

CONCORDE: DESTRUCTION DU PANNEAU INTRADOS

Analyse du scénario de rupture en mode 2

Dans l'explication de l'accident de Gonesse, le mode de rupture du panneau d'intrados retrouvé sur la piste est un élément important. Ce document résume l'analyse, qui en a été faite par EADS sur la base des éléments fournis par les enquêteurs, des analyses théoriques et des essais réalisés depuis.

Sans être en mesure de proposer une explication certaine, nous privilégions l'hypothèse dite de la rupture en mode 2, c'est-à-dire l'enchaînement des événements suivants:

- Roulage sur une pièce métallique
- Eclatement d'un pneu
- Impact de(s) morceau(x) de pneu
- Déformation de l'intrados dans une zone ayant été détruite par la suite
- Mouvement interne de carburant dans le réservoir n°5
- Rupture par expulsion du panneau retrouvé sur la piste.

Ce scénario semble parfaitement plausible, et reste, pour EADS, le plus probable sur la base des informations disponibles. A ce titre, il doit servir de référence dans le choix des actions à entreprendre pour la remise en service des avions.

J. GROUAS

CONCORDE: DESTRUCTION DU PANNEAU INTRADOS

Analyse du scénario de rupture en mode 2 suite à un impact de débris de pneu

1 - Faits et hypothèses préliminaires

Les faits pouvant concerner la tenue de la structure de l'intrados de voilure peuvent se résumer ainsi:

1.1 Destruction du pneu

Des enquêtes et examens effectués à la suite de l'accident, il ressort les éléments suivants:

- Une lamelle métallique, élément de capot d'inverseur, a été perdue par un DC10 décollant quelques minutes avant Concorde.
- Le pneu n°2 a éclaté en roulant sur la lamelle métallique en donnant des débris de grande taille. Des essais de roulage de pneus similaires sur une lame métallique ont confirmé ce point avec des débris de pneu pouvant atteindre 7 et 11 kg.
- Après l'accident il a été retrouvé des débris, dont les deux principaux pèsent 4.45 kg et 2.6 kg. Ces derniers ont été trouvés proches l'un de l'autre sur la piste.

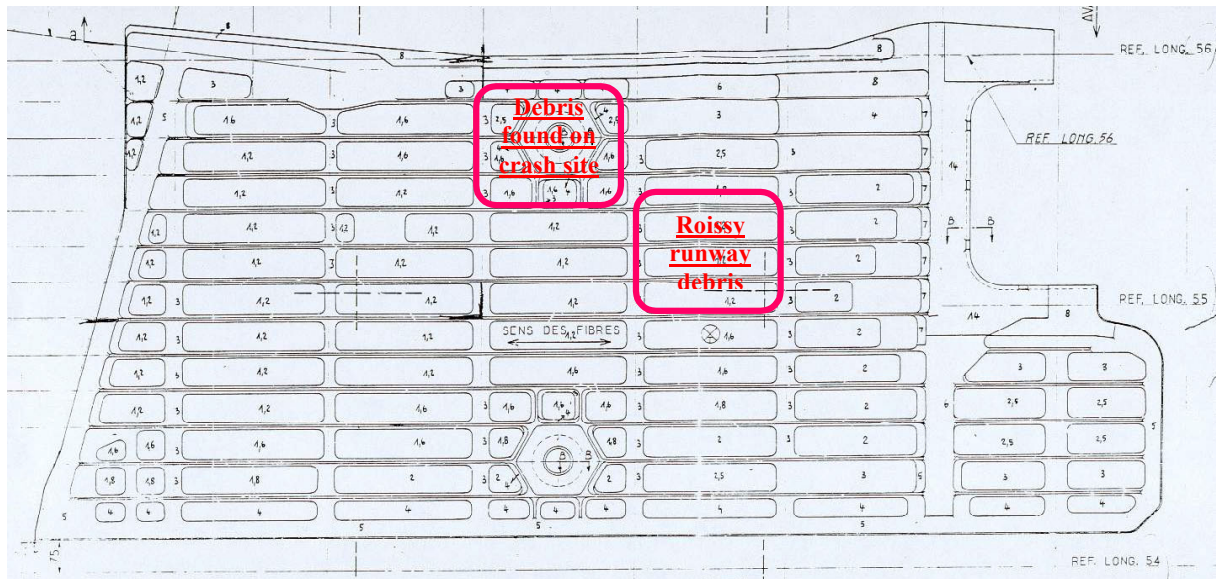
1.2 Rupture de l'intrados

Pour l'instant, sur la base des résultats d'analyses du CEAT et des informations qui ont pu lui être transmises auparavant, EADS a retenu les éléments suivants:

- Un morceau d'intrados du réservoir 5 de dimension 300x300 mm environ a été retrouvé sur la piste (scellé n° 7). Aucune trace d'impact n'est visible, mais la pièce est déformée vers l'extérieur comme si elle avait été soumise à une pression interne au réservoir
- Un autre morceau d'intrados du réservoir 5 a été retrouvé sur le lieu du crash final de l'avion avec une perforation de 30x5mm environ (scellé n° 1). Le reste de la structure avoisinante a été totalement détruit et il n'a pu être fait aucune constatation sur un impact éventuel de morceau de pneumatique sur l'intrados.

1.3 - Examen de la pièce (scellé n° 7)

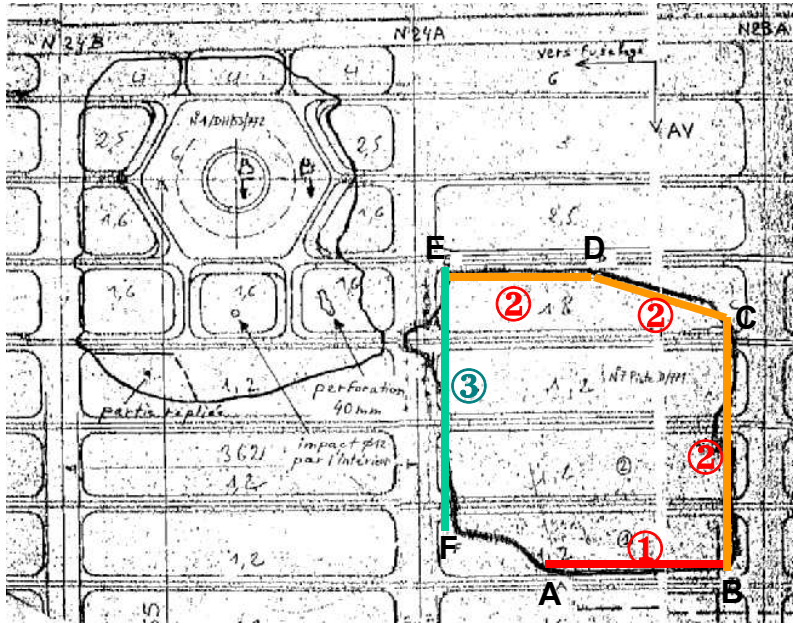
La pièce retrouvée sur la piste correspond à un morceau d'intrados côté gauche situé entre les nervures 23A et 24A et les longerons 55 et 56 (figure ci-dessous)



Des informations données sur l'examen de cette pièce, nous avons retenu les éléments suivants:

- La pièce présente une déformation générale indiquant un effort de l'intérieur vers l'extérieur.
- La déformation extérieure correspond à des rayons de courbure allant de 400 à 1300 mm perpendiculairement aux raidisseurs, alors qu'il n'y a pas de courbure apparente parallèlement à ces raidisseurs
- En dehors d'un des bords faisant apparaître un choc, qui a été identifié comme une conséquence de la chute sur la piste, il n'a pas été identifié d'autre trace d'impact sur cette pièce.
- Le faciès de rupture des panneaux sur tout le pourtour de cette pièce a été identifié de la manière suivante:
 - L'ensemble des ruptures sont d'origine statique.
 - La rupture aurait pu commencer sur la partie BC de la figure ci-dessous selon des interprétations des experts du CEAT et du CEPR. La propagation se serait faite depuis B vers C, D puis E
 - Le long de BC les sommets de raidisseurs sont déformés en compression.
 - Une rupture en mode charnière vers l'extérieur suivant EF, le point F étant certainement le dernier point à tenir.

