

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	5
1. PRESENTATION DE LA METHODE DE RESOLUTION.....	7
1.1. Simulation numérique par éléments finis	7
1.2. Application de la méthode numérique à l'analyse de l'accident du Concorde.....	8
1.3. Calculs paramétriques.....	13
2. RESULTATS	15
2.1. Projectile de vitesse initiale 120 m/s – Loi 36	15
2.2. Projectile de vitesse initiale 360 m/s – Loi 27	22
2.3. Projectile de vitesse initiale 120 m/s – cinématique modifiée – Loi 36	24
2.4. Projectile de vitesse initiale 120 m/s – Loi 27 sans critère de rupture.....	24
3. CONCLUSIONS.....	25
REMERCIEMENTS	27
REFERENCES	27

JUILLET 2001

SMP

INTRODUCTION

Des éléments de l'enquête [1] concernant l'accident du Concorde survenu en Juillet 2000 mentionnent qu'un morceau de panneau de voilure intrados de 1.2 mm d'épaisseur (sous l'aile) a été retrouvé sur la piste, arraché de l'intérieur vers l'extérieur, mais sans présenter aucun signe de perforation. Cet élément ne présente pas de trace d'incendie, ce qui laisse supposer que son arrachement précéda le démarrage du feu. L'arrachement de cet élément de dimension importante ayant probablement été à l'origine de la fuite importante de carburant, cause de la catastrophe, la question se pose naturellement de savoir comment cet événement a pu se produire.

Plus récemment, et sur les lieux du crash cette fois, a été retrouvé un autre morceau d'un panneau de voilure intrados perforé, dont la position est justement périphérique du panneau arraché, et d'épaisseur 1.6 mm. Il semblerait bien que la perforation (40 mm x 20 mm, bords aigus, tranchés, et une lèvre recourbée à 45° vers l'intérieur) provienne de l'impact d'un projectile. L'analyse semble établir que ce n'est pas lors du crash, mais bien au décollage, que la perforation eût lieu. Il semble raisonnable de penser alors que, lors de l'éclatement du pneu, des éclats de natures diverses aient pu être projetés et aient percé le réservoir (d'autres incidents de ce type ont déjà été relevés au cours de l'exploitation de l'appareil) [2].

Or, la perforation d'un réservoir entièrement rempli de carburant (au décollage, ce qui est un paramètre aggravant), par un projectile suffisamment rapide, peut générer ce que l'on appelle un coup de bélier hydrodynamique dans un réservoir. Le mécanisme du coup de bélier hydrodynamique est simple : un projectile, précipité dans un fluide, est brutalement ralenti (son ralentissement est fonction de son coefficient de traînée et donc de sa géométrie). Lors de ce ralentissement, l'énergie cinétique du projectile est transférée au fluide et une cavité d'un certain volume se crée autour de l'objet (le fluide est propulsé à la vitesse du projectile). En cas de confinement (pas d'espace libre dans le réservoir), le fluide étant incompressible, un chargement mécanique « proportionnel » au volume de cette cavité est donc transmis à la structure. La sévérité du coup de bélier peut donc être reliée au volume de la cavité, lui-même dépendant de mécanismes plus complexes : une onde de compression (1) se réfléchit en onde de traction si elle rencontre une surface libre, (2) se réfléchit en onde de compression si elle rencontre une surface rigide. Une onde de compression et une onde de traction se soustraient, deux ondes de compression s'ajoutent. Un jeu complexe d'ondes concurrentes incidentes et réfléchies se met donc en place, qui vont déterminer le volume de la cavité (la surface de la cavité constitue elle-même une surface libre), et donc le chargement mécanique. Lorsque la cavité finit par s'écrouler, un choc en retour peut également être généré.

De tels coups de bélier peuvent provoquer des dégâts particulièrement importants voire catastrophiques à l'intrados comme à l'extrados des caissons réservoirs (phénomène bien connu pour les avions militaires subissant des tirs). On constate souvent dans ces cas une pétalisation du panneau métallique autour du point d'impact intrados ou d'un point d'amorçage extrados (perforation de rivet, etc).

Dans les circonstances actuelles, aucun scénario ne peut être écarté a priori. Une explication possible étant que l'arrachement du panneau réservoir ait eu pour origine un tel coup de bélier hydrodynamique,

JUILLET 2001

SMP

l'ONERA a proposé d'étudier la pertinence de ce scénario. Cette pertinence peut être remise en question par le fait que, pour initier un tel phénomène, le projectile doit non seulement posséder une énergie initiale suffisante pour perforer la paroi de la voilure, mais surtout une énergie résiduelle après perforation suffisante pour générer le coup de bélier en question. C'est la raison pour laquelle ce type de phénomène est généralement observé pour de très grandes énergies (ce qui pour les petits projectiles signifie une très grande vitesse d'impact, de l'ordre de 1000 m/s pour 0.05 kg, ce qui donne des énergies voisines de 25 kJ). Lors de l'éclatement du pneu, les estimations ne laissent pas présager de risques d'éjectats à des vitesses supérieures à 120 m/s. Pour atteindre les énergies mentionnées précédemment, il faudrait donc un projectile de densité particulièrement importante, dont on ignorerait totalement l'origine.

D'un autre côté, la structure n'est pas rivetée mais usinée dans la masse, ce qui limite a priori le nombre des amorces de déchirure traditionnellement possible (à partir des perforations dues à la mise en place des rivets, par exemple). Il faut néanmoins considérer cette « absence » de points d'amorçage dans tous les scénarii, et en tirer la conclusion que les seules concentrations de contraintes locales liées à la présence des différences d'épaisseur, des nervures et des lissérons, auraient suffi à déclencher une rupture instable dans le matériau. En effet, le choix de l'AU2GN pour le Concorde fut principalement dicté par les caractéristiques intéressantes de cette nuance d'aluminium vis-à-vis du problème de fluage à chaud (on craignait que le supersonique ne s'échauffe en vol, ce qui a posteriori ne s'est pas avéré être le cas), et pas outre mesure vis-à-vis de sa résistance à la fatigue. Or il semblerait que ce matériau s'avérait particulièrement sensible à l'effet d'entaille (en terme de rupture). D'un autre côté, la perforation pourrait tenir lieu d'amorce potentielle, mais les investigations démontrent que, même si les phénomènes de ruine se sont développés dans des zones voisines, l'arrachement n'est pas parti de la perforation.

A la différence des investigations menées dans le cadre de l'enquête judiciaire, ou des travaux menés par EADS pour la re-certification de l'appareil, l'objectif des travaux présentés vise à la compréhension des phénomènes qui ont été à l'origine de l'accident et plus particulièrement de l'arrachement du panneau retrouvé sur la piste. L'ONERA ayant développé une méthode d'analyse numérique du phénomène du coup de bélier hydrodynamique dans les réservoirs, il a été proposé au BEA d'appliquer cette méthode pour tenter de valider ou d'infirmer ce scénario.

Plus précisément, si coup de bélier il y eût, l'ONERA propose de focaliser son analyse sur le fait que l'arrachement ne soit pas parti de la zone d'amorçage que constituait la perforation (perforation et fragment arraché ne sont distants que de quelques centimètres). Le scénario de coup de bélier pourrait en effet être infirmé si les simulations E.F. confortent l'hypothèse que l'arrachement aurait du préférentiellement démarrer de cette perforation (pétalisation autour de la perforation). Pour démontrer cela, il n'est pas forcément nécessaire de modéliser l'ensemble du caisson réservoir. Dans cette optique, des maillages fins et réguliers peuvent être utilisés, ce qui améliore le niveau de confiance attribué aux calculs. Le cas le plus critique est traité, dans lequel le fluide est totalement confiné.

Les caractéristiques en termes de trajectoire, de vitesse et de densité du projectile sont les suivantes : trajectoire à 45° par rapport à la surface au point d'impact, et dirigée vers le point de démarrage supposé de l'arrachement (cf rapport d'enquête), vitesse initiale de 120 m/s. La géométrie et le matériau du projectile sont inconnus. Il est admis que la géométrie ne joue qu'indirectement sur la sévérité du coup de bélier. Par contre, l'énergie initiale importe, puisqu'elle va s'opposer au ralentissement (traînée du projectile) et va

JUILLET 2001

SMP

permettre de prolonger la course et augmenter le volume de la cavité autour du projectile. L'évolution du coefficient de traînée sera du type de celle d'un barreau cylindrique de quelques 50 mm de long pour 10 mm de diamètre, doté d'un angle d'inclinaison initial dans le fluide de 30° par rapport à la paroi impactée, et se retournant violemment dès les premiers instants de la traversée. Il a en effet été constaté que ce type de configuration pouvait générer un coup de bélier hydrodynamique en paroi avant de structures métalliques [2], et l'ONERA dispose des éléments nécessaires à une telle modélisation.

L'ONERA ne modélisera pas le processus de perforation de la paroi intrados, qui sera supposée n'avoir consommé qu'une faible partie de l'énergie initiale du projectile. La simulation démarre donc juste après que le projectile ait pénétré le fluide.

1. PRESENTATION DE LA METHODE DE RESOLUTION

1.1. Simulation numérique par éléments finis

La méthode de résolution repose sur l'utilisation d'un code de calcul explicite par éléments finis (RADIOSS en l'occurrence). Ce type de code éléments finis, généralement appelé code « Crash » car particulièrement adapté à la résolution des problèmes à « petites déformations » et grands déplacements, repose sur la résolution des équations de propagation des ondes mécaniques dans les milieux continus. Le schéma d'intégration explicite permet de résoudre des problèmes présentant des nombres particulièrement importants de degrés de liberté.

