d'un ajutage de sortie (*blowdown nozzle*) et des tuyauteries d'alimentation attachées à la cuve et permettant d'effectuer le conditionnement de l'installation à la pression et la température prescrites. Les structures internes du réacteur sont représentées par une enveloppe de cœur flexible à laquelle est attaché un anneau massif et rigide dont la masse correspond à celle de la plaque inférieure de cœur et des assemblages du combustible non représentés dans l'essai. La vue schématique du dispositif HDR est donnée sur la figure 3.

Le rayon interne de la cuve est égal à 1,48 m, son épaisseur est de 0,112 m. L'enveloppe de cœur a un rayon de 1,32 m et son épaisseur est égale à 0,023 m. L'ajutage de sortie a une longueur égale à 1,37 m et un diamètre de 0,2 m [SCH 84]. L'anneau massif a une masse de 13 500 kg.

Dans la phase de conditionnement, la cuve est remplie d'eau au repos sous pression de 11 MPa et à la température variant de 221,6°C dans le fond de cuve jusqu'à 308°C dans le plénum supérieur.

A l'instant initial de l'essai, l'ajutage s'ouvre rapidement (rupture de membrane en 1 ms) initiant ainsi un transitoire acoustique et hydraulique. Les conditions thermohydrauliques considérées correspondent à l'essai V32 caractérisé par une décompression la plus sévère de la campagne d'essais HDR.

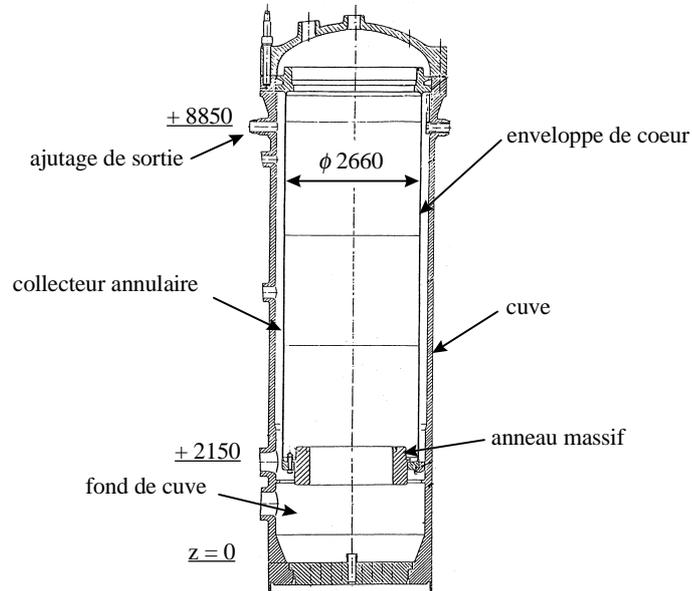


Figure 3. *Vue schématique du réacteur HDR, dimensions en mm*

4. Modélisation numérique avec EUROPLEXUS

4.1. Maillage

Le maillage élaboré est aussi fidèle au dispositif expérimental que possible et nécessaire pour que le calcul soit représentatif des phénomènes physiques ayant lieu lors de la dépressurisation du réacteur. Ainsi, les tuyauteries de service et leurs connexions à la cuve ne sont pas représentées dans le modèle ; la forme du fond de cuve en cône tronqué est remplacée par une forme cylindrique plus simple ; le volume supérieur de cœur n'est pas modélisé, permettant de minimiser le temps de calcul. Pour des raisons de symétrie de la cuve et des structures internes par rapport au plan vertical passant par l'axe de l'ajutage de sortie, on modélise uniquement la moitié du dispositif HDR en appliquant les conditions de symétrie sur ce plan portant sur les degrés de liberté structure et fluide.

4.1.1. Maillage fluide

Le maillage du fluide contenu dans la cuve et une partie de l'ajutage de sortie est constitué de 33 600 éléments hexaédriques à huit nœuds (au total 39 351 nœuds à 3 ddl par nœud). Pour éviter que les éléments fluide volumiques dans la zone de la connexion de l'ajutage à la cuve aient des faces non coplanaires, on a simplifié la forme de l'ajutage en adoptant une géométrie rectangulaire de section équivalente.

Vu les dimensions caractéristiques de l'ajutage (rapport longueur-diamètre), le fluide contenu dans l'ajutage peut être modélisé de manière satisfaisante en filaire et en 3D. Nous adoptons cependant une modélisation mixte filaire-3D du fluide dans l'ajutage (figure 4) à cause des raisons suivantes :

- la moitié de l'ajutage comprenant la brèche est maillée en filaire puisque la condition limite de type débit critique (IMPE DCRI) disponible dans EUROPLEXUS n'est applicable qu'à une extrémité d'un élément de tuyauterie en modélisation filaire. 23 éléments TUBE à 1 ddl fluide ont été utilisés dans cette partie.
- la moitié de l'ajutage connectée à la cuve est discrétisée en 3D avec un maillage hexaédrique relativement fin pour assurer une modélisation correcte de l'écoulement du fluide dans la zone où intervient un changement de direction brusque [LEP 00] ;
- les discrétisations 1D et 3D des deux parties de l'ajutage sont reliées par un élément de raccord TUBM (fluide uniquement) selon la procédure décrite dans la section 2.2.3.2.

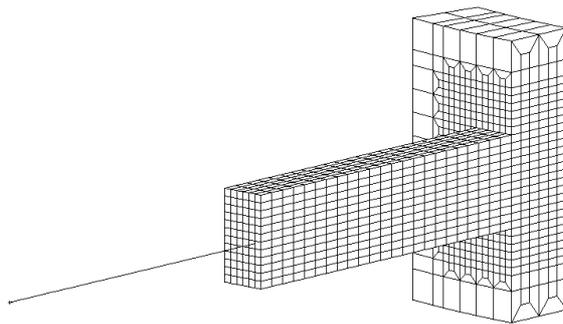


Figure 4. Zoom sur le maillage de l'ajutage et la zone de connexion ajutage-cuve

La petitesse de la section de l'ajutage de sortie (diamètre égal à 0.2 m) par rapport aux dimensions de la cuve (diamètre égal à 2.94 m et hauteur égale à environ 10 m) et la nécessité d'avoir un maillage fin dans la zone de connexion ajutage-cuve imposeraient une contrainte importante sur le maillage fluide en termes de nombre total d'éléments si l'on voulait conserver un maillage uniforme dans tout le domaine. Pour éviter un maillage fluide trop important, nous avons été amenés à déraffiner le maillage fluide dans le volume d'entrée selon les trois directions : circonférentielle, radiale et verticale.

4.1.2. Maillage structure

La cuve, dont l'épaisseur de paroi est de 11,2 cm, n'est pas représentée dans cette simulation étant supposée infiniment rigide et fixe au cours du calcul à cause de son inertie importante. De même, la souplesse de l'ajutage de sortie contenant plusieurs raidisseurs a été jugée négligeable, ce qui a permis de le modéliser par une condition limite fluide de type paroi rigide.