NB: Les experts de EADS émettent l'hypothèse d'une rupture à partir du segment AB, les écaillages de peinture sur les zones BC, CD et DE, significatives d'une propagation, n'apparaissant pas sur ce segment.



- 1- Initiation de la rupture AB (congé de raccordement) ou BC
- 2- Propagation BC puis CD et DE
- 3- Charnière en flexion EF

1.4 - Fuites de carburants

Dans son rapport sur l'analyse de la combustion le CNRS confirme un niveau de fuite de l'ordre de 50 à 100 l/s en s'appuyant sur l'examen de la combustion et sur les quantités de carburant. Ceci est tout à fait cohérent avec les évaluations des débits libérés par un trou de 300*300 mm telles qu'elles ont pu être faites par EADS

On peut donc estimer que la rupture correspondant au morceau d'intrados trouvé sur la piste est la rupture principale à considérer dans la chaîne des événements qui ont conduit à l'accident. On concentrera donc la suite de l'analyse sur cette rupture.

1.5 - Hypothèse préliminaire

Au vu de ces premières constatations, un scénario préliminaire de destruction de ce panneau a pu être établi (cf.: Rapport d'Etape du BEA du 15-12-00)

- Un morceau de pneu a percuté l'intrados dans une zone proche de celle de la pièce identifiée. Le choc a généré une déformation significative de ce panneau, vers l'intérieur sous l'impact, et vers l'extérieur autour de l'impact par continuité de la structure.
- Cette déformation a entraîné un déplacement du carburant dans le réservoir
- Et ce déplacement d'un fluide incompressible par un effet de convection dans le réservoir est venu amplifier la déformation vers l'extérieur du panneau trouvé sur la piste.
- L'affaiblissement des raidisseurs pourrait dans ces conditions être la conséquence de l'impact initial. Le type de dommage constaté dépend de la

position exacte de cet impact, de l'attitude du projectile au moment de cet impact et de son énergie.

1.6 - Chronologie des événements

La succession des événements telle qu'elle apparaît dans cette hypothèse est par ailleurs cohérente avec la reconstitution chronologique de l'accident réalisée par le BEA.

1.7 - Validations nécessaires

- Néanmoins ce scénario doit bien sûr être validé par des analyses et des essais appropriés. L'objectif est à la fois d'en étayer le principe et de quantifier les phénomènes pour mettre en relation les dégâts constatés et les valeurs des paramètres d'entrée.
- Dans un deuxième temps, il faut confronter les valeurs trouvées sur ces paramètres d'entrée avec les conditions de l'accident pour établir la vraisemblance du scénario de l'accident.

2 - Moyens de validation des phénomènes

En dehors des constats de l'accident lui-même, où les informations disponibles sont trop partielles pour suffire à étayer le scénario, il a été procédé à de nombreux travaux théoriques et expérimentaux:

2.1 - Modèles de calculs et logiciels RADIOSS:

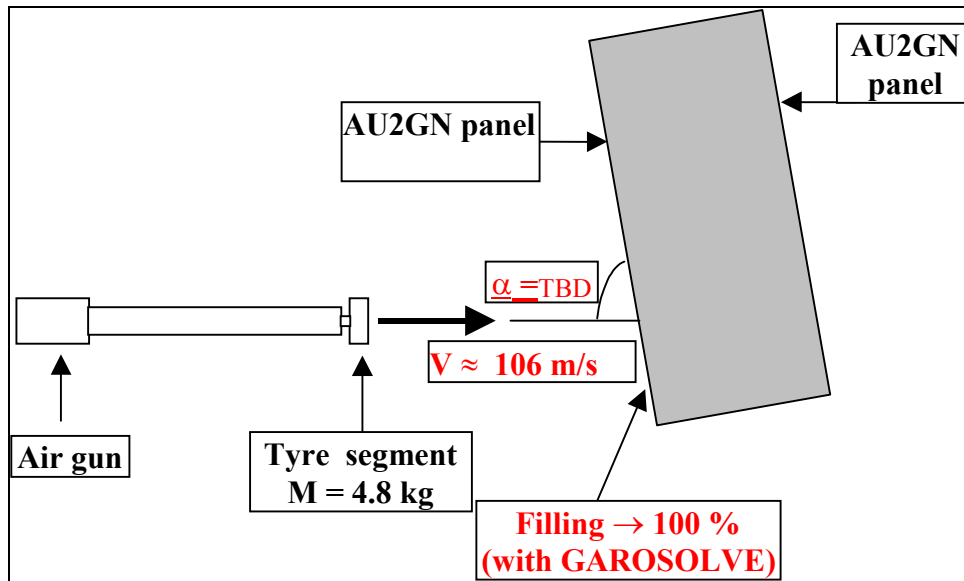
Les études théoriques ont été menées sur la base de modélisations de l'ensemble structure et carburant du réservoir 5 utilisant le logiciel RADIOSS. Ce logiciel, disponible chez EADS, est reconnu comme étant un outil représentatif de l'état de l'art pour traiter à la fois les phénomènes de dynamique rapide (inférieur à 10^{-4} s) et les couplages fluide/structure. La méthodologie et l'ensemble des travaux exposés par la suite ont été avalisés par l'ONERA, nommé expert par le BEA.

Ces modélisations ont porté sur le réservoir n°5 réel de Concorde et sur des caissons d'études qui ont été définis et fabriqués pour réaliser les essais de validation. L'ensemble des rapports sur les études théoriques est répertorié dans l'annexe 1.

2.2 - Caissons d'essais:

- Pour identifier le phénomène, EADS a réalisé des essais sur des caissons d'essais représentatifs de réservoirs, sur lesquels ont été tirés des morceaux de pneumatique à grande vitesse, dans les installations du CEAT dites du "Tir au Canon".
- Principe des essais

Les installations du CEAT permettaient la réalisation d'essais suivant le principe décrit ci-dessous.