Avant que de décrire plus précisément la méthodologie, quelques rappels généraux concernant les différents méthodes numériques existant doivent être faits : bien que les ondes mécaniques se propagent tout autant dans les fluides que dans les solides, une autre théorie est généralement utilisée pour traiter la première catégorie de milieu, et repose sur la résolution des équations de la mécanique des fluides. En fait, historiquement, pour chacun des problèmes fluides et structures, des techniques différentes de discrétisation de l'espace et du temps et de modélisation ont été développées. Pour les solides, on évoquera la méthode Lagrangienne (le maillage est déformable et suit exactement les déformations de la matière) et les lois de comportement. Pour les fluides, on évoquera la méthode eulérienne (le maillage de l'espace est fixe, et on étudie les équations de conservation des flux de matière au travers de la grille spatiale) et les équations d'état. Il existe une méthode plus générale, dénommée ALE pour « Arbitrary Lagrange Euler » ou « Approximated Lagrange Euler » selon les sources, qui a été développée, en théorie, spécialement pour traiter des problèmes couplés fluide/structures. La partie structure est traitée en Lagrangien, et la partie fluide est partiellement traitée en Lagrangien (pour suivre les déformées des milieux solides aux frontières du milieu fluide, et partiellement en eulérien (pour éviter d'avoir de trop grandes déformations du maillage, ce qui nuirait à la validité et à la stabilité du calcul). Pour fonctionner correctement, il est absolument nécessaire que les déformées de la grille ALE restent faibles, sous peine de voir apparaître des instabilités numériques mettant terme au calcul. L'inconvénient de cette méthode ALE, qui permet, toujours en théorie, d'appréhender le comportement de milieux fluides biphasiques et le couplage avec les structures, est d'être

JUILLET 2001

SMP

beaucoup plus coûteuse en terme de temps de calcul que la méthode Lagrangienne (à déformation égale du maillage).

L'objectif de notre modélisation consiste à représenter l'intrusion dans le fluide d'un corps solide, dont le coefficient de traînée évolue au cours du temps (en générant un jeu d'ondes de compression se propageant dans le fluide et chargeant la structure jusqu'à la ruine). La méthode proposée et développée par l'ONERA repose sur le constat que la seule méthode permettant de traiter « rapidement » et en 3D le problème du coup de bélier dans une structure réelle est la méthode Lagrangienne, pour peu que l'on parvienne à contrôler la déformation du maillage. Pour cela, il est décidé d'utiliser un projectile de forme conique : son double avantage est d'avoir une trajectoire stable, d'une part, et de permettre un écoulement faiblement déformé du fluide à sa frontière, d'autre part. Les dimensions et l'angle d'ouverture du cône déterminent complètement son coefficient de traînée hydrodynamique. En faisant varier continuellement ces grandeurs au cours du calcul, il est donc possible de piloter un projectile de coefficient de traînée variable. Cette méthode a été développée et validée en 2D dans un premier temps [3], avant que d'être transposée en 3D.

1.2. Application de la méthode numérique à l'analyse de l'accident du Concorde

En résumant, un domaine borné de fluide est maillé autour du projectile conique. La finesse adaptée du maillage dans cette zone permet de gérer correctement les contacts et les déformations. Des interfaces virtuelles permettent d'imposer et de préserver un écoulement radial du fluide autour du projectile. Cette partie du modèle contient 57232 éléments finis de volume pour le fluide, et 48 éléments de coques pour le projectile (cf figure 1).

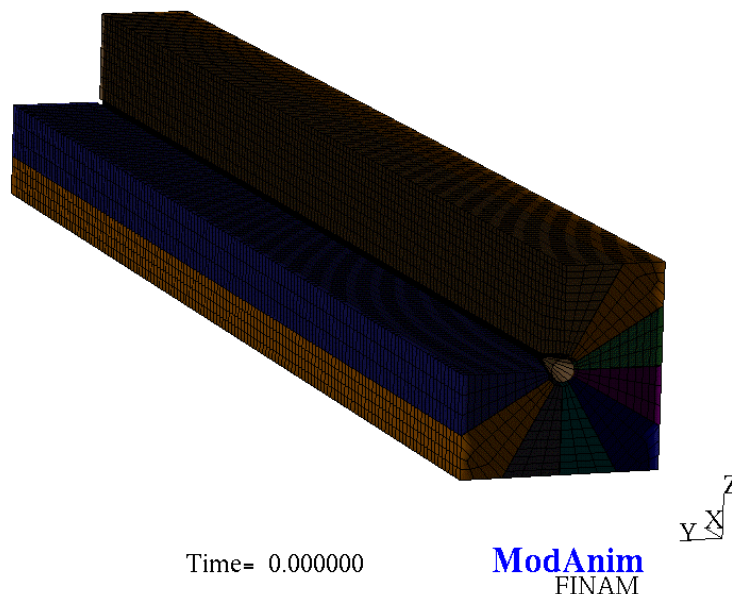


Figure n°1 – Ecorché du maillage du projectile et du fluide environnant -

JUILLET 2001

SMP

Par ailleurs, un modèle éléments finis de 4 tronçons du réservoir et du reste du fluide est développé par blocs de façon la plus régulière possible. Les différents blocs sont associés au travers d'interfaces liants, permettant de joindre cinématiquement des maillages disjoints.

Les nervures, enveloppes et lisses extradados sont fusionnés avec le fluide (donc la finesse de maillage est la même pour ces différents éléments). Pour cette partie du modèle, la finesse de maillage est assez grossière, mais régulière. Elle contient néanmoins près de 71000 éléments de volume pour le fluide et non loin de 80000 éléments de coques pour la structure.

La peau et les lisses intrados sont maillés beaucoup plus finement pour traiter le problème de la rupture. Cette seule partie du modèle contient 20500 éléments de coques, à trois points d'intégration dans l'épaisseur (cf figure 2). A la différence du reste de la structure, ils sont dissociés du fluide, un interface de contact étant introduit pour gérer l'interaction fluide/structure. Le recours à ces interfaces de contact permet de gérer l'écoulement du fluide le long de la peau intrados, et de modifier la finesse de maillage sans avoir à redévelopper le reste du modèle. De tels interfaces de contacts auraient pu être généralisés, mais ils auraient fortement pénalisé les temps de calcul, ce pourquoi la fusion des maillages a été utilisée dans les zones éloignées de la zone de rupture.

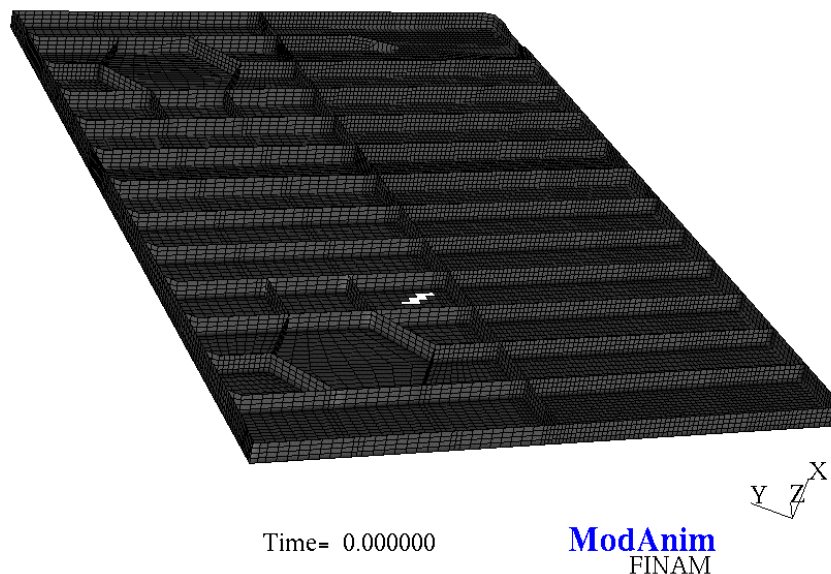
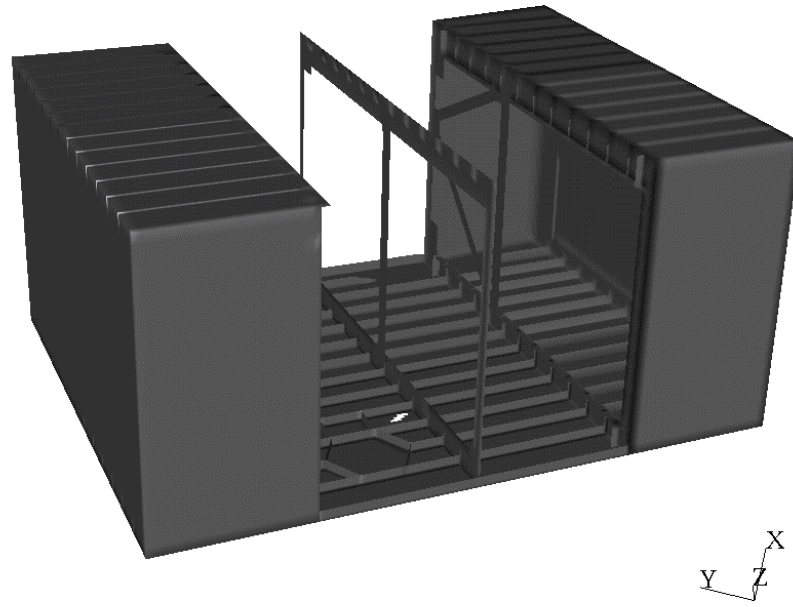


Figure n° 2 – Maillage de la peau et des lisses intrados, avec perforation initiale

Le « cartouche » contenant le projectile est ensuite assemblé dans le modèle de réservoir, les frontières des deux sous-domaines étant jointes au travers d'un interface liant. Au total, le modèle contient 200000 nœuds, 130000 éléments de volume et 102000 de coques (cf figures 3 et 4). Nous dénommerons « Tronçon 2 », le quart du modèle dans lequel la perforation est située. Nous dénommerons « Tronçon 3 » le quart du modèle dans lequel le panneau arraché se situe. La trajectoire du projectile est orientée à 45°, du Tronçon 2 vers le Tronçon 3.