L'enveloppe de cœur est discrétisée avec 2 128 éléments finis de type plaque de Kirchhoff à quatre nœuds, ce qui résulte pour le maillage complet en 2 226 nœuds à 6 ddl (degrés de liberté). Le maillage de l'enveloppe est raffiné dans la zone en regard de l'ajutage de sortie afin de garantir la compatibilité de nœuds des discrétisations du fluide et de la structure à l'interface de deux milieux (contrainte imposée par l'algorithme de couplage). L'anneau massif est discrétisé à l'aide de 320 éléments volumiques hexaédriques à huit nœuds. Les maillages fluide et structure sont montrés sur la figure 5.

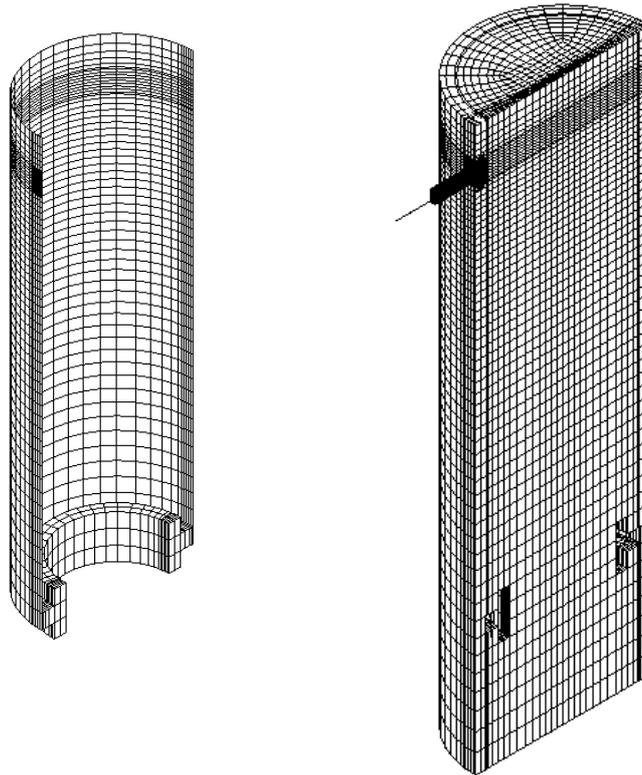


Figure 5. Maillage HDR structure (à gauche) et fluide(à droite)

4.2. Modèle HDR avec EUROPLEXUS

4.2.1. Formulations du mouvement

Trois formulations du mouvement sont utilisées dans le présent modèle. La structure comprenant l'enveloppe de cœur et l'anneau massif est traitée en formulation Lagrangienne. Le fluide quant à lui est traité en formulations ALE et Eulerienne. Le fluide contenu dans le collecteur annulaire, le fond de cuve et le cœur est considéré sur un maillage mobile et déformable dont le mouvement est conditionné à chaque instant du calcul par le champ de déplacement de la structure. Puisque la cuve et l'ajutage de sortie sont considérés rigides et fixes (condition de paroi rigide), le fluide dans l'ajutage est traité sur un maillage immobile, ce qui correspond à la formulation Eulerienne du mouvement.

4.2.2. Matériaux

4.2.2.1. Fluide

Le fluide interne est de l'eau sous la pression moyenne de 110 bars et à une température variant de 221,6 °C dans le fond de la cuve à 308 °C dans le plenum supérieur. Il est modélisé au moyen du matériau EAU EQUI d'EUROPLEXUS qui permet de traiter l'eau et sa vapeur comme un mélange homogène. Nous avons fait ici l'hypothèse que ce mélange est en équilibre thermodynamique (même pression et même température pour les deux phases).

Lors de la dépressurisation une partie de l'eau liquide peut changer de phase et se transformer en vapeur. La distribution spatiale de la température initiale va conditionner cette transformation, elle doit donc être étudiée avec attention. C'est la raison pour laquelle on a découpé le volume du cœur et le plenum supérieur en trois zones suivant l'axe vertical du réacteur afin de tenir compte d'une variation spatiale de la température. Dans la partie haute du volume de cœur la température de l'eau a été initialisée à 308 °C, dans la partie médiane à 295 °C et dans la partie basse à 283 °C. Dans le volume du fond la valeur de 235 °C a été imposée. Dans le collecteur annulaire ainsi que dans l'ajutage de sortie la température de l'eau a été initialisée à 240 °C.

4.2.2.2. Structure

L'enveloppe de cœur ainsi que la masse annulaire sont modélisées au moyen du matériau LINEaire d'EUROPLEXUS.

Compte tenu de la température, le module d'Young est égal à $1,75 \cdot 10^{11}$ N/m² et le coefficient de Poisson à 0,295. La masse volumique de l'enveloppe de cœur est égale à 7 790 kg/m³. Pour conserver la masse (6 750 kg) de la demi-plaque circulaire épaisse, modélisée « grossièrement » en 3D, on a attribué au matériau appliqué à cet objet maillage une masse volumique équivalente égale à 9 748,4 kg/m³.

4.2.3. Conditions aux limites et initiales

L'enveloppe de cœur est considérée encastrée dans sa partie haute. Les conditions de symétrie plane sont imposées sur l'ensemble des nœuds fluide et structure appartenant au plan de symétrie du dispositif.

On impose une liaison FSR (structure fixe) sur tous les nœuds fluide en contact avec la cuve rigide et une liaison FSA (interaction fluide-structure) sur tous les nœuds fluide en contact avec la structure interne mobile.

Dans la phase de conditionnement (avant dépressurisation), l'eau contenue dans la cuve est au repos. Les contraintes dans la structure sont supposées nulles. A un instant donné, on ouvre l'ajutage de sortie initiant ainsi un transitoire hydraulique. L'ouverture de brèche est simulée à l'extrémité libre de l'ajutage par une condition limite de type débit critique diphasique (avec le modèle de brèche homogène) et s'effectue en une milliseconde du temps physique.

4.2.4. Traceurs

Pour des fins d'analyse des résultats numériques et de comparaison avec les résultats expérimentaux un certain nombre de traceurs ont été disposés dans le modèle étant attachés aux nœuds du maillage pour les variables cinématiques et aux éléments du fluide et de la structure pour les variables internes. Les positions des traceurs utilisées dans cette étude sont identiques à la précision de maillage près à celles du document [MOR 84].

Les noms des traceurs qui apparaissent sur les figures des résultats sont codés avec deux lettres et quatre chiffres comme suit :

- BP**** traceurs de pression et de taux de vide,
- KP**** traceurs mesurant la différence de pression de part et d'autre de l'enveloppe de cœur,
- KS**** traceurs de déplacements de l'enveloppe de cœur.

Les traceurs de pression complémentaires E*_TBF et E*_VBF sont placés dans l'ajutage de sortie. Ils correspondent aux parties filaire (tube) et volumique du modèle de l'ajutage respectivement.