Les limitations majeures étaient les suivantes:

- Energie maximale de projection correspondant au couple (4.8kg - 106 m/s)
- Tir horizontal
- Attitude du projectile imposée
- Taille du caisson limitée
- Nombre de tirs et de caissons limités

Il était bien sûr impossible de représenter sur ces essais tous les scénarios possibles de l'accident, et il a été choisi de réaliser des essais génériques, avec le souci d'y représenter les facteurs influents principaux. Il était donc tout à fait improbable de retrouver les conséquences semblables à celle de l'accident, mais seulement d'y trouver des indices permettant d'étayer un scénario de rupture.

- Définition des éprouvettes (annexe 2):
L'identification des paramètres influents s'est faite de manière progressive, au fur et à mesure des essais et analyses théoriques. La définition des caissons d'essais a donc évolué de la plus simple vers la plus complexe:
 - Caisson parallélépipédique avec panneaux raidis au standard de l'avion mais avec des épaisseurs de fond de maille constantes
 - Caisson parallélépipédique avec des fonds de mailles localement renforcés
 - Caissons avec des panneaux réels, prélevés sur un avion arrêté de vol
- Mesures
Tous ces caissons étaient équipés de mesures de déformation sur les fonds de mailles et les raidisseurs, et de pression dans le liquide, dans la

zone de l'impact et dans les zones voisines. Des mesures de déformées résiduelles ont été faites après essais et des caméras rapides ont permis de visualiser l'impact pendant le tir.

- Les conditions d'essais ont été choisies pour recaler les modèles théoriques avec un objectif d'optimiser les conditions pour obtenir des résultats quantifiables. Les valeurs des paramètres d'essais choisies ne préjugeaient en aucun cas de ce qui avait pu se passer au cours de l'accident.
- Programmes et rapports d'essais
L'ensemble des programmes et rapports d'essais est répertorié dans l'annexe 2.

2.3 - Eprouvettes partielles

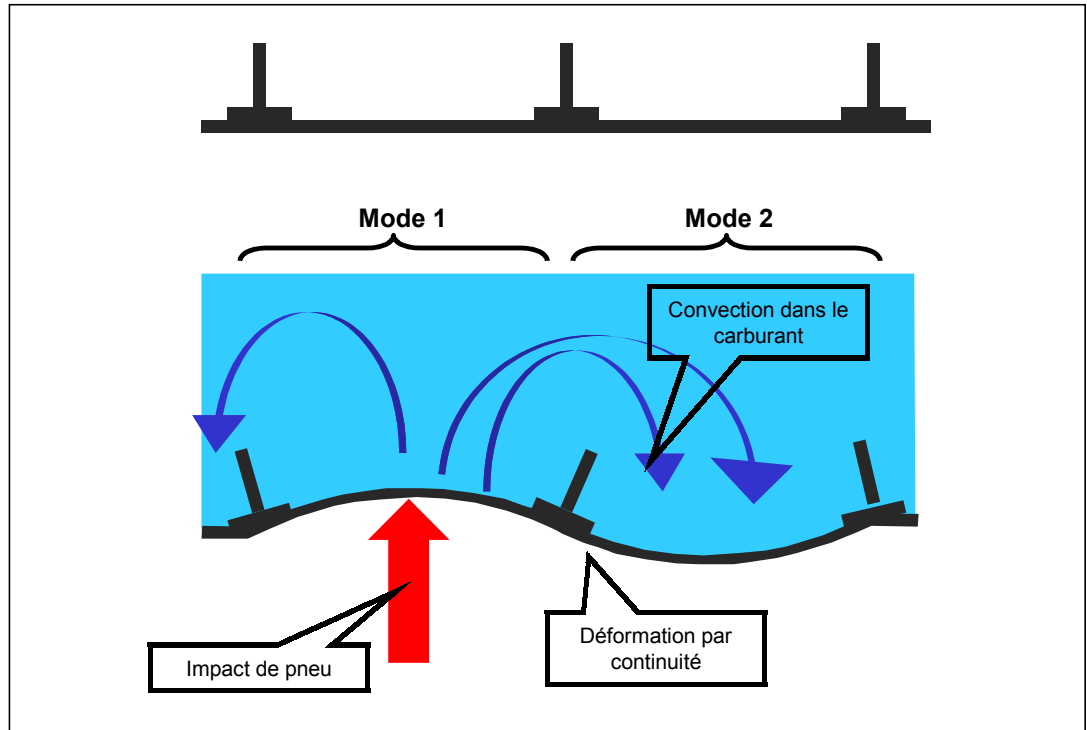
Des essais sur petites éprouvettes ont aussi été réalisés pour caractériser les matériaux et les modèles locaux de rupture dans les conditions aussi proches que possible des conditions des tirs au CEAT et de celles, que l'on a pu estimer être celles de l'accident:

Ces essais d'éprouvettes ont eu lieu dans les laboratoires d'EADS à Toulouse et au CCR à Suresnes, et également au "Sowerby Research Center" de BAE SYSTEMS en fonction des capacités de ces laboratoires à réaliser des essais particuliers.

Le détail de ces essais sera développé dans la suite du document.

3 - Effet d'un impact sur un caisson de voilure avec carburant

3.1 - Mode 1 et Mode 2



- Sur un panneau auto-raidi, sans carburant, le choc d'un morceau de pneu entraîne
 - dans la zone du choc, une déformation dans le sens du choc
 - dans les zones voisines, une déformation dans le sens opposé par effet de continuité structurale.
- A cet impact primaire, s'ajoute un effet secondaire dû au fluide, qui est déplacé et tend à repousser la structure par un processus de convection, d'abord dans les zones les plus proches. Ces zones proches peuvent être les mailles voisines sur l'intrados ou les parois verticales, en fonction de la géométrie locale et de la position de l'impact. Sur les mailles voisines, cet effet vient s'ajouter à l'effet primaire précédemment décrit.
- Dans la pratique, il est impossible de séparer ces deux effets, en revanche, il est utile de distinguer les deux zones avec des sens de sollicitation en sens opposé:
 - Le principe de déformation sur la zone d'impact et dans le sens de l'impact sera appelé Mode 1.
 - Le principe de déformation en sens inverse, correspondant à une expulsion vers l'extérieur, sera appelé Mode 2.