JUILLET 2001

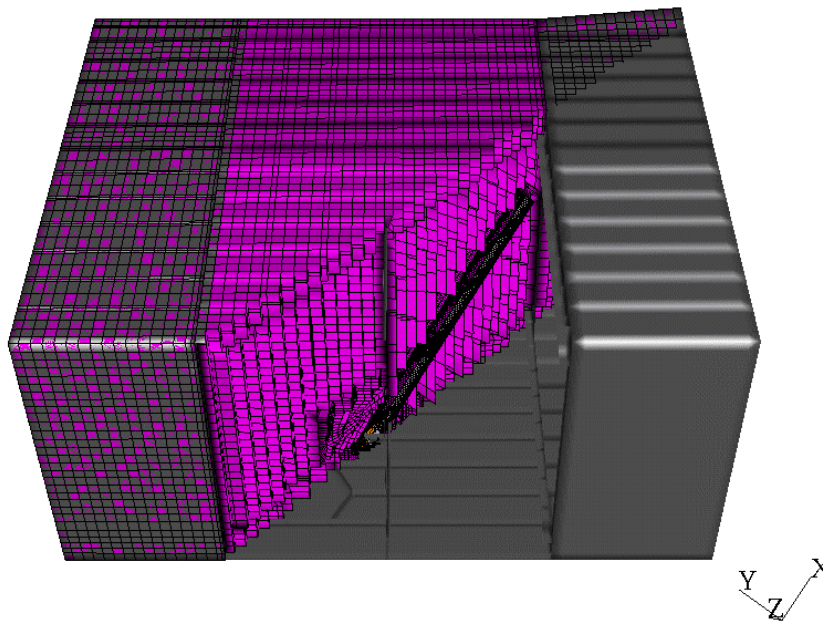
SMP



Time= 0.000000

ModAnim
FINAM

Figure n°3 – Maillage des 4 tronçons environnant la zone du panneau arraché (de 1 à 4 de gauche à droite)



Time= 0.950002

ModAnim
FINAM

Figure n°4 – Ecorché du maillage de la structure et du fluide

JUILLET 2001

SMP

Le fluide est modélisé par une loi de comportement de type hydrodynamique visqueux :

$$S_{ij} = 2\rho v \dot{e}_{ij}$$

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu)E$$

$$P \geq p_{\min}$$

où v est la viscosité cinématique, ρ la densité, et P la pression. Les valeurs des paramètres de la loi de comportement et de l'équation d'état étant prises égales à :

$$\rho = 1.e - 3$$

$$v = 1.e - 6$$

$$C_0 = 0.$$

$$C_1 = 2723.$$

$$C_2 = 7727.$$

$$C_3 = 14660.$$

$$C_4 = C_5 = 0.$$

$$p_{\min} = -0.1$$

La pression est exprimée en Mpa, le temps en ms, la masse en g et la distance en mm.

La loi de comportement de l'aluminium est prise élastique pour l'ensemble des parties de la structure exceptées la peau et les lisses extradosses. Ses caractéristiques élémentaires sont :

$$\rho = 2,8.10^{-3} \text{ g/mm}^3$$

$$E = 74000 \text{ MPa}$$

$$v = 0.3$$

La loi d'ouverture du cône au cours du temps est imposée. Elle décrit l'évolution du coefficient de traînée d'un projectile connu (barreau cylindrique de 10 mm de diamètre et 50 mm de longueur) et correspond à son retournement de 0° à 90° , en 0.4 ms. Entre 0 et 0.3 ms, l'ouverture du projectile est modérée, puis elle se précipite en 0.1 ms. A 0.4 ms, le coefficient de traînée est maximum. A ce moment, la vitesse d'ouverture du projectile s'annule puis devient négative : le coefficient de traînée diminue de nouveau progressivement (études empiriques américaines).

La masse du projectile est de 45 grammes.

L'évolution au cours du temps du diamètre du projectile et de son angle d'ouverture sont présentés sur les figures 5 et 6. Son diamètre maximal atteint 15 mm, et son angle d'ouverture maximal 30° .

JUILLET 2001

SMP

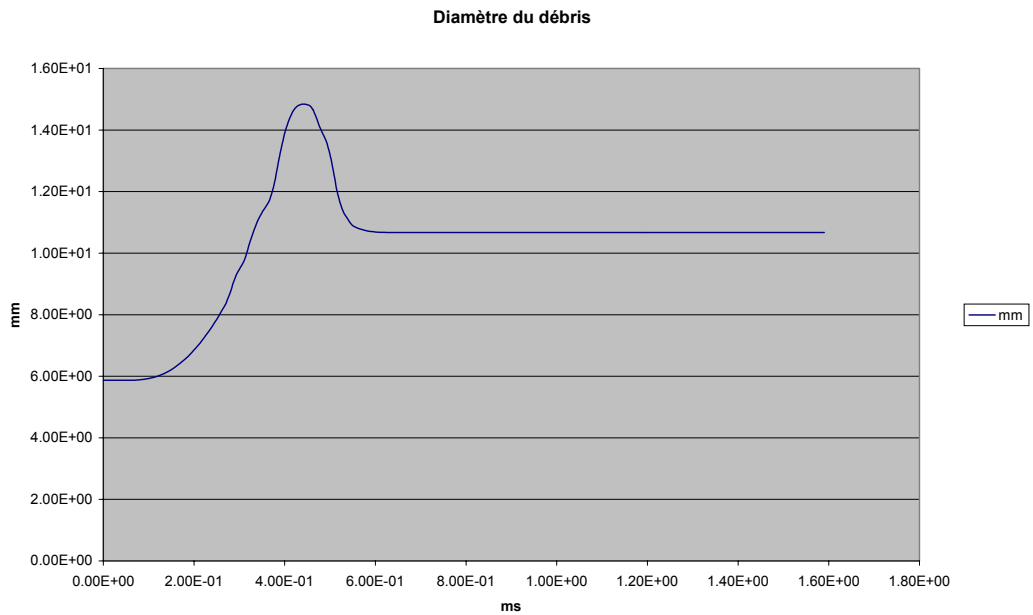


Figure n°5 – Evolution du diamètre du projectile conique en fonction du temps

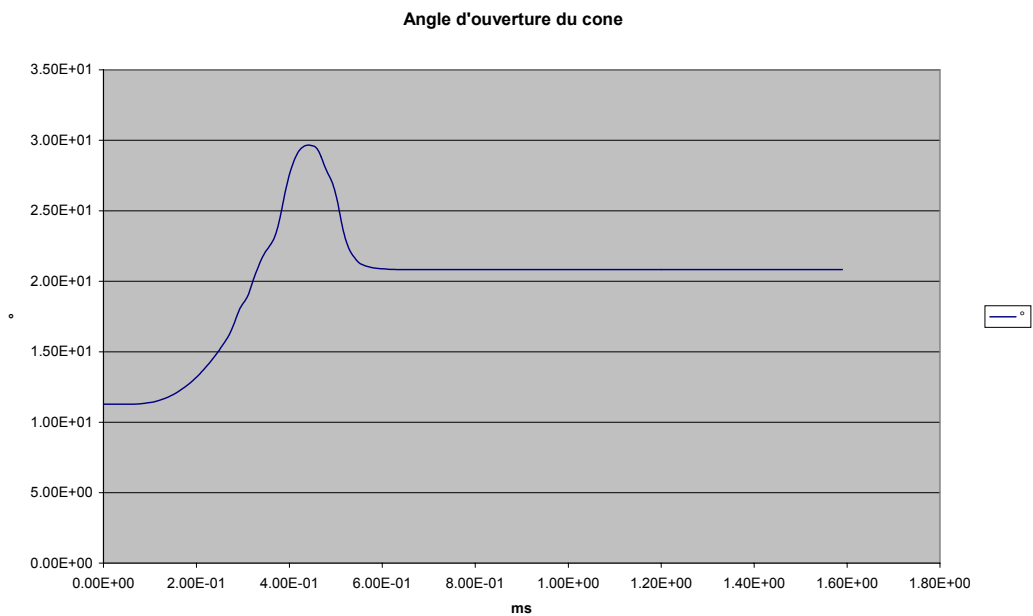


Figure n°6 – Angle d'ouverture du projectile au cours du temps

JUILLET 2001

SMP

1.3. Calculs paramétriques

Les paramètres du modèles concernent la loi de vitesse du projectile, et la loi de comportement de l'aluminium, pour la description du comportement de la peau et des lisses intrados.

Une première loi de comportement élasto-plastique endommageable (loi 27) est tirée du modèle Airbus France :

$$\rho = 2,8.10^{-3}$$

$$E = 74000.MPa$$

$$\nu = 0,3$$

$$\sigma_y = 296MPa$$

$$B = 350.MPa$$

$$n = 0.2$$

$$\sigma_{max} = 430.$$

$$\varepsilon_{t1} = \varepsilon_{t2} = 0,05$$

$$\varepsilon_{m1} = \varepsilon_{m2} = 0,055$$

$$d_{max1} = d_{max2} = 0,95$$

$$\varepsilon_{f1} = 0.06$$

$$\varepsilon_{f2} = 0.065$$

Dans le dernier calcul, de nouvelles valeurs, communiquées par Airbus France sont prises : $\sigma_y=397$ Mpa ; $B=460.$; $n=0.45.$

Cette loi a l'avantage de proposer un critère de rupture en déformation maximale en traction. Cette caractéristique permet, lors du déroulement du calcul, de détecter automatiquement le développement de la rupture, et de la visualiser.

La loi de comportement tabulée (loi 36), également tirée du modèle Airbus France, permet de décrire le comportement non linéaire du matériau selon une courbe décrite préalablement. Une déformation maximale en traction définit le seuil de rupture à partir desquels la contrainte est progressivement ramenée à zéro. A partir de la version 4 du logiciel, les éléments sont détruits une fois la contrainte ramenée à zéro, ce qui permet donc de détecter automatiquement la rupture et de la visualiser. Les paramètres de cette loi sont pris égaux à :

JUILLET 2001

SMP

$$\rho = 2,8.10^{-3}$$

$$E = 74000.MPa$$

$$\nu = 0,3$$

$$\varepsilon_{p\max} = 0,015$$

$$\varepsilon_{f1} = 0.016$$

$$\varepsilon_{f2} = 0.02$$

La courbe de comportement non linéaire est donnée en annexe.