5. Résultats

Le calcul a été réalisé sur SGI Origin 2000 et a pris 20 jours CPU pour simuler 50 ms du temps physique. Ce coût élevé est dû au fait qu'un pas de stabilité unique de $1.5 \cdot 10^{-7}$ s environ a été utilisé pour intégrer les domaines fluide et structure. Puisque l'algorithme actuel de couplage fluide-structure d'EUROPLEXUS s'appuie sur les maillages fluide et structure compatibles à l'interface (nœuds doubles coïncidants), le maillage fluide très fin dans la zone de la cuve en regard avec

l'ajutage impose un raffinement excessif de la structure qui n'est pas justifié du point de vue physique.

5.1. Evolution temporelle de la pression

Les courbes temporelles de pression et de différence de pression sont présentées sur les figures 6-11. Après l'ouverture de la brèche, la pression dans l'ajutage de sortie atteint très rapidement la pression de saturation qui est de l'ordre de 3.3 MPa à 240 °C [HAA 84]. Sur les courbes de la pression dans différents points de l'ajutage on observe des pics de pression réguliers qui proviennent des réflexions multiples de l'onde entre la brèche et le volume fluide contenu dans la cuve (figures 6, 7). On observe également que la pression du traceur E6_VBF (élément situé au niveau du piquage) n'atteint jamais la pression de saturation ($p_{\min} = 5,2$ MPa). En amont de cet élément, le fluide reste donc en état liquide et ce dans tout le collecteur annulaire où les pressions ne descendent pas en deçà de 9 MPa (figures 8 et 9).

Dans la partie haute du volume de cœur (traceur BP8302 sur la figure 10), la pression est modifiée dès l'arrivée de l'onde par l'ajutage dans le volume d'entrée. La transmission des effets transitoires d'aller-retour d'onde dans l'ajutage *via* l'enveloppe de cœur est immédiate. Ces effets acoustiques, faisant osciller la pression, persistent en haut du cœur alors que dans l'ajutage ils sont rapidement amortis à cause de la présence de la vapeur à la brèche. Les pressions dans le volume de cœur ne descendent pas en deçà de 9,7 MPa. Le fluide reste donc liquide car à l'échelle de la simulation la température n'évolue pratiquement pas.

Les différences de pression de part et d'autre de l'enveloppe de cœur oscillent au cours du temps et atteignent au niveau des traceurs les valeurs de 1 MPa (figure 11).

5.2. Evolution temporelle du titre volumique

Les évolutions temporelles du titre volumique sur les différents traceurs sont présentées sur les figures 12 et 13. Ces courbes confirment les résultats fournis par les évolutions temporelles de la pression dans les différentes parties du dispositif. Au bout de 50 ms, l'eau de l'ajutage de sortie n'est pas encore entièrement en vapeur (le titre volumique est égal à 0,92 à la brèche), alors que dans le collecteur annulaire, le fond de cuve et le cœur, l'eau reste en état 100 % liquide.

5.3. Déformées de l'enveloppe de cœur à différents instants

Les vues de la déformée de l'enveloppe de cœur aux instants successifs entre 0 et 50 ms sont présentées sur les figures 14 et 15 avec un facteur d'amplification de 300. Pendant les premiers instants après l'ouverture de la brèche, une zone de l'enveloppe de cœur en regard de l'ajutage de sortie se gonfle, étant aspirée par une dépressurisation intense et on observe une différence de pression cœur volume

d'entrée importante. Cette déformation se propage ensuite dans la structure verticalement vers le fond de cuve et suivant la circonférence.