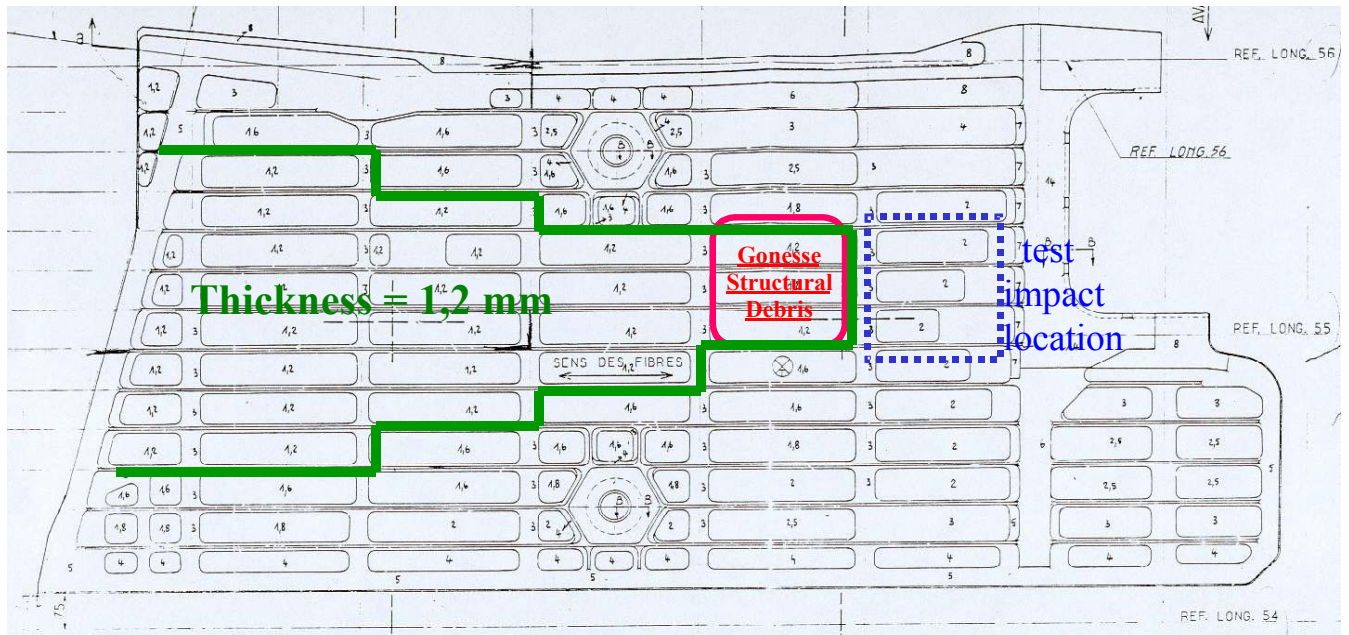
Remarque: L'existence des modes 1 et 2 est une caractéristique du type de sollicitation de la structure, indépendamment de son intensité, c'est-à-dire qu'il ne préjuge pas de l'éventualité d'une rupture. L'événement de l'accident correspond à un Mode 2, qui est allé jusqu'à rupture.

3.2 - Résultats des analyses théoriques:

Les études théoriques amènent au processus suivant:

- Le panneau se déforme sous le choc vers l'intérieur du réservoir
- Une onde de pression sphérique se propage dans le carburant à la vitesse du son, c'est-à-dire 1260 m/s environ, avec des valeurs de pression de l'ordre de 200 bars au départ, elles n'atteignent plus que 10 bars environ lorsqu'elles arrivent dans la zone où le mode 2 est attendu.
- Une convection du carburant qui se déplace à une vitesse beaucoup plus faible, soit une valeur maximale proche de la vitesse du projectile au moment et à l'endroit de l'impact (80 m/s) et s'en allant décroissant pour atteindre des vitesses réduites de moitié sur le panneau voisin
- Ce panneau se déforme vers l'extérieur sous l'action de la convection du fluide entre 3 et 6 ms après le choc, soit entre 2 et 5 ms après le passage de l'onde de pression.
- L'ensemble des études sur des panneaux de géométrie différente fait apparaître une influence très importante de la cartographie des épaisseurs et des rigidités. Pour atteindre la rupture:
 - La zone "mode 2" doit être une zone d'épaisseur faible (1.2 mm de fond de maille sur l'avion).
 - Elle doit être entourée d'une zone sensiblement plus rigide, pour supporter le choc primaire et pour limiter les possibilités de déformation à l'extérieur de la zone "mode 2".
 - La convection du fluide doit être en partie canalisée vers une direction privilégiée, par exemple, grâce à une paroi latérale.

La planche ci-dessous montre sur ce point la géométrie de la zone sur avion:



3.3 - Les expérimentations sur caissons

Les essais sur caissons confirment globalement le principe mis en évidence par les études théoriques. Une comparaison détaillée des essais et calculs fait l'objet des rapports cités dans l'annexe 2.

Le bilan de ces essais peut se résumer de la façon suivante:

- Des déplacements significatifs en mode 2 ont été observés sur tous les essais, quelles que soient la géométrie et l'énergie des projectiles.
- La séquence des phénomènes et l'évolution dans le temps des paramètres mesurés sont en accord avec le calcul.
- On retrouve l'indépendance apparente entre l'onde de pression et les contraintes. Les contraintes sont plutôt liées au déplacement d'ensemble du liquide.
- Les valeurs des paramètres mesurés sont en bon accord avec les calculs. Les courbes et le tableau synthétique suivant le confirment.