La principale remarque concerne les paramètres à rupture des deux lois 27 et 36 données par Airbus France, pour lesquels la valeur à rupture passe de 0.06 à 0.016. Cette modification provient d'une calibration : pour les modèles E.F., les critères en question ne sont pas intrinsèques, la rupture numérique étant un mécanisme dépendant de la finesse du maillage. Il est donc incontournable de devoir « calibrer » ce paramètre. La procédure habituelle, connaissant la finesse de maillage du modèle cible, consiste à calibrer les paramètres de la loi matériau à partir des résultats d'un modèle de référence beaucoup plus fin. L'ONERA ne peut, dans le cadre de cette étude, se prononcer quant à l'exactitude de la valeur de ce paramètre. Airbus France a confirmé que les valeurs à rupture prise pour la loi 36 correspondait à une telle calibration, dans les zones de congés de raccordement. La finesse de maillage des modèles ONERA et Airbus France étant similaire, les valeurs des paramètres du modèle Airbus sont donc repris par l'ONERA.

Autre paramètre, une vitesse initiale est impulsée au projectile, qui est dans ce cas ralenti le long de sa course. Il est également possible d'imposer que cette vitesse reste constante. Dans les deux cas, l'énergie du calcul n'est jamais constante (apport continu d'énergie dans le modèle pour ouvrir le projectile).

Les valeurs de vitesse retenues sont de 120 m/s et de 360 m/s.

JUILLET 2001

SMP

2. RESULTATS

2.1. Projectile de vitesse initiale 120 m/s – Loi 36

Pour une vitesse initiale de 120 m/s, les niveaux de pression maximum observés lors du calcul sont de 7,89 Mpa dans le fluide (cf figure n°7). Le projectile franchit en une milliseconde une distance de 110 mm et atteint une vitesse résiduelle de 100 m/s. Le retournement du projectile est complètement effectué, alors qu'il est encore loin de la zone arrachée (au moins 150 mm, cf figure n°8).

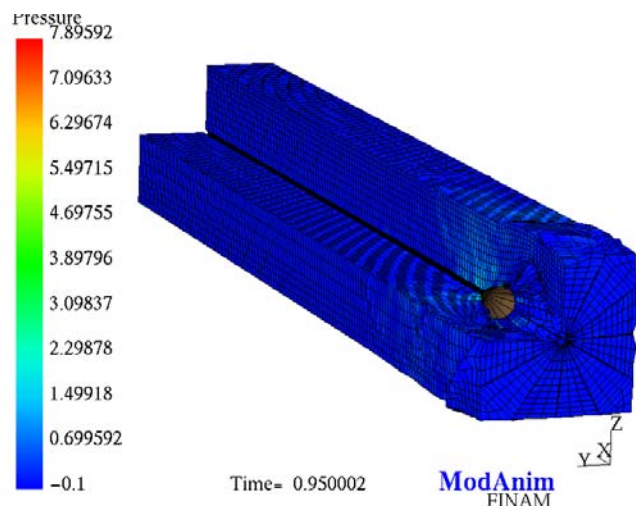


Figure n°7 – Visualisation des niveau de pression et de la progression du projectile (1 ms)

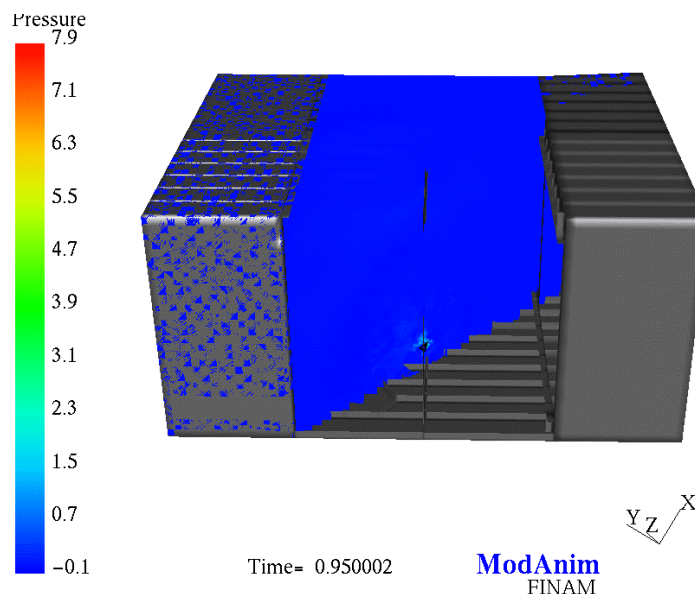


Figure n°8 – position du projectile après 1 ms (zone de pression maximale)

JUILLET 2001

SMP

Les niveaux de pression maximales dans le fluide à proximité de la peau intrados, au terme du calcul, s'élèvent à 0.4 Mpa, soit 4 bars (cf figure n°9).

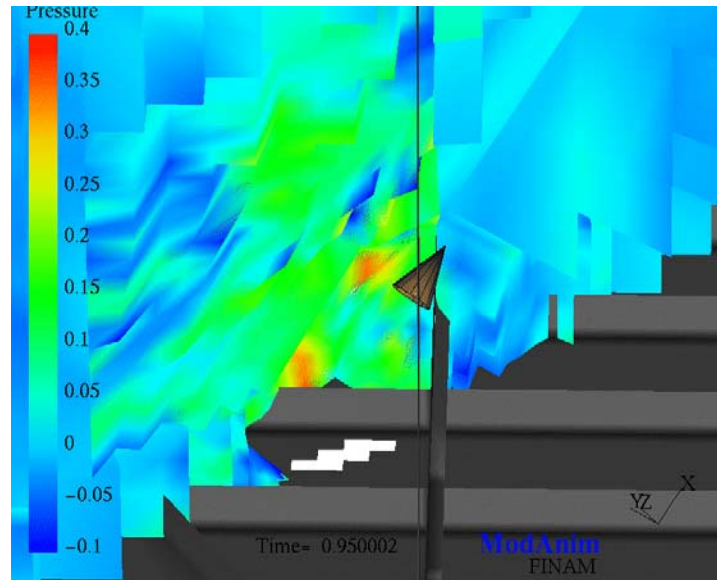


Figure n°9 – Visualisation des niveaux de pression dans le fluide, à proximité de la peau intrados

Les niveaux de contrainte et de déformations maximales dans la zone du panneau arraché sont situés comme indiqué sur la figure n°10 (éléments en blanc). Ils se situent dans des zones d'épaisseur 1.2 mm.

Le calcul est mené sur une durée d'une milliseconde. Il prend 11 heures de temps CPU sur SGI Octane R12000.

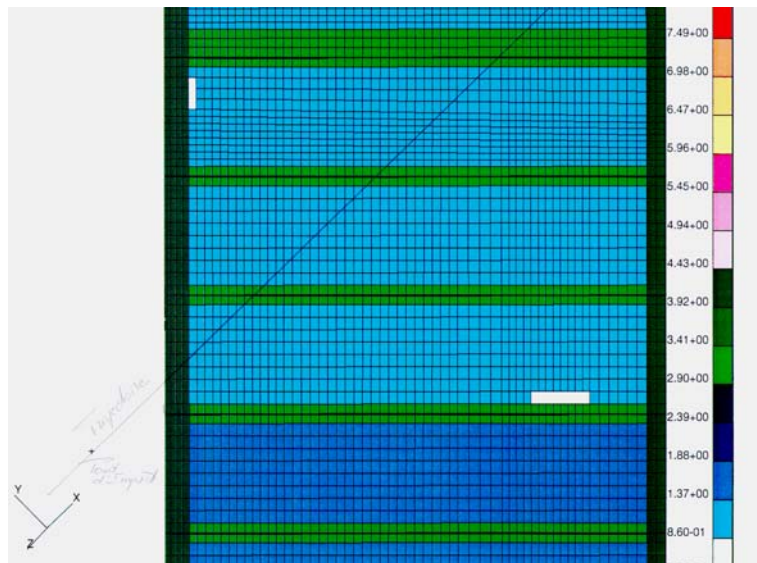


Figure n°10 – localisation des contraintes maximales dans la zone du panneau arraché

JUILLET 2001

SMP

Les niveaux de contrainte et de déformation maximale pour ce calcul sont présentés sur les figures 11 à 14. Des maxima de 100 Mpa et de 1.25 E-03 def sont relevés dans la zone qui fut sujette à l'arrachement, ce qui est largement inférieur aux niveaux requis pour initier la rupture. La force de pression sur la peau intrados est relevée et présentée sur la figure n°15. Son maximum atteint 6000 N à l'instant du retournement du projectile, ce qui est somme toute une valeur raisonnable.