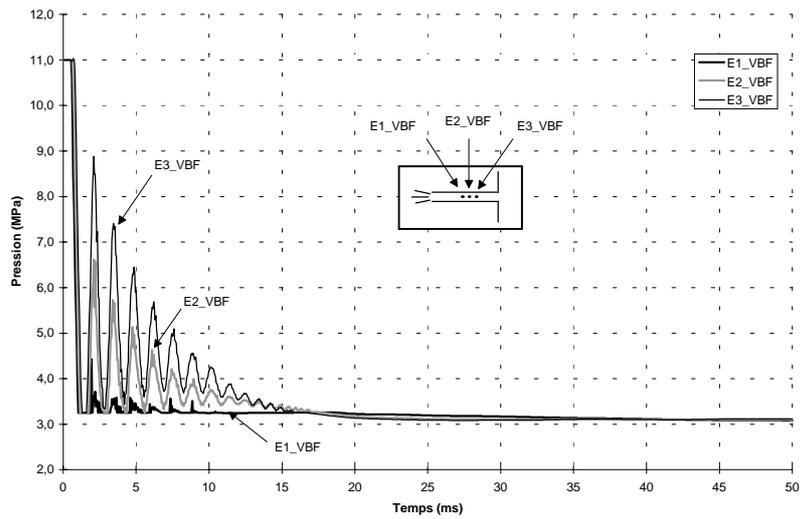


Figure 6. Courbes de pression dans l'ajutage de sortie

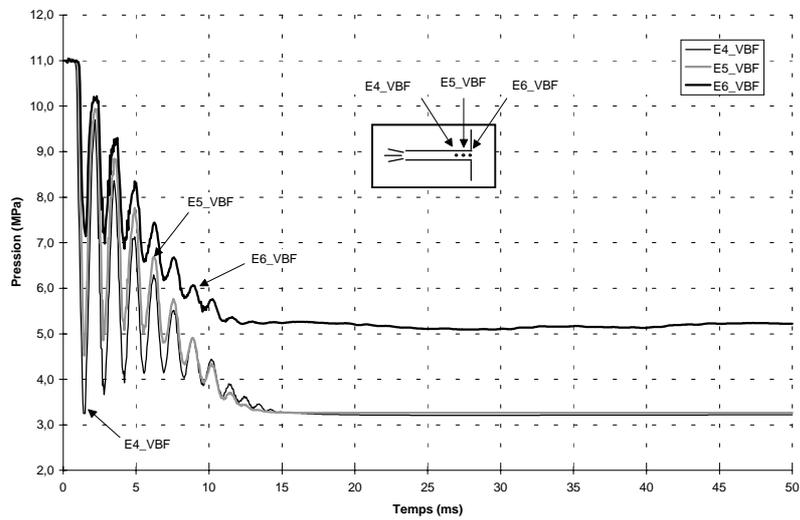


Figure 7. Courbes de pression dans l'ajutage de sortie

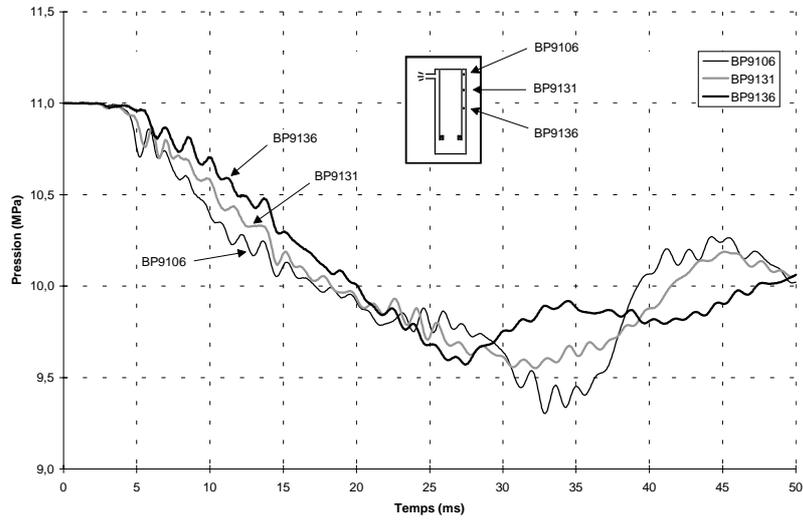


Figure 8. Courbes d'évolution de pression dans le collecteur annulaire

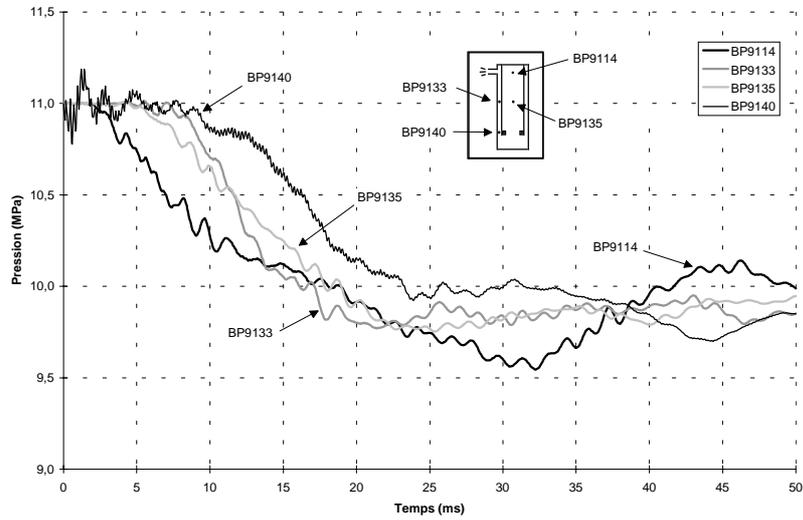


Figure 9. Courbes d'évolution de pression dans le collecteur annulaire

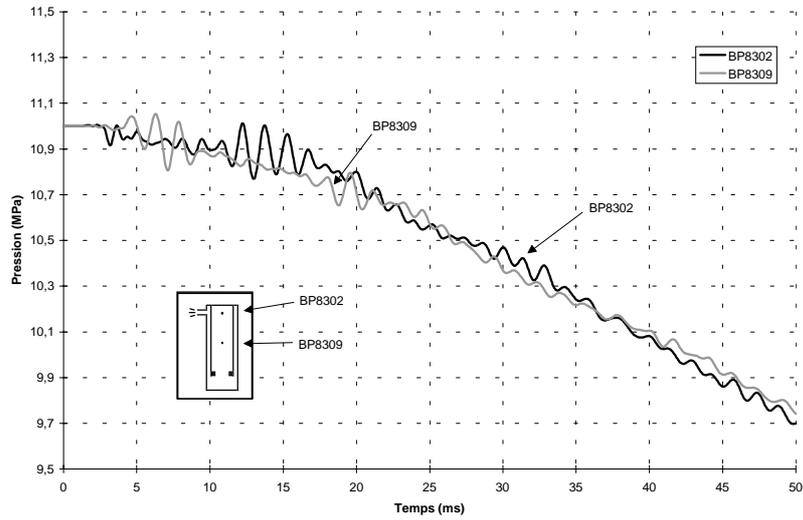


Figure 10. Courbes d'évolution de pression dans le cœur

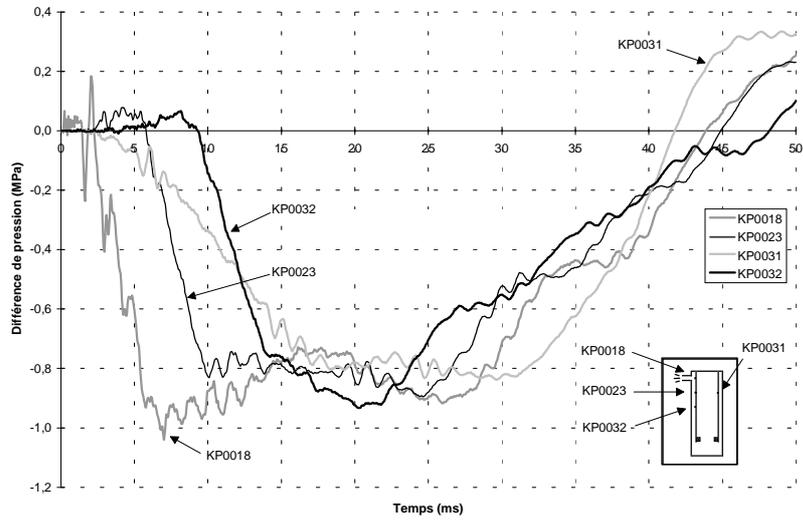


Figure 11. Courbes temporelles de différence de pression de part et d'autre de l'enveloppe de cœur

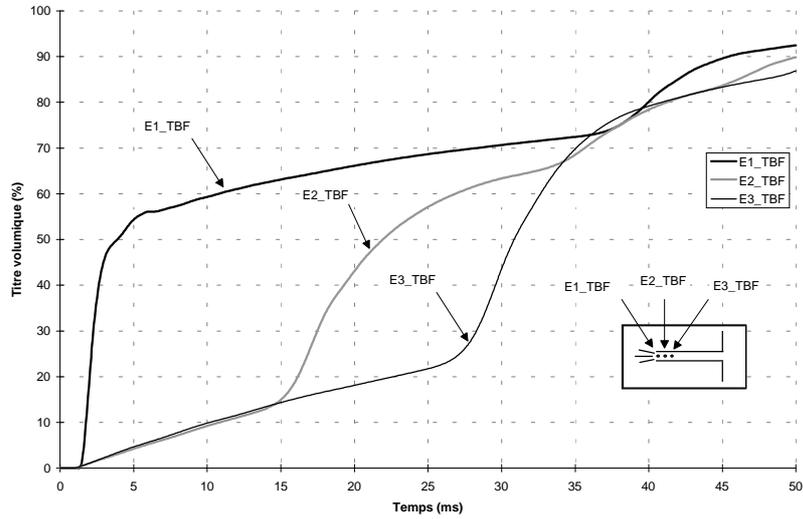


Figure 12. Titre volumique dans l'ajutage (partie 1D)