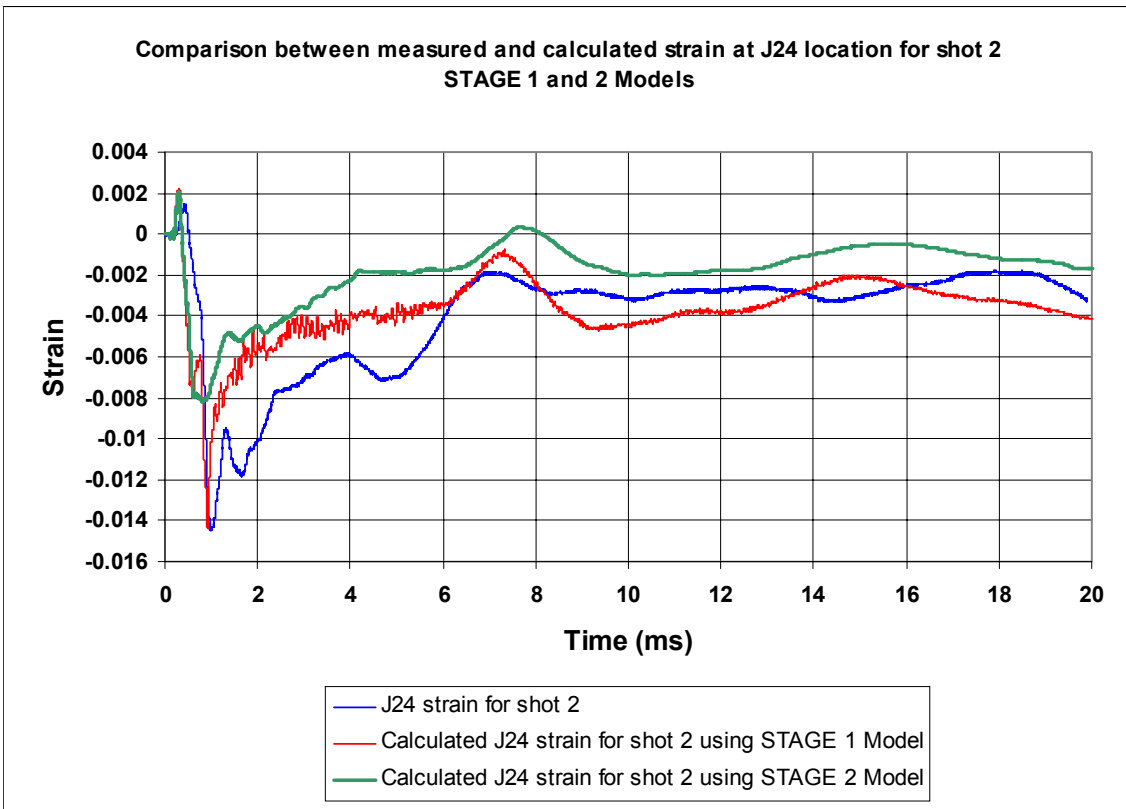
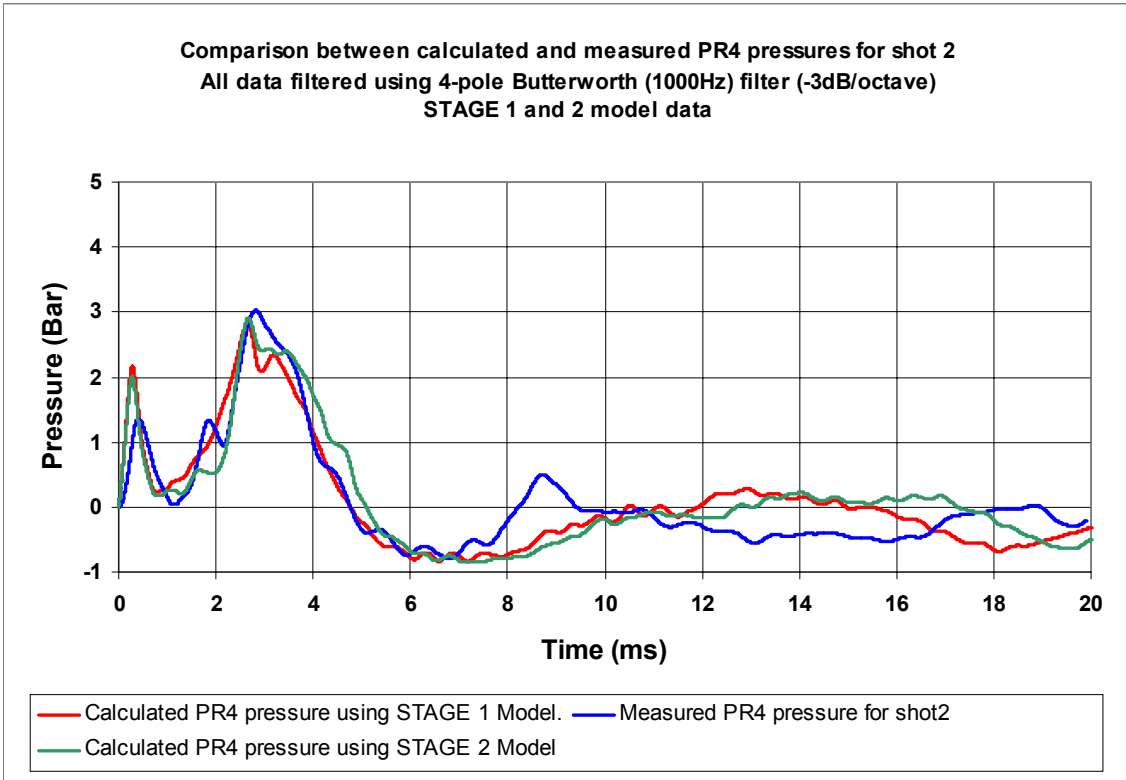


Tableau de synthèse des valeurs de calcul et d'essai obtenu lors du tir n°5

	TEST	SIMULATION
Maximum pressure (under impact)	203 bars	280 bars
Maximum pressure (away from impact, in expected mode 2 area)	10 bars	14 bars
Maximum skin strain (gauges under impact)	5,5 %	3,7 %
Maximum stiffener strain (gauges under impact)	4,3 %	3,8 %
Maximum skin strain (gauges away from impact)	0,7 %	0,6 %
Maximum stiffener strain (gauges away from impact)	0,7 %	0,7 %

Mais aucune rupture n'a pu être mise en évidence lors de ces essais.

3.4 - Les désaccords entre les essais et les études théoriques

Au vu de ces résultats, on peut affirmer que le principe du Mode 2 est bien validé et que le calcul et les essais sont en bon accord à la fois sur les phénomènes et les niveaux atteints sur les grandeurs mesurées.

L'écart se situe essentiellement sur la capacité à prédire la rupture. C'est donc le phénomène très local du mode de rupture qu'il a fallu revoir.

4 - Le mode de rupture

4.1 - Rupture en mode 2

Les modèles de rupture dépendent du type de sollicitation appliqué. On s'intéressera donc essentiellement à celui du mode 2, reconnu comme l'élément majeur de l'accident.

Cette modélisation se fait en deux étapes:

- identifier les zones fragiles sur la structure
- modéliser dans le détail ces zones avec le support d'essais sur petites éprouvettes pour en ajuster les paramètres.

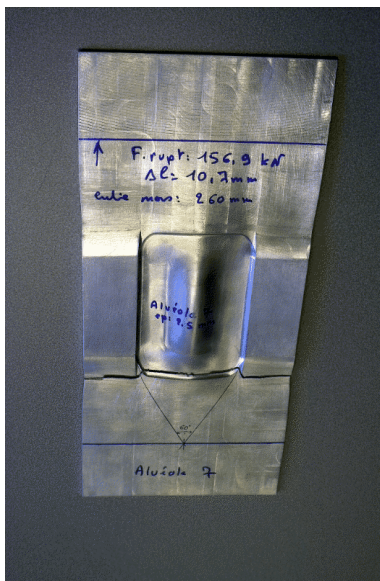
4.2 - Identification des zones fragiles

Selon les informations en notre possession et au stade actuel des expertises faites sur la pièce, la rupture se serait initiée et propagée le long des congés au pied de la nervure 23A et des raidisseurs. L'ensemble des calculs avant rupture montre que ces zones correspondent à des niveaux de contraintes maximales.

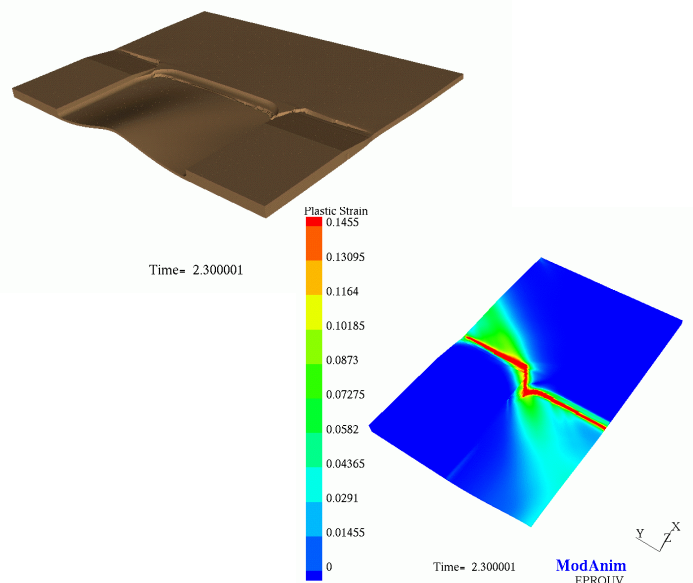
4.3 - Modélisation détaillée de la rupture

4.3.1 - Le principe

- Les modèles théoriques utilisés pour représenter les phénomènes étant à la limite des moyens de calculs accessibles aujourd'hui, les congés situés au pied des raidisseurs de panneaux n'ont pas été représentés géométriquement dans les modèles d'impact. Il a fallu modéliser le phénomène de rupture dans les congés par une approche en deux temps.
- D'abord, on a effectué une première modélisation volumique fine de la zone de congé de façon à connaître le comportement à rupture de cette zone. Cette modélisation a été confirmée par essais à rupture sur des éprouvettes spécialement définies. A titre d'illustration, on présente ci-après une de ces éprouvettes après rupture ainsi qu'une vue analogue du modèle ayant subi le même chargement.
- Ensuite, on a ajusté sur ce calcul très fin mais local, un modèle d'éléments de structure de taille susceptible d'être intégré dans une structure avion, mais ayant un comportement globalement équivalent.