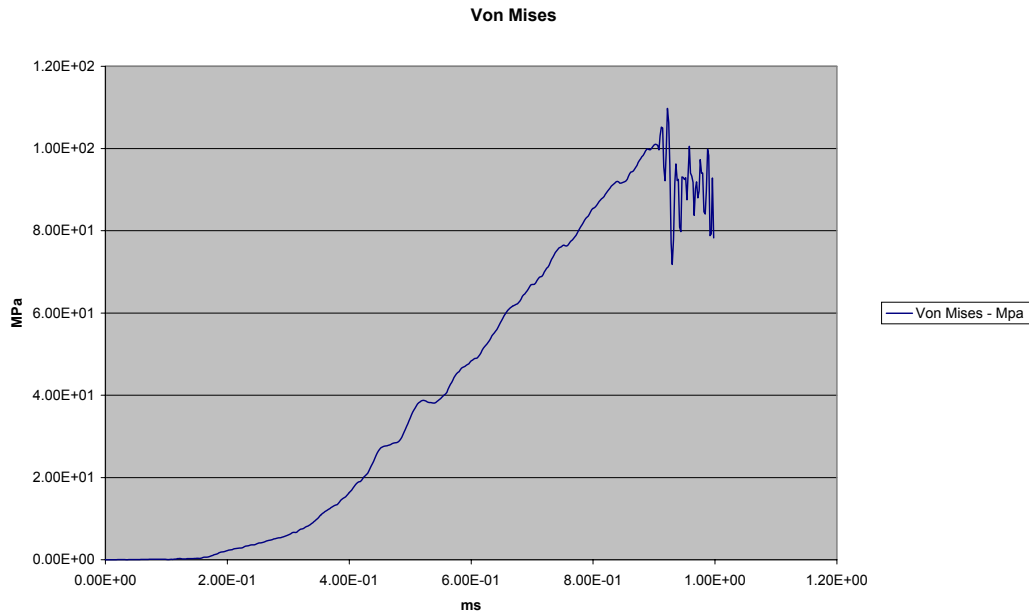


Figure n°11 – Niveau de contraintes de Von Mises maximales, dans la zone du panneau étudié

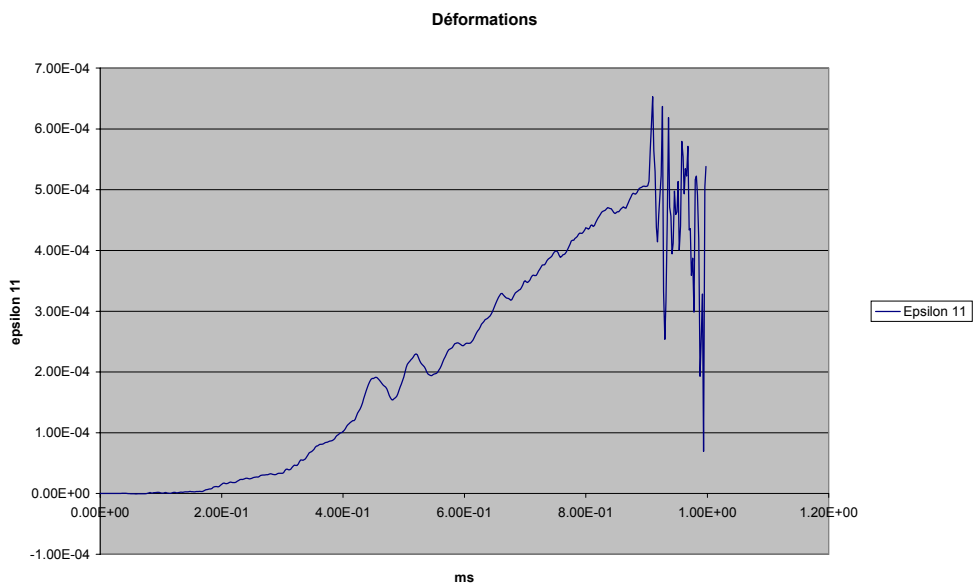


Figure n°12 – Niveau des déformations principales maximales epsilon 11, dans la zone du panneau étudié.

JUILLET 2001

SMP

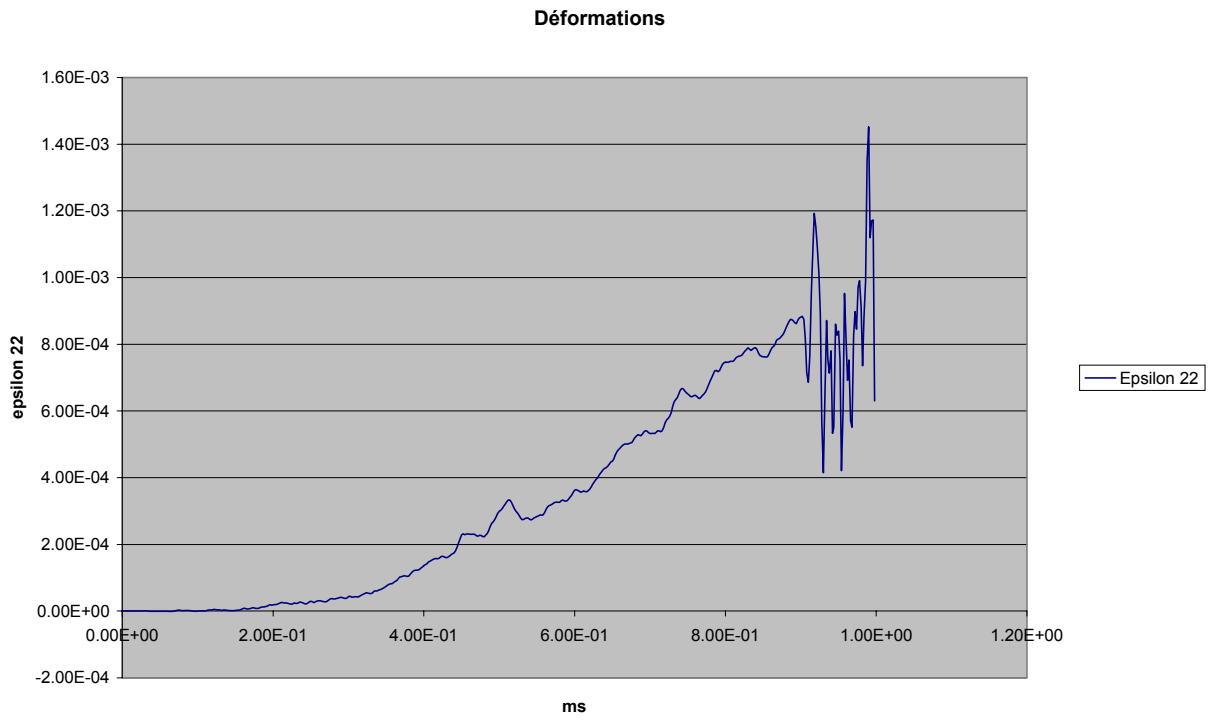


Figure n°13 – Niveau des déformations principales maximales epsilon 22, dans la zone du panneau étudié.

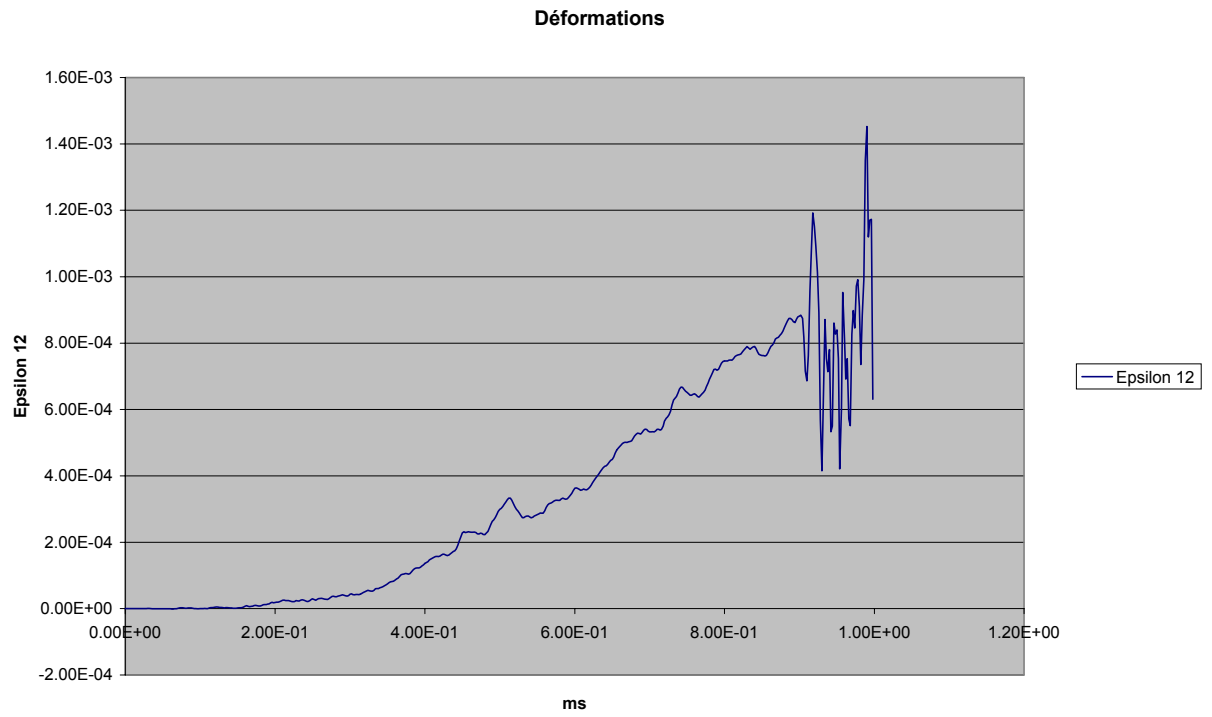


Figure n°14 – Niveau des déformations principales maximales epsilon 12, dans la zone du panneau étudié.