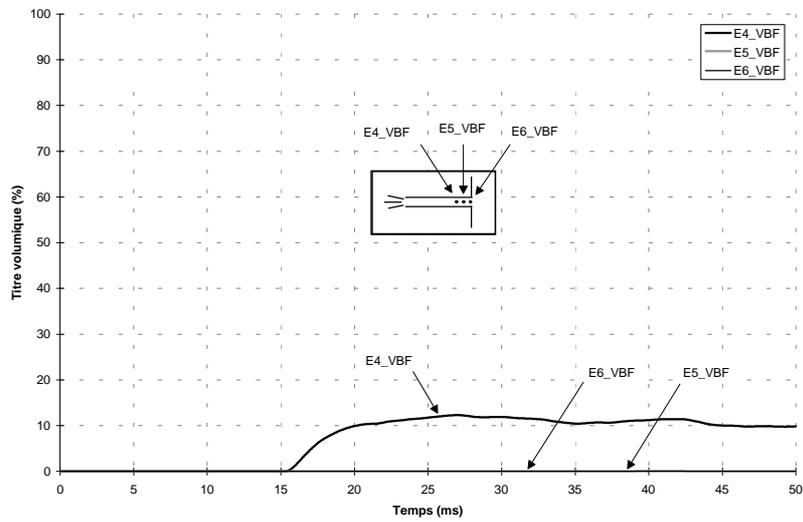


Figure 13. Titre volumique dans l'ajutage (partie 3D)

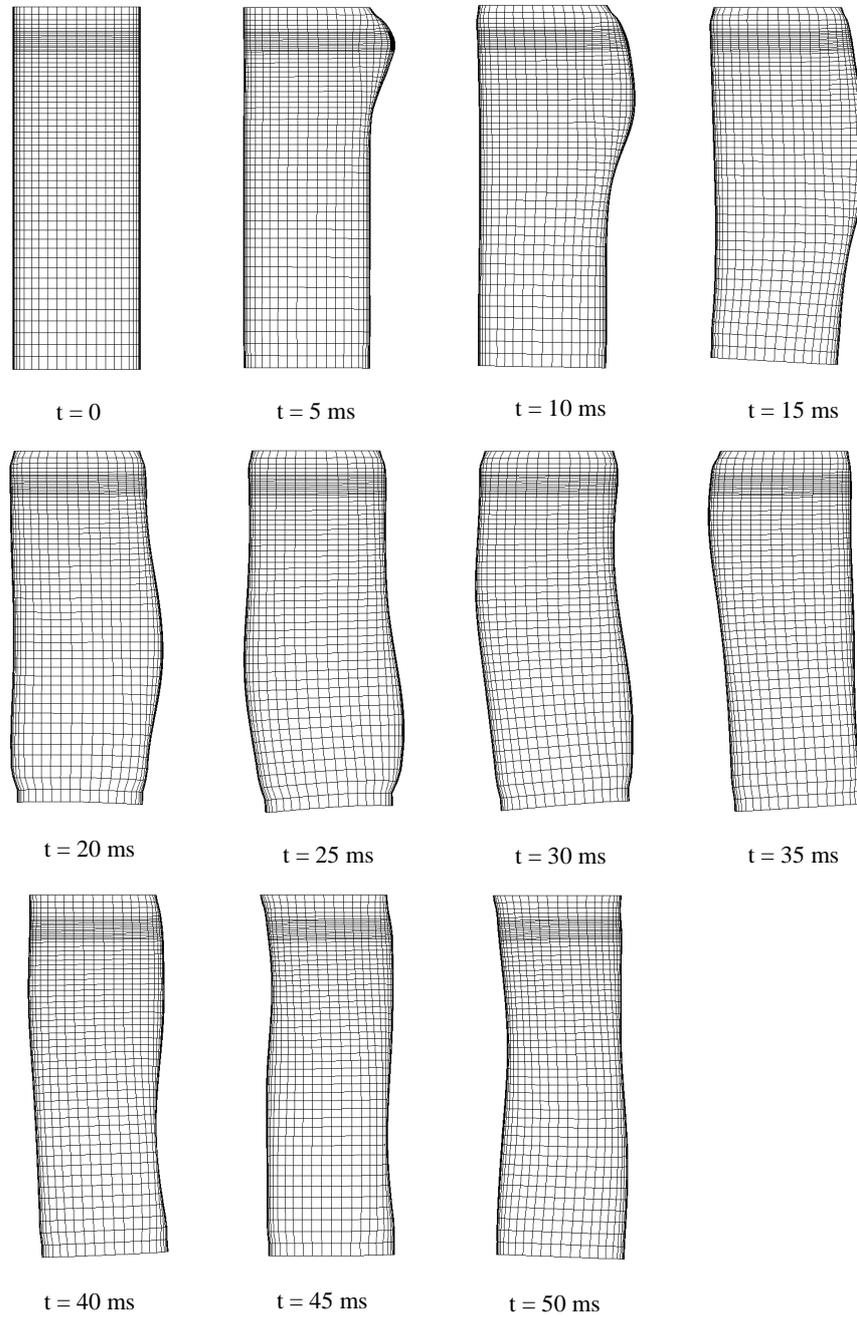


Figure 14. Déformées successives de l'enveloppe de cœur, vue latérale, coefficient d'amplification 300