Éprouvette d'essai après rupture



Modélisation rupture
et visualisation déformations plastiques

4.3.2 - Les résultats des essais

Les essais sur éprouvettes ont permis de confirmer que la zone fragile sous sollicitation en traction se trouvait bien dans le congé.

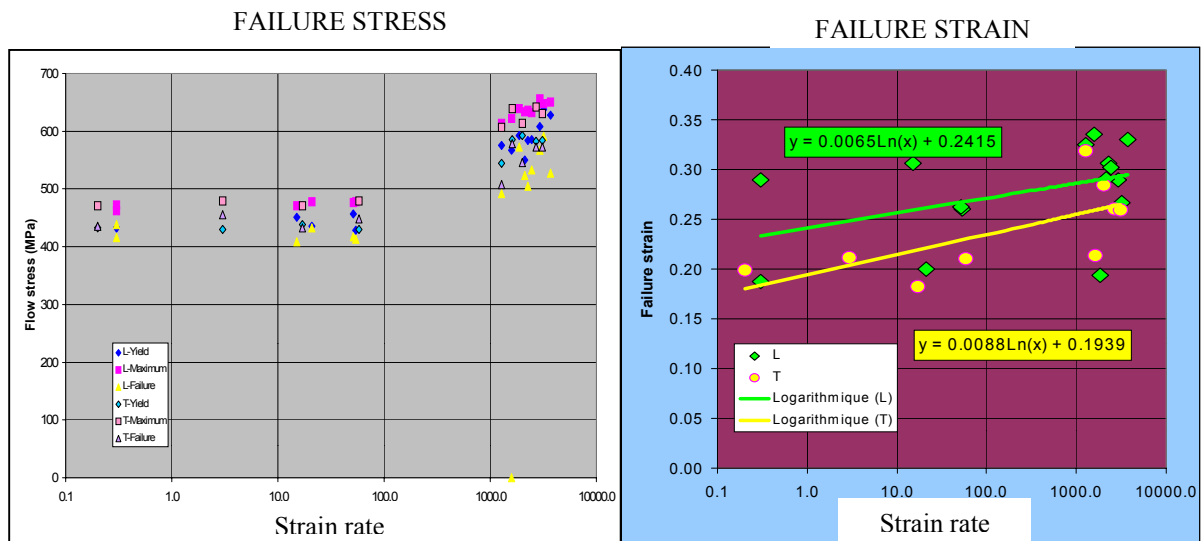
Le modèle de l'éprouvette représente bien l'essai, et pouvait servir de référence pour ajuster les modèles de rupture sur les caissons et l'avion, en fournissant une courbe effort/allongement particulière pour les éléments de cette zone.

4.4 - Le comportement du matériau sous sollicitation très rapide.

L'essai précédant n'a pu être fait qu'à des vitesses de chargement de l'éprouvette relativement faibles pour des raisons de mise en œuvre.

Lors de l'accident, et au vu des résultats théoriques et expérimentaux précédemment évoqués, les vitesses d'allongement sont de l'ordre de 1000 s^{-1} à 10000 s^{-1} , (c'est-à-dire qu'une longueur initiale de référence double respectivement en un millième et un dix-millième de seconde). Des essais ont été menés sur le matériau du Concorde (AU2GN) au laboratoire de BAE SYSTEMS (Sowerby Research Center), spécialement équipé pour ce type d'essais.

Les résultats présentés sur les diagrammes suivants montrent une augmentation importante des contraintes et allongement à rupture avec la vitesse de sollicitation.



4.5 - Conditions de rupture

De ces analyses, il en ressort que dans les conditions d'impact supposées, la structure est capable d'absorber localement et avant rupture une énergie sensiblement plus grande en dynamique qu'en quasi-statique. Compte tenu de la dispersion des résultats obtenus avec des conditions initiales répétitives, le coefficient "d'amplification dynamique" sur l'énergie à rupture au cours des tirs sur caissons ou au cours de l'accident peut se situer entre 1.5 et 2.5 avec une valeur moyenne autour de 2.

Dans ces conditions, au cours de l'essai n°5 sur un panneau réel avion, l'énergie locale de déformation dans les congés peut être estimée à 65% de l'énergie de

rupture. Ceci apparaît cohérent avec les mesures et déformations résiduelles trouvées.

Pour obtenir effectivement une rupture dans ce type d'essai, il faudrait donc:

- augmenter d'autant l'énergie globale des projectiles à même géométrie,
- mieux focaliser l'énergie localement par des conditions d'impact particulières,
- avoir fragilisé la structure par un endommagement préalable.

Remarque: En l'absence d'aucun moyen pour le vérifier, on prend l'hypothèse que les résultats liés aux particularités du dessin exprimés § 4.3 et à la vitesse de sollicitation du § 4.4 peuvent se superposer.

5 - Le cas de l'accident

Ayant bien identifié et vérifié le principe de la sollicitation en mode 2 de la pièce retrouvée sur la piste, et évalué des conditions d'énergie susceptibles d'amener le mode 2 jusqu'à la rupture, il convient de revenir au contexte de l'accident pour tenter de dégager des combinaisons d'événements possibles.

Si on revient aux conditions de rupture possible évoquées dans le paragraphe 4.5, la rupture peut s'expliquer dans le cas de l'accident par une combinaison d'événements suivants:

- augmenter l'énergie globale par une augmentation de masse et/ou de vitesse de débris ou en considérant un cas de débris multiples
- mieux focaliser l'énergie dans les congés. Ceci peut être obtenu par des conditions d'impact différentes en position, attitude et peut-être vitesse de rotation du ou des débris. Le mouvement du carburant et son interaction avec les accidents locaux de géométrie est susceptible aussi d'agir sur ce point.
- Avoir fragilisé la structure au préalable, ceci pouvant être la conséquence d'un endommagement en mode 1.

Tous ces points sont revus en détail ci-dessous.