JUILLET 2001

SMP

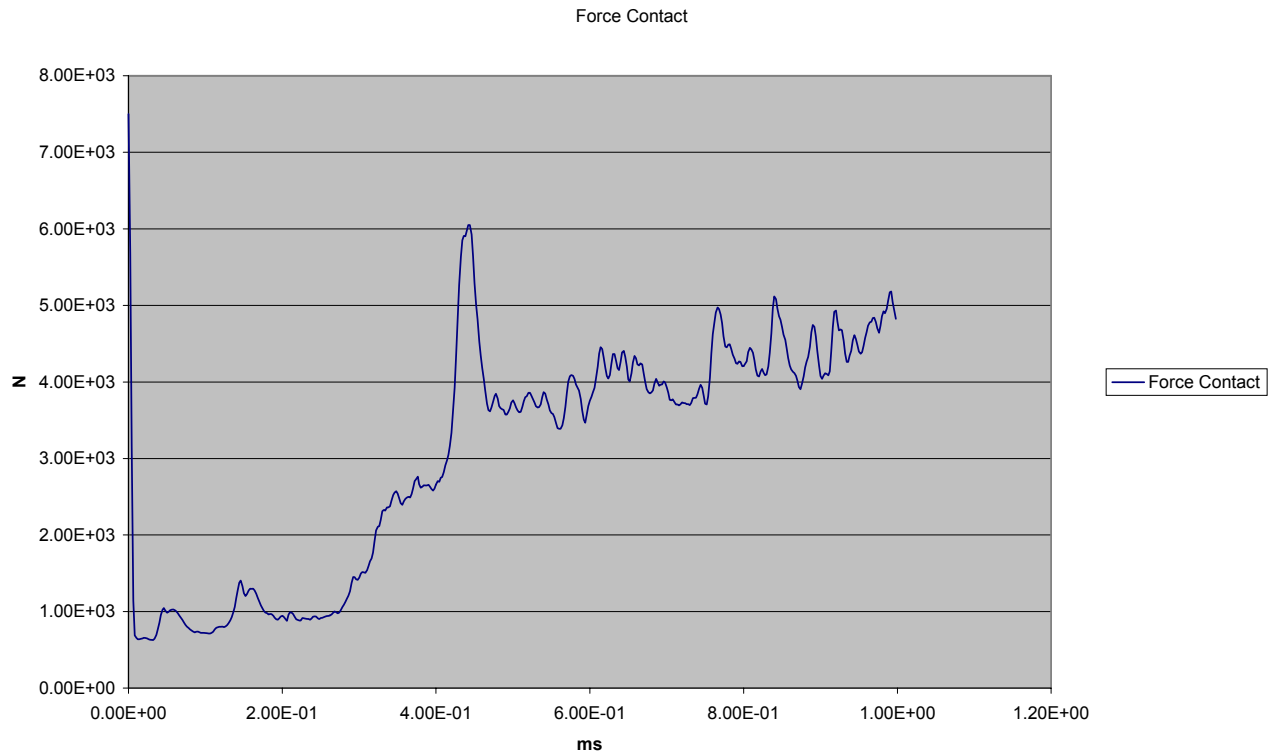


Figure n°15 – Niveau des forces de pression cumulées sur la peau intrados, dans la zone du panneau étudié.

Sur la figure n°16, on voit que la zone de contrainte maximale, pour ce cas de trajectoire, se situe plutôt à proximité du point d'impact, dans le tronçon n°2 et non le tronçon n°3.

Qualitativement, la simulation révèle bien l'apparition d'un coup de bélier (uniquement visible en simulation dynamique). Il est localisé au niveau du tronçon n°2. Les accélérations brutes, mesurées sur la peau intrados, font état de niveaux dépassant les 10 000 G (cf figure n°17). La flèche maximale dans cette zone, durant les premières millisecondes du calcul, atteint 1.5 mm (cf figure n°18). Une rupture se produit dans cette zone après 0.90 ms, au pied de la nervure séparant les tronçons 2 et 3 (cf figure n°19).

La rupture n'est pas localisée immédiatement dans la zone du coup de bélier. En fait l'onde de choc crée une surpression importante qui charge latéralement la nervure. La flexion obtenue mène à l'initiation d'une rupture en pied de nervure. La rupture s'initie des deux côtés de la nervure (un élément en flexion « positive » et son miroir en flexion « négative »). Du point de vue de la rupture, c'est l'élément 5500229 qui rompt en premier (côté tronçon 3), avant l'élément 5600440 (côté tronçon 2). L'ordre de rupture est 5500229, 5600440, 5500200 et 5500233. Ce qui signifie que la rupture se propage du côté du tronçon trois.

JUILLET 2001

SMP

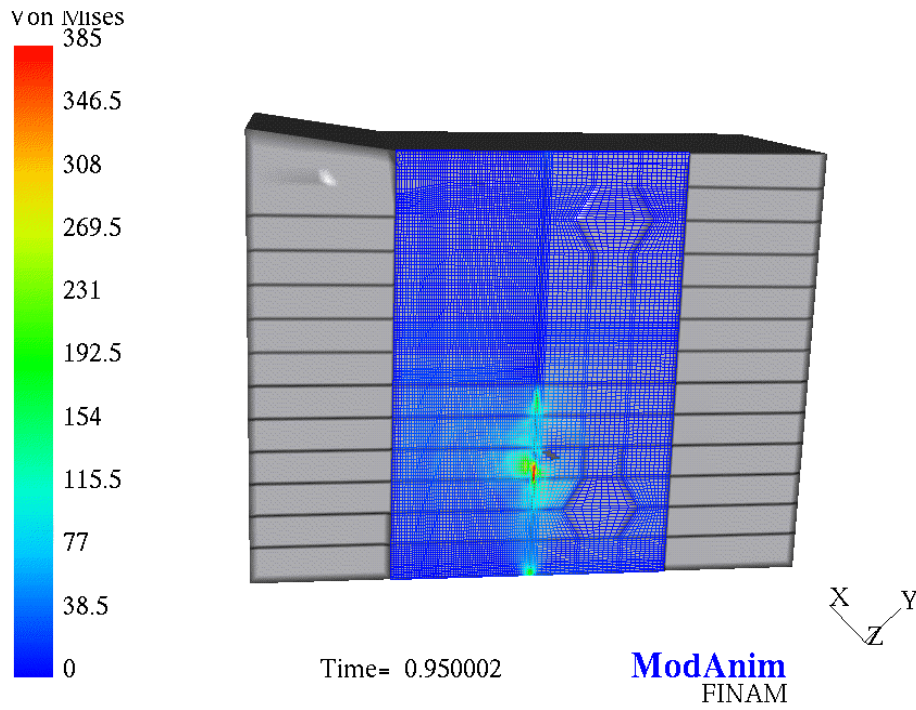


Figure n°16 – Localisation des zones de contraintes maximales sur la peau intrados

Accélération de la peau intrados

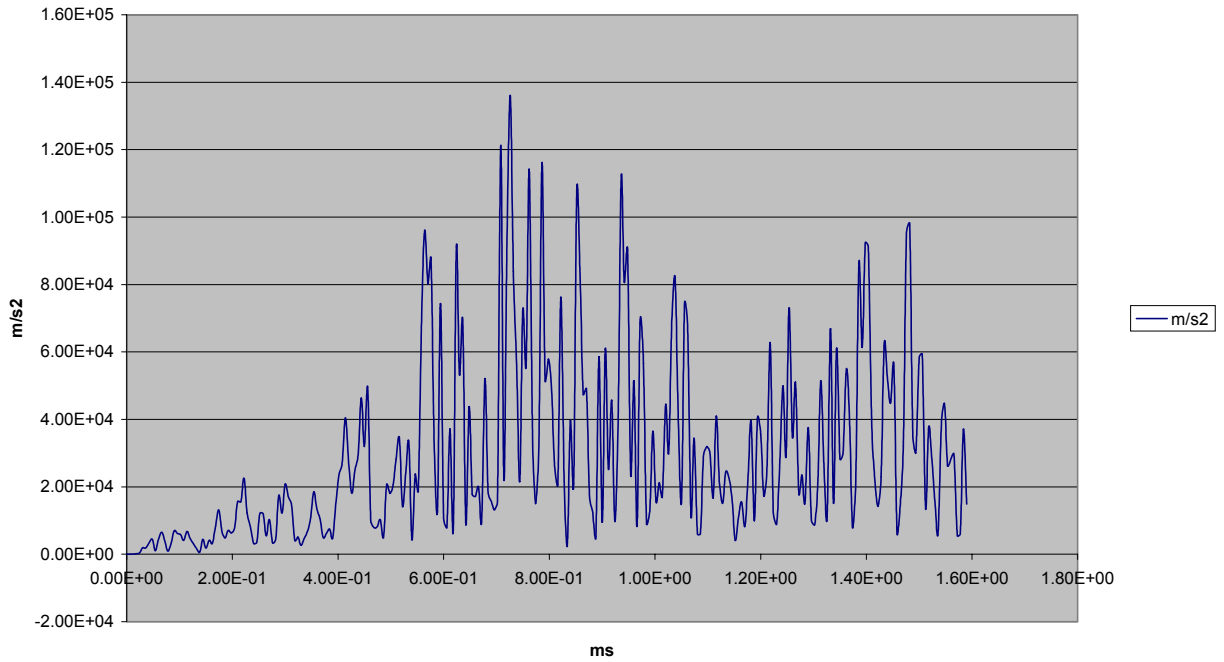


Figure n°17 – Accélérations mesurées sur la peau intrados, au lieu du coup de bélier

JUILLET 2001



Figure n°18 – Déplacements mesurés sur la peau intrados, au lieu du coup de bélier

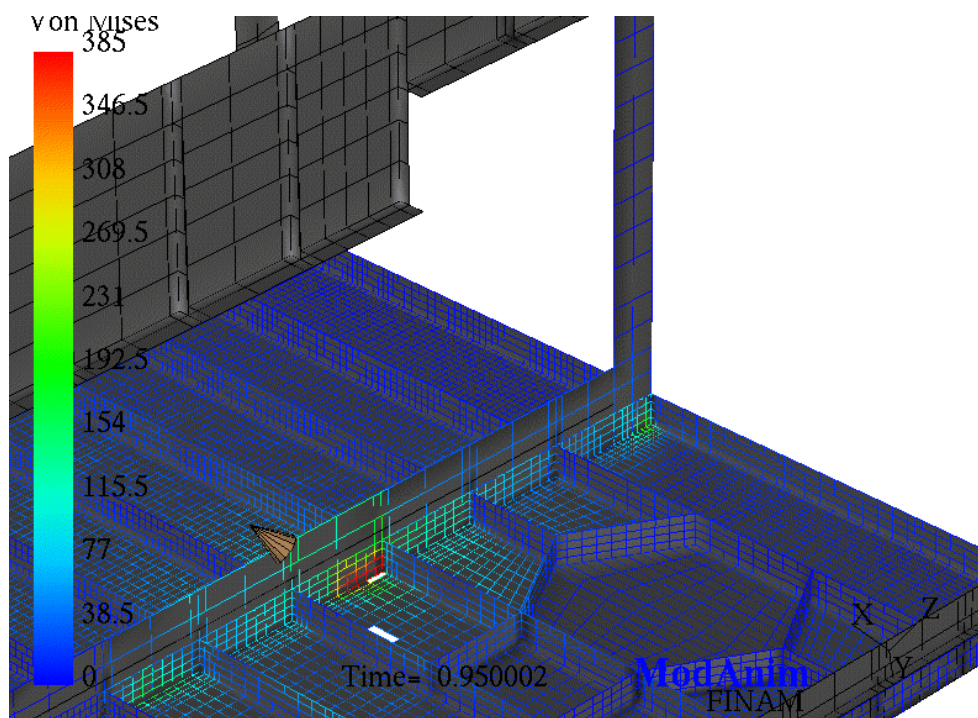


Figure n°19 – Localisation des zones de rupture sur la peau intrados

Les énergies d'hourglass et de contacts restent quasiment nulles lors du calcul, ce qui démontre que celui-ci se déroule normalement.