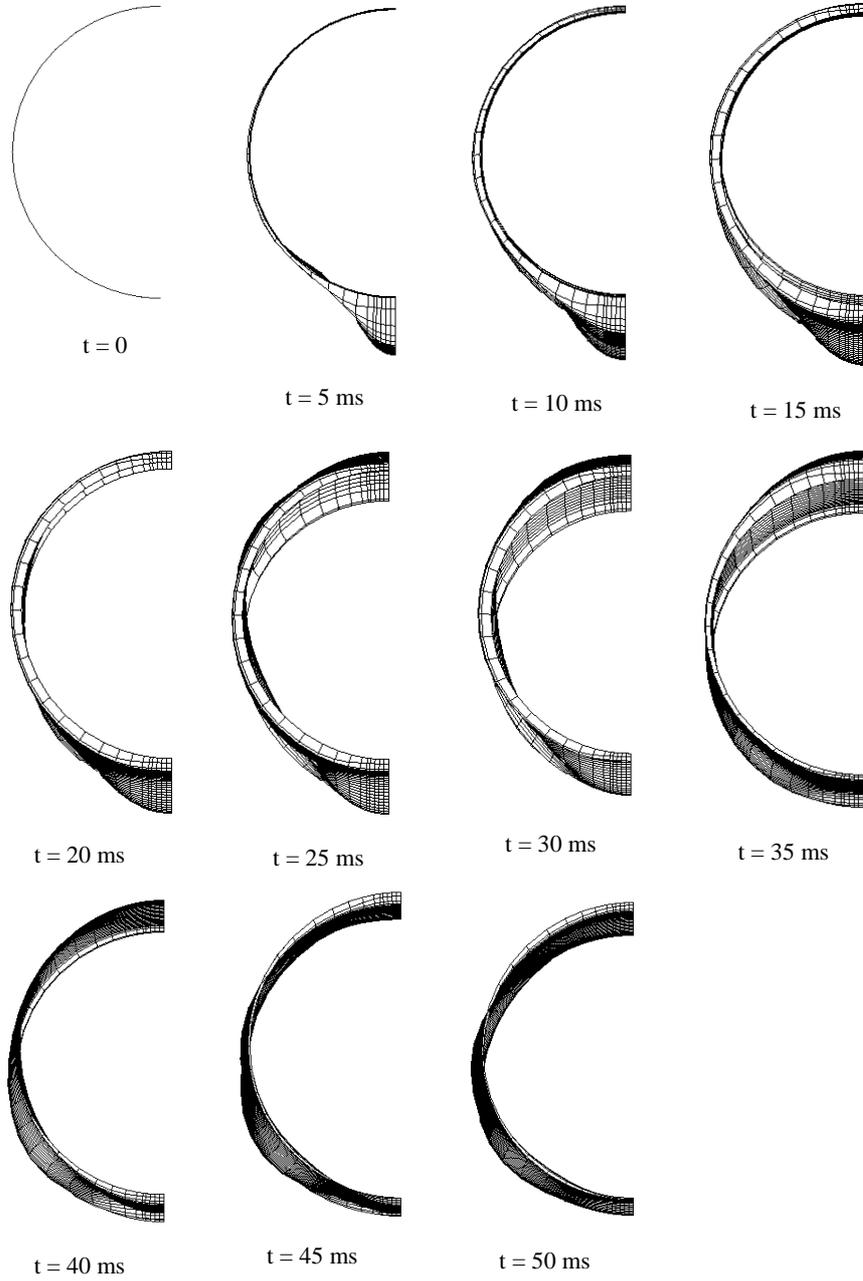


Figure 15. Déformées successives de l'enveloppe de cœur, vue du haut, coefficient d'amplification 300

Dans le collecteur annulaire l'onde se propage plus rapidement dans la direction oblique – circonférentiellement et en descendant – que dans la direction verticale du côté de l'ajutage à cause de la courbure de l'enveloppe de cœur. En effet, l'interaction avec le fluide plus importante dans la direction verticale fait baisser la vitesse de propagation de l'onde qui se dirige verticalement vers le fond de cuve. Le déphasage dans le profil de l'onde provoque un déséquilibre global de l'enveloppe de cœur et active un mouvement selon le mode de balancement visible sur les vues de la figure 14.

Parmi d'autres effets, on constate que la raideur importante de l'anneau massif empêche l'enveloppe de cœur de se déformer radialement dans sa partie basse.

5.4. Comparaison avec les résultats expérimentaux et numériques

Quelques résultats obtenus avec EUROPLEXUS ont été comparés avec les résultats de l'essai V32 et les résultats de la simulation numérique par couplage des codes STEALTH (fluide) et WHAMSE (structure) issus de [MOR 84]. Pour chacune des grandeurs à comparer, on superpose sur un même dessin les courbes numériques et expérimentales.

5.4.1. Evolution temporelle des déplacements de l'enveloppe de cœur

Les évolutions temporelles du déplacement de l'enveloppe de cœur au niveau des différents traceurs sont présentées sur les figures 16-18. Cependant, la comparaison est difficile puisque le contenu exact de la grandeur « déplacement » n'est pas précisé dans le document [MOR 84]. Il semble que cette grandeur (qui est signée) corresponde au déplacement radial. Pour les traceurs KS1002, KS1023 et KS1026 situés près du plan de symétrie du dispositif, les déplacements U_x estimés dans le calcul EUROPLEXUS correspondent relativement bien (au signe près pour KS1026) au déplacement radial des résultats de référence. Nous comparons alors l'évolution de ces grandeurs sur les figures 16-18.

Les allures des évolutions temporelles des courbes numériques et expérimentales sont globalement très similaires. Les valeurs des déplacements sont du même ordre de grandeur mais peuvent néanmoins différer à certains instants d'un facteur deux.

5.4.2. Evolutions temporelles de la pression

On compare les évolutions temporelles de la pression obtenues par EUROPLEXUS à celles issues de l'essai et du calcul STEALTH-WHAMSE pour les traceurs BP9133, BP9136, BP9140, BP8302 et BP8310 (figures 19-23). Les courbes d'évolution du champ de pression obtenues avec EUROPLEXUS sont très proches de celles mesurées dans l'essai aussi bien pour l'allure temporelle que pour l'amplitude.

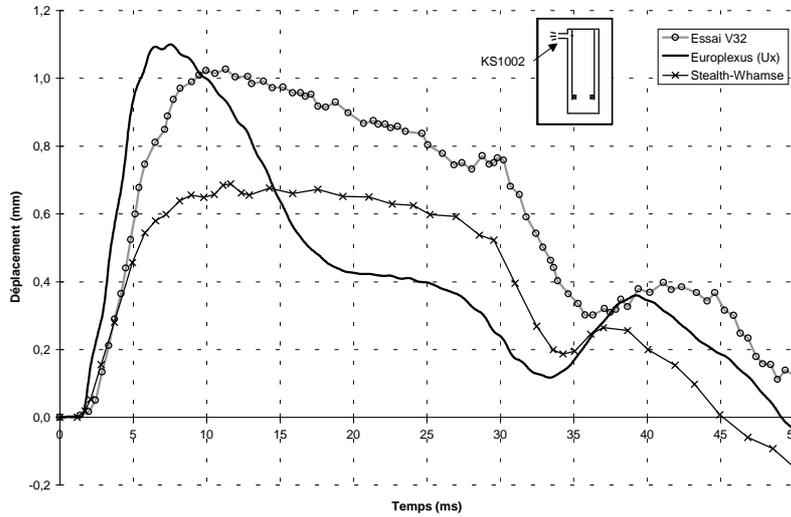


Figure 16. Evolution temporelle de déplacement de l'enveloppe de cœur en face de l'ajutage de sortie (KS1002)

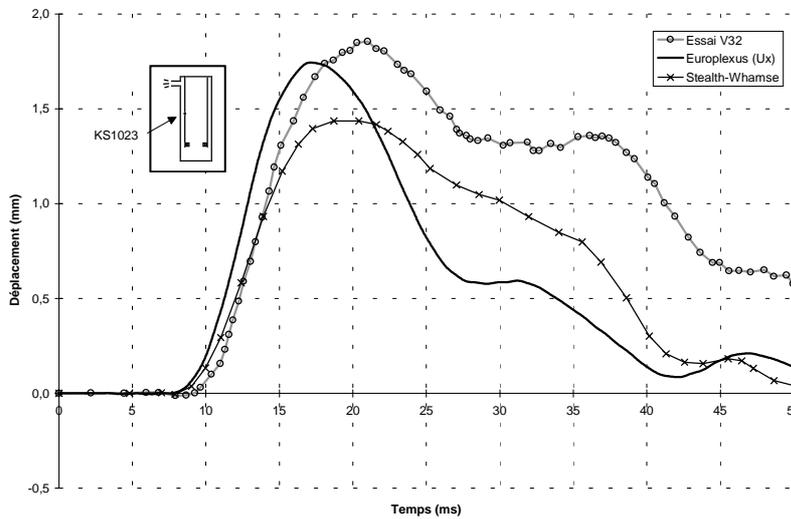


Figure 17. Evolution temporelle de déplacement de l'enveloppe de cœur à la mi hauteur côté ajutage (KS1023)