5.1 - le débris de pneu

5.1.1 - masse du/des morceaux de pneu

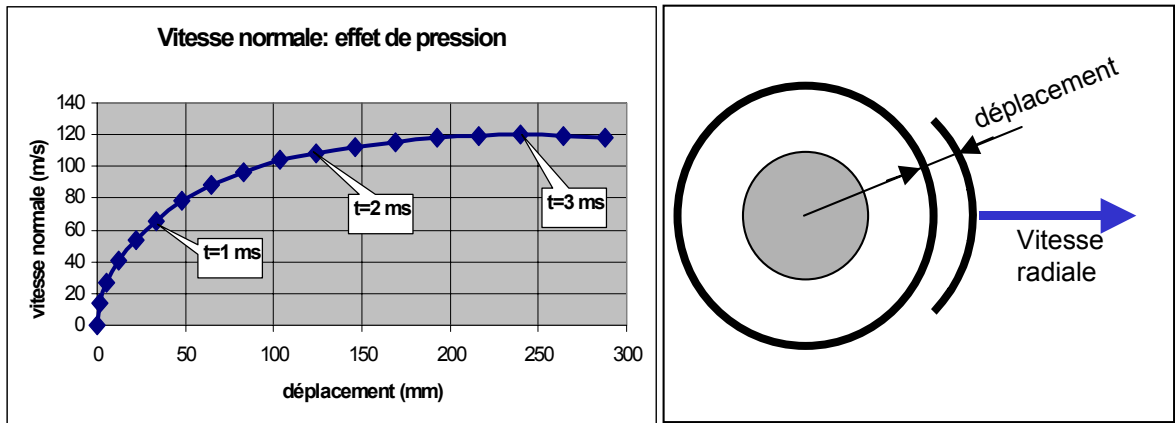
Les seuls morceaux de pneus identifiés sont ceux qui ont été trouvés sur la piste, dont les deux plus gros font respectivement 4.4kg et 2.6kg. Un impact d'un morceau plus gros reste possible, en supposant qu'il aurait pu être détruit par la suite.

5.1.2 - vitesse du morceau à l'impact

La vitesse d'impact est la résultante de:

- la vitesse tangentielle de la roue, liée à la vitesse de l'avion (87m/s) et corrigée de l'écrasement du pneu au sol qui diminue le rayon de roulement de la roue de 12% environ. La vitesse tangentielle est donc 97m/s.

- la vitesse normale, due à l'explosion du pneu et qui dépend largement de la manière dont s'est propagée la rupture du pneu, suivant que le morceau se détache normalement à la surface sous l'effet de la pression, ou qu'il se déchire en s'ouvrant suivant une trajectoire divergente.
Une étude a été menée dans le cas d'une expulsion sous le seul effet de la pression interne qui donne une évolution de la vitesse radiale suivant le schéma ci-dessous:



En dépit du caractère un peu théorique de ce calcul, on constate qu'une vitesse normale de l'ordre de 100 m/s peut être atteinte très rapidement.

La combinaison de ces deux vitesses donnerait une vitesse totale de 140 m/s, donc une énergie environ deux fois supérieure à celle disponible lors des essais.

5.1.3 - La position de l'impact et son attitude:

Le positionnement de l'impact du pneu sur la structure peut être un paramètre significatif sur le résultat. Toutes les études faites ont été menées aussi bien par analyse que par essais en centrant l'impact du pneu au milieu entre les deux nervures concernées. Un impact plus près d'une nervure pourrait occasionner une détérioration locale en mode 1 qui viendrait fragiliser la structure plus susceptible de se rompre en mode 2 par la suite.

L'attitude du morceau de pneu au moment de l'impact a aussi son importance. Si tous les calculs et essais ont été faits avec un impact à plat, il faut admettre que des attitudes et des positions d'impact différentes, pourraient aussi avoir des conséquences plus importantes. Une mise en rotation du projectile doit aussi modifier le résultat.

5.2 - le carburant dans le réservoir

La question du niveau de remplissage nécessaire dans les essais, a fait l'objet d'études particulières. L'enjeu était de rester représentatif de l'accident compte tenu des différences de taille de l'éprouvette d'essais et de sa position: le

morceau de pneu est tiré horizontalement sur un caisson, mis en position quasi verticale, au lieu d'une position horizontale sur avion.

- Remplissage du réservoir 5 et l'effet d'accélération
Au moment de l'impact du pneu sur le panneau du réservoir n°5, celui-ci devait être à 98% de sa capacité maximale. L'accélération longitudinale de l'avion étant de 0.28 g, la verticale apparente était inclinée de 15°, ce qui fait que la bulle en phase gazeuse se trouvait concentrée à l'avant du réservoir, et très éloignée de la zone d'impact.
- Les analyses effectuées sur le réservoir réel, avec des pleins de 98% et de 100%, ont montré que la surface libre était trop loin de l'impact pour influencer le phénomène du mode 2.
- Les mêmes comparaisons sur l'éprouvette d'essais ont montré un effet important parce que la surface libre se trouvait, dans les conditions de l'essai, trop près de la zone d'impact et qu'elle perturbait le mouvement de convection recherché. Les analyses ont démontré que le plein complet était la configuration représentative.
- En revanche, la forme exacte des parois du réservoir et les équipements internes n'ont pas pu être représentés complètement.

5.3 - Le niveau de contrainte du panneau avant l'impact

- L'état de chargement du panneau d'intrados de voilure pendant la phase de décollage a été évoqué comme un facteur d'amplification possible des conséquences de l'impact
- Pendant les phases au sol, ce panneau est en compression principalement sous l'effet du poids de la voilure pleine de carburant, auquel viennent s'ajouter les contraintes de roulage dues aux irrégularités de la piste. Ces contraintes de compression sont inférieures à 35 MPA dans les nervures et à 11 MPA dans les fonds de maille (cisaillement).
- Ces contraintes sont beaucoup trop faibles pour interférer de façon mesurable sur le phénomène de rupture de l'accident.