JUILLET 2001

SMP

En conclusion, la simulation ne confirme pas l'hypothèse que la déchirure, en cas de coup de bélier hydrodynamique, aurait du partir de la perforation. Contre toute attente néanmoins, une déchirure s'initie le long de la nervure séparant les tronçons 2 et 3. Ce résultat révèle donc la possibilité (et une sévérité inattendue), à 120 m/s, d'obtenir un coup de bélier consécutif à la pénétration d'un projectile dans le réservoir. Rappelons que les hypothèses qui ont été prises correspondent à celles d'un confinement maximal du fluide dans le réservoir (pas d'air), ce qui constitue la configuration la plus critique vis-à-vis du coup de bélier hydrodynamique.

Dans un cas comme celui-ci, il est généralement admis qu'il faille procéder à une étude paramétrique poussée, afin d'évaluer la sensibilité du résultat aux différents paramètres du modèle (finesse de maillage, critère de rupture, etc).

En ce qui nous concerne, la première question qui se pose est de savoir si le projectile utilisé et sa cinématique peuvent être supposés suffisamment représentatifs. A titre d'exemple, imaginons que sa cinématique soit différente, et que le « coup de bélier » se produise plus tardivement alors que le projectile se trouve dans la partie que nous dénommons « tronçon 3 ». Le mode de chargement et donc de rupture pourraient alors être différents.

Pour lever ce doute, deux solutions peuvent être envisagées: la première consiste à prolonger la durée du calcul, en retardant le retournement du projectile ; la seconde consiste à augmenter la vitesse initiale. De cette façon, il sera peut-être possible de provoquer le coup de bélier lorsque la position du projectile est dans le tronçon 3.

2.2. Projectile de vitesse initiale 360 m/s – Loi 27

Pour des raisons de rapidité d'obtention des résultats, c'est la seconde solution qui est préférée dans un premier temps. Elle a également l'avantage d'évaluer les conséquences d'un choc a priori plus violent.

Le calcul est mené sur une durée d'une milliseconde. Il prend 11 heures de temps CPU sur SGI Octane R12000. La loi matériau utilisée est cette fois la loi 27 (avec un critère à rupture valant 0.06 et non plus 0.016).

Pour une vitesse initiale de 360 m/s, les niveaux de pression maximum observés lors du calcul sont de 30,8 Mpa dans le fluide.

Le projectile franchit en une milliseconde une distance de 300 mm et atteint une vitesse résiduelle de 260 m/s. Le retournement du projectile est complètement effectué à l'aplomb de la zone arrachée.

La répartition des contraintes maximales est présentée sur la figure n°20. Il est important de constater que la contrainte maximale de 430 Mpa est atteinte dans une région importante, et en particulier également dans la zone d'arrachement.

JUILLET 2001

SMP

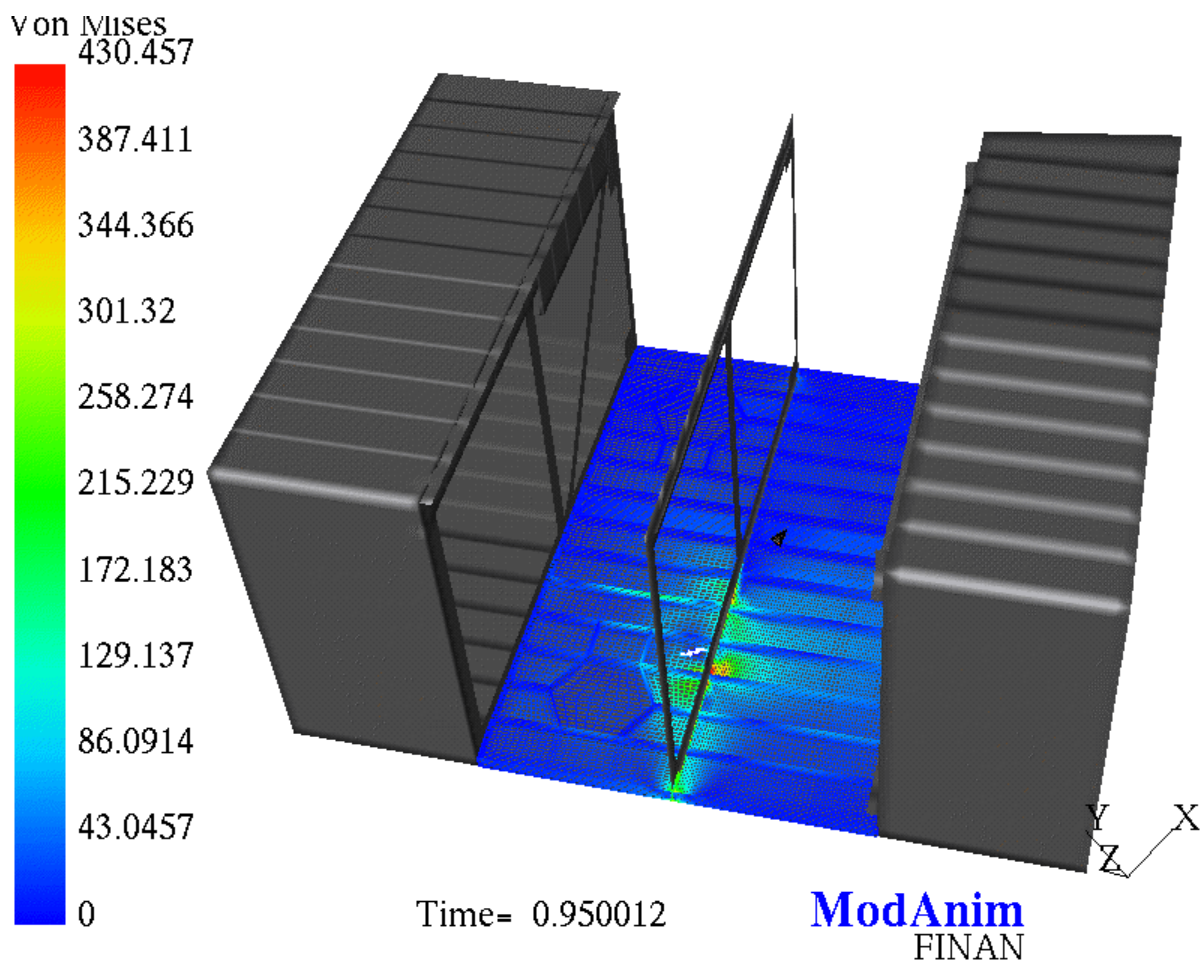


Figure n°20 – répartition des contraintes maximales pour l'impact à 360 m/s

Par contre aucun élément n'est rompu, la limite maximale en déformation dans cette zone n'étant pas atteinte (il serait sans doute plus pertinent de prendre pour critère de rupture la même valeur que pour la loi 36). La force de pression maximale exercée sur la peau intrados atteint cette fois un maximum de 12000 N, soit un équivalent de 1,2 T.

Dans la zone arrachée, et dans les éléments périphériques, la contrainte maximale de Von Mises est cette fois de 200 Mpa, ce qui est important. La déformation maximale est de $2.3 \text{ E-}03$, ou encore de 0,23 %.

Les énergies d'hourglass et de contacts restent quasiment nulles lors du calcul, ce qui démontre que celui-ci se déroule normalement.

En conclusion, cette simulation démontre bien que, même si les contraintes maximales restent localisées dans la même zone que précédemment, la zone du panneau arrachée commence à faire l'objet d'un chargement important. La cinématique du projectile s'avère bien être un paramètre influant.

JUILLET 2001

SMP

2.3. Projectile de vitesse initiale 120 m/s – cinématique modifiée – Loi 36

Cette simulation a été effectuée en prolongeant le calcul à 120 m/s sur 3 millisecondes, et en retardant l'ouverture du projectile (ouverture qui s'étend de 0 à 1.2 ms au lieu de 0 à 0.4 ms, avec une précipitation de cette ouverture à partir de 0.9 ms). L'objectif est dans ce cas de chercher à provoquer le coup de bélier plus tardivement que dans le premier cas, et d'étudier si l'on délocalise le mécanisme de rupture.

A 0.9 ms, le projectile n'a pas encore franchit les 100 mm, et le « coup de bélier » se produit au passage de la nervure séparant les tronçons 2 et 3. La vitesse du projectile ne vaut plus que 60 m/s à 1.25 ms, puis elle décroît plus lentement.

Du point de vue de la rupture, c'est l'élément 5600440 qui rompt cette fois en premier, avant l'élément 5500229. La rupture se propage toutefois toujours dans les éléments 5500200 et 5500233.

L'énergie cinétique initiale du projectile est de 360 J.

Après l'ouverture du projectile, l'énergie totale est de 1750 J, ce qui signifie que 1390 J ont été injectés dans le modèle pour procéder à l'ouverture et de la fermeture du projectile (cette énergie, q correspondrait à celle du même projectile, propulsé à 265 m/s, ou celle d'un projectile de 250 g). Le critère important concernant l'énergie est la part transférée à la structure, via le fluide.

Après 1. ms, seuls 100 J ont été communiqués au fluide. A 1.5 ms, 120 J ont été transmis, et la croissance est linéaire.