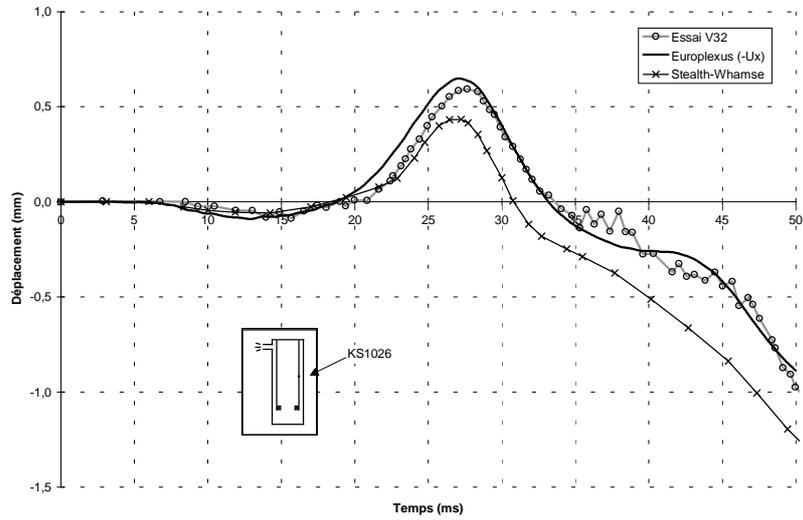


Figure 18. Evolution temporelle de déplacement de l'enveloppe de cœur à la mi hauteur à l'opposé de l'ajutage (KS1026)

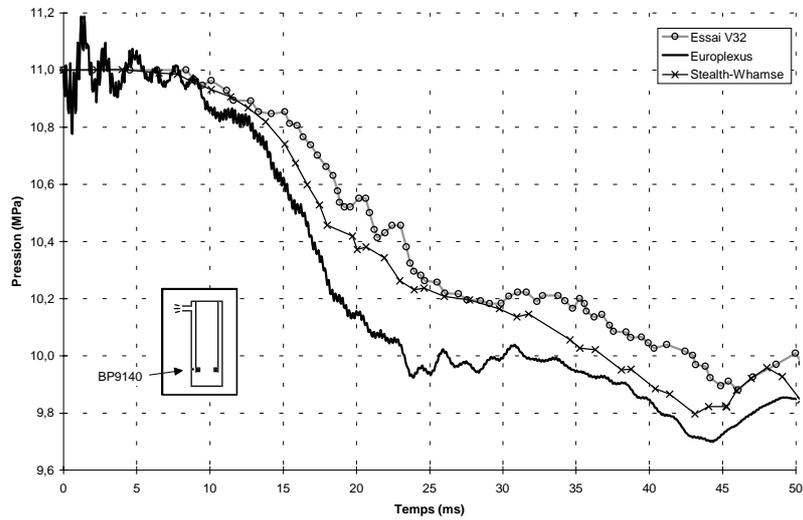


Figure 19. Evolution temporelle de pression dans le collecteur annulaire (BP9140)

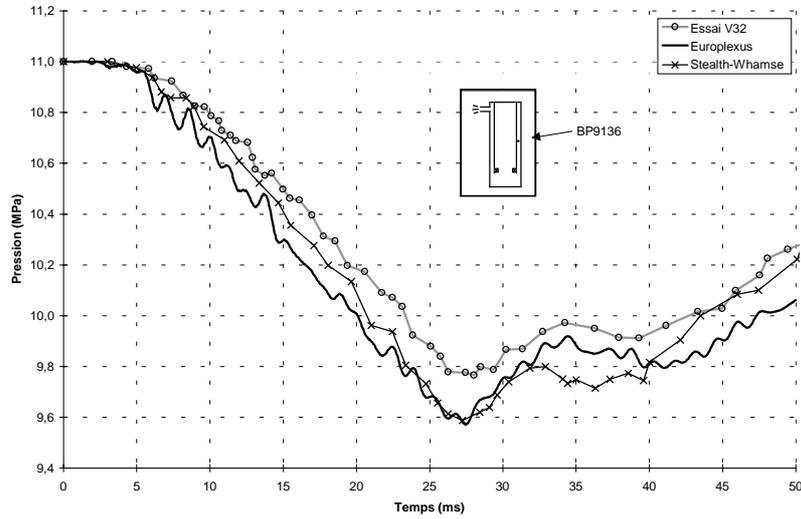


Figure 20. Evolution temporelle de pression dans le collecteur annulaire (BP9136)

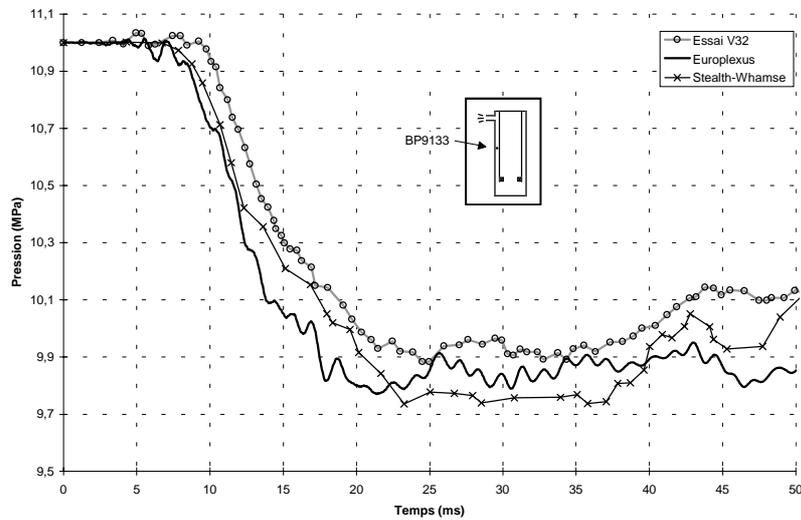


Figure 21. Evolution temporelle de pression dans le collecteur annulaire (BP9133)

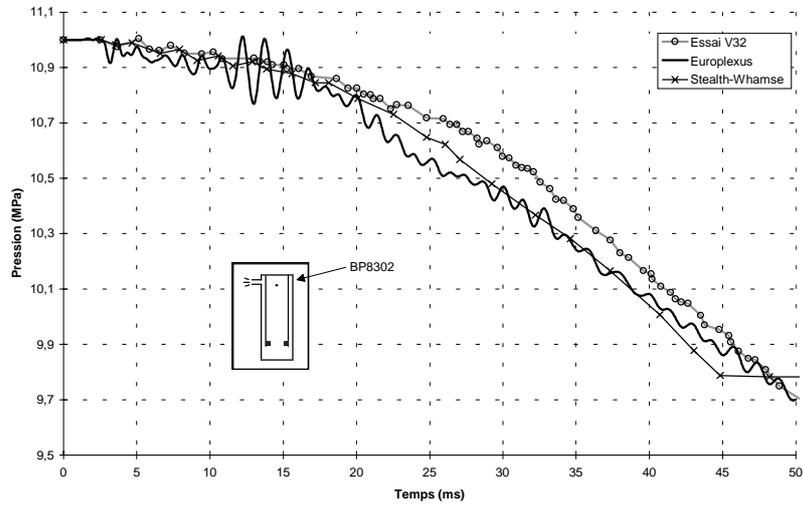


Figure 22. Evolution temporelle de pression en haut du cœur (BP8302)