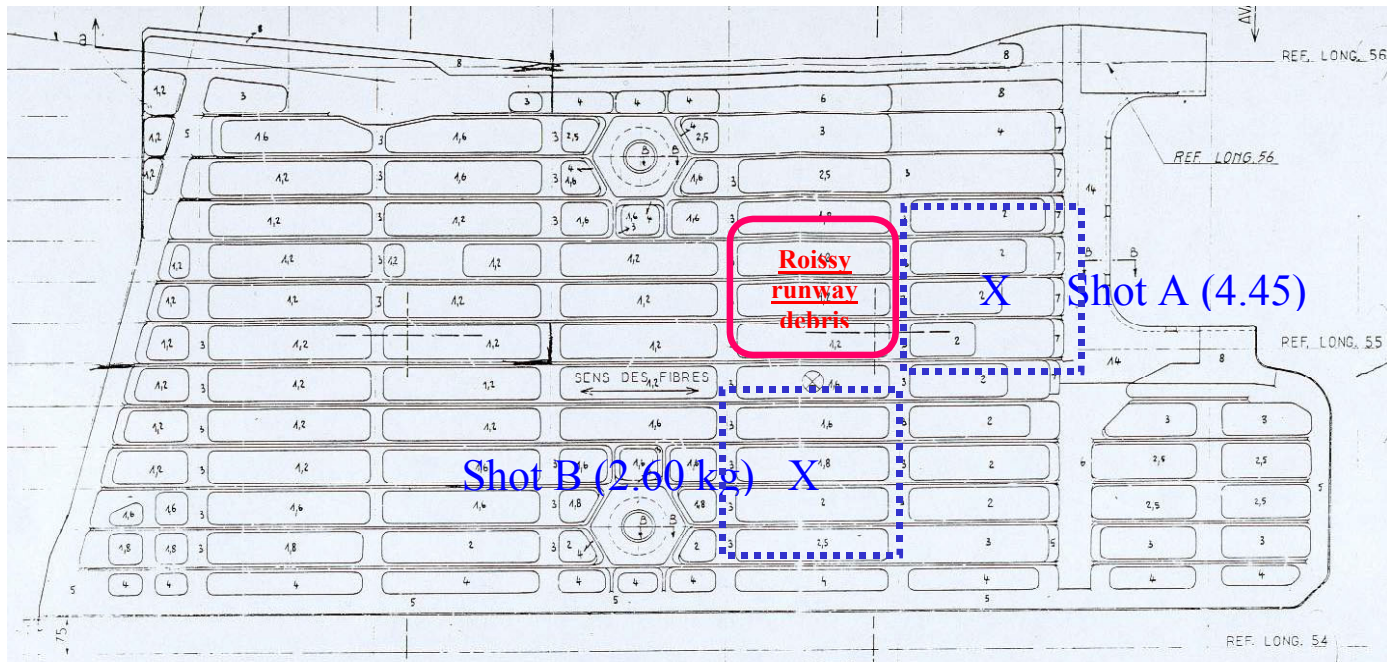
5.4 - Fragilisation initiale à l'impact

- Toutes les études effectuées par analyses et dans les conditions choisies pour les essais ont recherché des preuves de comportement en mode 2 sur des structures qui ont toujours bien résisté à l'impact primaire en mode 1.
- Les déformations en compression constatées sur les sommets de raidisseur de la pièce pourrait laisser supposer que cela n'a pas forcément été le cas lors de l'accident.
- Pour revenir à la question de la position de l'impact et aux caractéristiques du projectile mentionné dans le paragraphe 5.1.3 ci-dessus, on peut admettre

que des conditions particulières de l'impact proche de la nervure 23A auraient pu initier une destruction locale entraînant une fragilisation de la structure, dont les traces de flambage des raidisseurs sur la pièce retrouvée feraient partie.

5.5 - des débris multiples

- Les études menées ont toujours considéré l'impact d'un seul morceau de pneu sur l'intrados et l'éventualité de plusieurs morceaux atteignant la structure en même temps dans des zones proches mérite d'être considérée.
- Les deux principaux morceaux de pneu trouvés sur la piste ont les particularités suivantes:
 - Ils s'emboîtent parfaitement, et sont donc limitrophes sur le pneu,
 - Ils ont été retrouvés près l'un de l'autreOn peut donc estimer qu'ils ont subi les mêmes événements et qu'ils ont eu des trajectoires semblables.
- L'hypothèse de deux impacts est assez cohérente avec les deux hypothèses d'initiation de la rupture évoquées § 1.3:
 - Une initiation de la rupture le long du segment AB sur le schéma de la page 2, correspondant à un des chocs (shot B sur le schéma ci-dessous)
 - Une déformation des raidisseurs selon le segment BC correspondant à l'autre choc (shot A)
- Une étude a été menée dans ce sens en supposant un premier impact au point A avec le morceau de 4.45 kg suivi d'un deuxième au point B avec le morceau de 2.6kg très légèrement décalé dans le temps (2 ms)
On y voit clairement que les effets peuvent se superposer suivant une loi qui dépendra de la séquence et de l'emplacement des impacts.



	1 débris 4.45 kg	1 débris 2.6 kg	2 débris 4.45 + 2.6 kg
Déformation maximale en Mode 2	10 mm	5 mm	12 mm
Coefficient d'allongement en Mode 2	100 %	39 %	117 %

- Les effets des deux impacts se combinent suivant une loi difficile à appréhender, fonction de la position des impacts, de leurs attitudes et de leur chronologie.

Conclusions

- Les pièces retrouvées après l'accident sont très partielles, et aucune trace d'impact de pneu n'a pu être mise en évidence. Dans ces conditions, il n'est pas possible de décrire et de prouver de manière absolue un scénario de destruction de la structure.
- Cependant le scénario d'une rupture par la succession d'un choc primaire mode1, de mouvement de carburant dans le réservoir aboutissant à une rupture en mode 2 dans une zone moins résistante est vraisemblable.
- De très nombreuses études théoriques et essais sur caissons et éprouvettes ont été développés sur des sujets particulièrement inédits et faisant appel à des techniques à la limite de l'état de l'art, ce qui s'est traduit par une progression pas toujours régulière des travaux.
- Ils valident cependant bien la physique générale du phénomène, et tendent à montrer qu'il a fallu focaliser un niveau important d'énergie dans la zone de rupture.
- Cette focalisation d'énergie dépend des conditions de l'impact, sur lesquelles on ne peut faire que des hypothèses. Les axes à privilégier semblent être les suivants:
 - Une vitesse plus importante du morceau de pneu.
 - L'attitude du projectile et la position de l'impact qui peut se révéler localement plus endommageant.
 - Une fragilisation de la zone suite à l'impact primaire, facilitant par la suite une destruction en mode 2
 - Plusieurs impacts quasi simultanés apportant plus d'énergie dans le système.

Une combinaison plausible de ces quatre axes est de nature à expliquer une rupture selon le scénario du mode 2 lors de l'accident.



ANNEXE 1: Etudes théoriques

OUTIL RADIOSS ET EXPERIENCES ANTERIEURES

Crashworthiness for commercial aircraft : drop test simulations

J.L. LEGROS, C. BRAND
Aerospatiale Aeronautique
Technical note 436.0031/96
March 1996

Choc à l'oiseau sur structures aéronautiques - phase 2

M. MAHE
Aerospatiale Aeronautique
Technical note 530.0103/97
September 1997

RADIOSS THEORY MANUAL. Version 4.2

July 2000. Mecalog.

CONCORDE STUDIES

Concorde wing tank structure impact justification.

M. MAHE, F. GAIBLE,
Technical note 530.0192/01

Radioss: Test-simulation correlation without failure.

M. MAHE, F. GAIBLE,
Technical note 530.0196/01

Radioss: Test-simulation correlation up to failure.

M. MAHE, F. GAIBLE,
Technical note 530.0197/01

Gonesse accident - Structure failure study.

M. MAHE, F. GAIBLE,
Technical note 530.0199/01

ANNEXE 2: Essais sur caissons et éprouvettes

Tank specimen NZG tyre impact test program

P. GADET
EADS Airbus
Technical note 581.0178/2001
May 2001

Tank specimen stiff debris impact test program

P. GADET
EADS Airbus
Technical note 581.0179/2001
June 2001

Tyre impact on aircraft panel - test program

P. GADET
Test program 577.0030/2001,
July 2001

Etude du comportement dynamique de réservoir soumis à un impact de pneumatique

Partie 1 : première campagne d'essais
J.P. BOSCH
CEAT
S00/6508000 P1
Mars 2001

Etude du comportement dynamique de réservoir

Partie 3 : Deuxième campagne d'essais d'impact de pneumatique (NZG)
J.P. BOSCH
CEAT
S00/6508000 P3
Mars 2001

Etude du comportement dynamique de réservoir

Partie 4 : Impact sur panneau avion
J.P. BOSCH
CEAT
S00/6508000 P4
Juillet 2001