Après s'être déformé de 0.1 10⁻³ m (2%) à une contrainte de 455. 10⁺⁶ Pa, l'élément fini 5500229 de 5 mm x 1.5 mm de section (soit 7.5 10⁻⁶ m²), a absorbé moins de 0.5 J par déformation plastique. A 6 % de déformation, seuls 1,5 J auront été absorbés par cet élément. Pour absorber 150 J (énergie transmise au fluide après 2 ms), il faudra donc plastifier à 6% non loin de 100 éléments du même type, soit une zone équivalente à 10 éléments de côté, ou encore une zone de 5 cm x 5 cm. Pour absorber plastiquement les 360 J d'énergie cinétique initiale du projectile, il faudrait approximativement plastifier à 10% une zone de 7.5 cm x 7.5 cm.

Ce simple calcul montre que l'énergie transmise au fluide est suffisante pour provoquer la plastification locale bien au delà des 1.6 % du critère de rupture adopté par Airbus France comme valeur dans les congés de raccordement).

2.4. Projectile de vitesse initiale 120 m/s – Loi 27 sans critère de rupture

Dans le dernier calcul, de nouvelles valeurs, communiquées par Airbus France sont prises pour la loi 27 : $\sigma_y=397$ Mpa ; $B=460.$; $n=0.45$; $\sigma^{\max} = 455$ MPa. Aucun critère a rupture n'est imposé, et la durée du calcul est prolongée afin d'évaluer jusqu'à quelle valeur la déformation plastique se développe. Ce calcul est un calcul de vérification de l'hypothèse précédente, la cinématique du projectile étant la cinématique initiale.

JUILLET 2001

SMP

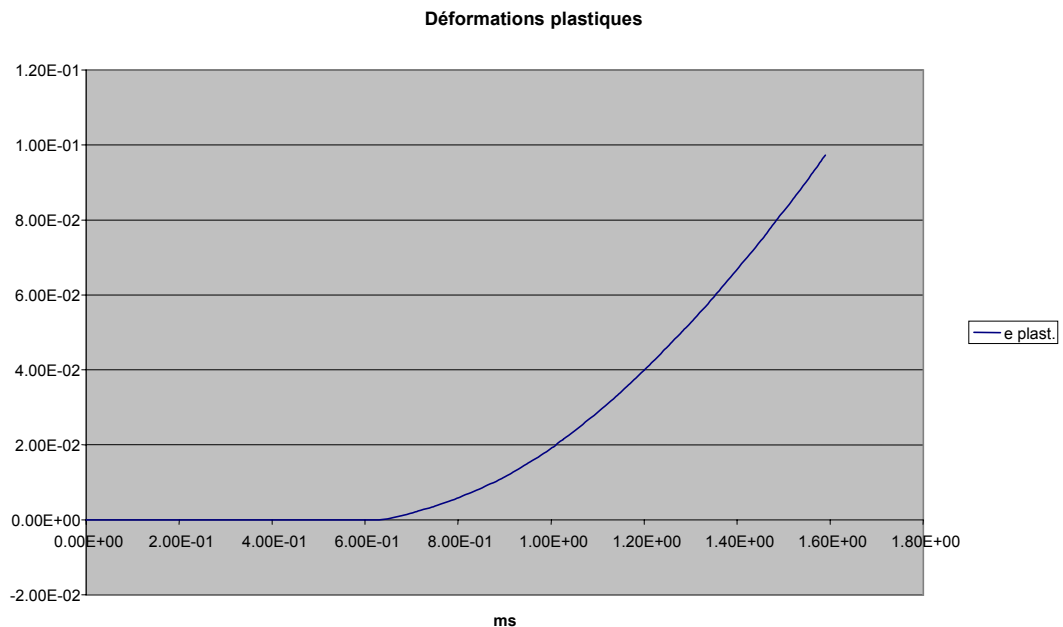


Figure n°21 – Déformations plastiques – Loi 27 sans critère à rupture

Les résultats présentés sur la figure 21 montrent que les déformations plastiques atteintes après 1.5 ms atteignent les 10 % dans l'élément 5600440. Nul doute que cette déformation continuera encore à augmenter si l'on prolonge le calcul.

3. CONCLUSIONS

Le nombre d'inconnues du problème traité rend difficile d'affirmer sans retenue si le coup de bélier hydrodynamique est le scénario réel ou non. Néanmoins, les résultats sur lesquels reposent les conclusions proviennent de calculs se déroulant proprement, sans accumulation d'erreur énergétique ni instabilités numériques, et les ordres de grandeurs obtenues sont clairement acceptables. La méthode utilisée constitue donc un outil d'analyse jugé fiable, la validité des hypothèses de base (description, unicité du projectile, positions des points d'impacts, énergie, etc) étant la principale source d'indécision face aux résultats obtenus. Par exemple, en l'absence de données expérimentales ou théoriques permettant de le quantifier, il est possible de supposer que la dynamique de retournement du projectile peut différer selon la vitesse initiale du projectile. Les valeurs du coefficient de traînée ne dépendent pas de cette vitesse en théorie, puisqu'ils ne dépendent que de la géométrie du projectile. Par contre, les valeurs utilisées ont été établies dans de l'eau, alors que le carburant réel est probablement plus visqueux. Le retournement étant un mécanisme instable, il n'est pas acquis, bien au contraire, que celui-ci prenne dix fois plus de temps pour se produire pour une vitesse d'impact dix fois moins importante. Un ralentissement d'un facteur de trois de cette dynamique de

JUILLET 2001

SMP

retournement a néanmoins permis de démontrer que les conséquences du coup de bélier, bien que légèrement différentes, restaient également sévères.

La méthode utilisée permet de résoudre le problème de façon directe, avec des temps de calcul acceptables permettant de mener une étude paramétrique (possibilité de mener un calcul et son exploitation par jour). Pour cela, les finesses de maillage (en particulier du fluide) autour du projectile et dans les caissons sont nettement différentes (pour réduire le temps de développement du modèle et le nombre d'éléments). Cette différence de maillage ne peut être à l'origine de distorsions importantes, le modèle étant développé pour permettre à une onde radiale de se propager proprement de la zone maillée finement vers la zone maillée plus grossièrement. Les équations d'état des deux domaines étant identiques, le seul risque est d'avoir une rupture d'impédance « géométrique », qui confinerait les pressions autour du projectile. Le calcul est donc a priori conservatif.

La simulation de l'impact à 120 m/s ne confirme pas l'hypothèse que la rupture, en cas de coup de bélier, aurait du partir de la perforation. Néanmoins, une déchirure s'initie le long de la nervure séparant les tronçons 2 et 3. Ce résultat révèle donc la possibilité, à 120 m/s, suite à l'apparition d'un coup de bélier consécutif à la pénétration d'un projectile dans le réservoir, d'amorcer une rupture le long des zones renforcées de la structure. Par ailleurs, une autre simulation, pour laquelle la cinématique est fortement modifiée afin d'initier le choc lorsque le projectile s'est déplacé plus avant dans le tronçon sujet à rupture, démontre bien que la zone de chargement maximal de la peau intrados peut être déplacée du tronçon 2 au tronçon 3 en jouant sur cette inconnue du problème.

Les nombreux calculs paramétriques, menés pour des lois de comportement différentes, mettent en évidence que – même si la valeur du critère à rupture a une forte influence sur l'initiation de la rupture – l'énergie mise en jeu dans ce scénario est suffisante pour mener à des déformations plastiques locales dépassant les 10% dans les zones « de rupture ».

S'il fallait donner une conclusion simple et directe à cette étude, c'est donc que le scénario du coup de bélier hydrodynamique ne peut pas être écarté, d'autant que rien ne prouve que d'autres perforations n'aient pu avoir lieu à proximité immédiate, et dans le tronçon n°3 cette fois, du panneau arraché. A moins que des travaux supplémentaires ne viennent remettre en question et modifier de façon conséquente certaines hypothèses de base, les simulations semblent bien démontrer, contre toute attente, qu'un coup de bélier hydrodynamique puisse produire à des vitesses aussi basses un chargement suffisant et être à l'origine de l'initiation de ruptures dans les zones de renforcement (congs, etc) de la peau intrados.

Pour conforter cette conclusion, la première des choses à faire consisterait à approfondir les caractéristiques du projectile équivalent qui, dans le contexte de l'étude, reste l'inconnue principale. Une étude paramétrique de l'influence des caractéristiques de ce projectile sur le niveau de sévérité du chargement semble être incontournable.

Une autre question que lève l'étude concerne la valeur du critère de rupture en déformation. Une investigation plus poussée sur l'AU2GN et les caractéristiques à utiliser serait donc une autre des actions à entreprendre, ne serait-ce que pour confirmer la remarque précédente.

JUILLET 2001

SMP

La dernière des priorités serait de reprendre la modélisation en évitant certains des problèmes rencontrés. Il est en effet possible d'améliorer encore la cohérence et donc la confiance dans les résultats de calcul. Certaines simplifications géométriques (et certains choix de raffinement de maillage) ont été faites, par exemple, dont il serait intéressant de vérifier la faible influence.

REMERCIEMENTS

La méthode de modélisation E.F. utilisée pour cette étude a été développée sur contrat du SPAé/ST/STA, dans le cadre d'une étude pluri-annuelle menée en collaboration avec Airbus France et la DCE/CEG.

REFERENCES

- [1] « Accident survenu le 25 juillet 2000 au lieu-dit de la Patte d'Oie de Gonesse (95) au Concorde immatriculé F-BTSC exploité par Air France »
Rapport préliminaire f-sc000725p – BEA – Août 2000
- [2] « Accident survenu le 25 juillet 2000 au lieu-dit de la Patte d'Oie de Gonesse (95) au Concorde immatriculé F-BTSC exploité par Air France »
Rapport d'étape f-sc000725e – BEA – Décembre 2000
- [3] « Simulation numérique du coup de bélier hydrodynamique – Détermination des conditions critiques d'essais. »
Deletombe E., Malherbe B.
Rapport ONERA DMSE/RCS 97/77 – Décembre 1997

JUILLET 2001

SMP

ANNEXE

AU2GN - Loi 36