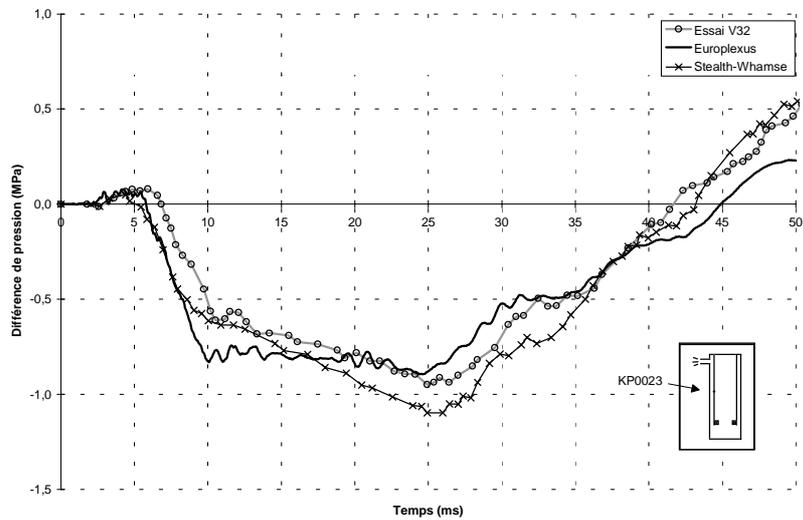


Figure 23. Evolution temporelle de différence de pression de part et d'autre de l'enveloppe de cœur (KP0023)

6. Conclusion

Une simulation numérique 3D avec le code de dynamique rapide EUROPLEXUS de la décompression diphasique HDR est présentée. Le modèle utilisé repose sur un algorithme de couplage fluide-structure fort faisant appel à la méthode des multiplicateurs de Lagrange. La démarche adoptée est générale restant valable dans une large gamme des situations géométriquement et physiquement non linéaires. Toutes les procédures traitant du couplage fluide-structure sont automatisées et ne demandent aucune intervention de la part de l'utilisateur.

Les résultats numériques de la simulation EUROPLEXUS (pressions dans le fluide et déplacements de l'enveloppe de cœur) sont globalement cohérents et comparables aux résultats expérimentaux. Ils permettent de vérifier que le comportement dynamique du modèle HDR tenant compte du couplage fluide-structure ainsi que les principaux phénomènes physiques sont correctement reproduits par le code de calcul.

Cependant, le temps de calcul sur SGI ORIGIN2000 est très élevé : 20 jours CPU pour simuler 50 ms du temps physique. Ce coût élevé est dû au fait qu'un pas de stabilité unique a été utilisé pour intégrer les domaines fluide et structure. Puisque l'algorithme actuel de couplage fluide-structure d'EUROPLEXUS s'appuie sur les maillages fluide et structure compatibles à l'interface (nœuds doubles coïncidants), le maillage fluide très fin dans la zone de la cuve en regard avec l'ajutage impose un raffinement excessif de la structure qui n'est pas justifié du point de vue physique.

Pour améliorer les performances numériques du code dans le traitement des problèmes couplés fluide-structure, les développements actuels dans EUROPLEXUS portent sur :

- l'introduction dans l'algorithme de couplage fluide-structure de la possibilité de traiter des interfaces non compatibles ;
- l'extension de la méthode de décomposition de domaine (multiéchelle en temps) au domaine fluide en formulations eulerienne et ALE, avec la possibilité d'utiliser des pas d'intégration différents sur les domaines fluide et structure.

Le cumul de ces deux possibilités permettront de réduire de façon drastique le coût CPU des calculs couplés fluide-structure ainsi que d'étudier des systèmes mécaniques 3D de taille importante.

7. Bibliographie

- [AUY 83] AU-YANG M.K., BILLER J.R., MIGNOGNA G.M., RUNDLE F.M., « Analysis of the HDR blowdown experiment using a weakly coupled fluid-structure dynamic method », *Nuclear Engineering and Design*, n° 76, 1983, p. 95-109.

- [BUN 89] BUNG H., CASADEI F., HALLEUX J.P., LEPAREUX M., « PLEXIS-3C : A computer code for fast dynamic problems for structures and fluids », *Proc. SMIRT 10*, Vol.B, 1989, Los Angeles, USA, p. 85-90.
- [CAS 95] CASADEI F., HALLEUX J.P., « An Algorithm for Permanent Fluid-Structure Interaction in Explicit Transient Dynamics », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 128, 1995, p. 231-289.
- [CAS 01] CASADEI F., HALLEUX J.P., SALA A., CHILLÈ F., « Transient Fluid-Structure Interaction Algorithms for Large Industrial Applications », *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 190/24-25, March 2001, p. 3081-3110.
- [CHA 79] CHAVANT C., HOFFMANN A., LEPAREUX M., VERPEAUX P., DUBOIS J., « PLEXUS : A general computer code for explicit lagrangian computation », *Proc. SMIRT 5*, Vol. B 2/8, 1979, Berlin, Germany.
- [HAA 84] HAAR L., GALLAGHER J.S., KELL G.S., *NBS/NRC steam tables*, National Standard Reference Data System, 1984.
- [HOF 84] HOFFMANN A., LEPAREUX M., SCHWAB B., BUNG H., « PLEXUS : A general computer program for fast dynamic analysis », *Proc. Conf. On Structural Analysis and Design on Nuclear Power Plants*, 1984, Porto Alegre, Brazil.
- [LEP 00] LEPAREUX M., EUROPLEXUS - Traitement des piquages en 3D, Rapport CEA/DYN/RT/00-033, 2000.
- [MOR 84] MORTENSEN G.A., SANTEE G.E., CHANG F.H., BROCKETT G.F., BELYTSCHKO T., GROSS M., « Comparison of the calculation of HDR RPV-1 Blowdown Loads for Test V32 with the experimental data », Report EPRI NP-3677, August 1984.
- [POT 00] POTAPOV S., ROBBE M.F., TÉPHANY F., « Hydrodynamic consequences of a LOCA in a 4-loop PWR », *Proc. ECCOMAS 2000*, Barcelona, Spain.
- [SCH 84] SCHALL M., HDR Sicherheitsprogramm. Untersuchungen von Reaktor-kühlmittelleitung. Techn. Fachbericht PHDR n° 48-84, Dezember 1984.
- [WOL 81] WOLF L., Design Report for the HDR-RPV-I Blowdown Experiments V31.2, V32, V33, and V34 with Specifications for the Pre-test Computations, Project HDR, West Germany : Federal Ministry for Research and Technology, PHDR Report n° 3/243/81, July 1981.
- [WOL 82] WOLF L., « Experimental results of coupled fluid-structure interactions during blowdown of the HDR-vessel and comparisons with pre- and post-test predictions », *Nuclear Engineering and Design*, 70, 1982, p. 269-308.