

LA FIN DU VOL MH370 : UN AMERRISSAGE FORCÉ, ÉTUDE DU FLAPERON HEURTANT LA SURFACE DE LA MER

par Argiris Kamoulakos, Jean-Luc Marchand, Philippe Gasser, Michel Delarche et Jean-Marc Garot, membres de l'équipe CAPTIO¹

INTRODUCTION

La Lettre 3AF n°33 a publié le 5 novembre 2018 *L'Énigme du vol MH370 de la Malaysia Airline*, un point de vue de Jean-Marc Garot, membre de la 3AF, fondé sur le travail de l'équipe CAPTIO.

Le scénario plausible de CAPTIO est le suivant : Une trajectoire très sophistiquée a été suivie dans le but de détourner le MH370 mais cette opération est allée à l'échec à cause d'une mauvaise estimation de l'autonomie de l'avion due à la surconsommation d'un moteur et à l'incertitude sur la consommation de carburant qu'entraîne un vol à basse altitude (effectué au sud de Sumatra). Ceci a contraint les personnes aux commandes à une tentative d'amerrissage forcé près leur destination : Christmas Island.

Une très petite quantité de débris a été récupérée sur les côtes de l'océan Indien, en Afrique, à l'île Maurice et à l'île de La Réunion. Seuls trois débris ont été formellement identifiés : le flaperon droit, la partie intérieure du volet droit extérieur et le bord arrière du volet extérieur gauche.

Le flaperon droit, récupéré à l'île de La Réunion, a été transmis à un laboratoire de la Délégation Générale à l'Armement (DGA) et y est encore du fait de l'enquête judiciaire française, toujours en cours. Par contre, une étude structurelle, faite par ce laboratoire, a été incorporée dans le rapport final d'investigation publié par les autorités malaisiennes en Juillet 2018 ([http://mh370.mot.gov.my/Appendix-1.12A-2-Item1Flaperon\(Main\).pdf](http://mh370.mot.gov.my/Appendix-1.12A-2-Item1Flaperon(Main).pdf)).

C'est le seul débris, parmi les trois identifiés, qui ait fait l'objet d'une analyse.

Argiris Kamoulakos a rejoint l'équipe CAPTIO. Argiris détient un doctorat en Ingénierie Aéronautique (spécialisé en structure) délivré par l'Imperial College de Londres. Il a une grande expertise de l'analyse numérique et de la simulation (prototypage virtuel) dans le domaine de l'aérospatiale et de la défense. Il est *Chartered Engineer*, *Fellow* de la *Royal Aeronautical Society (RAeS)* et *"Associate Fellow"* de l'*American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)*.

Le travail qu'il fait, comme les autres membres de l'équipe CAPTIO, est bénévole. Il est Directeur Scientifique chez ESI Group (<https://www.esi-group.com/fr>) et son travail personnel n'implique aucunement le groupe ESI. Par contre, il faut remercier le Dr Chaillou, administrateur et directeur général délégué, pour lui avoir donné accès gratuitement aux outils et aux moyens informatiques puissants du groupe ESI.

Cet article présente le résultat du travail unique fait par Argiris Kamoulakos : c'est-à-dire l'étude de l'amerrissage forcé à l'aide de simulations numériques dynamiques fondées sur les méthodes des Eléments Finis pour simuler les structures et de Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) pour simuler le flux de fluides. Il conclut que c'est un amerrissage forcé qui aurait pu entraîner la perte du bord de fuite du flaperon, tandis qu'une perte en vol du flaperon entraînerait très probablement d'autres types de dommages que ceux visibles sur le flaperon.

Les résultats de cette analyse convergent avec les conclusions du rapport d'enquête des experts de la DGA et donnent du crédit à l'hypothèse d'un amerrissage forcé lors des derniers instants de l'avion disparu.

Il est à noter que, pour conduire les travaux présentés dans le présent document, CAPTIO n'avait pas accès à la description constructeur des caractéristiques géométriques et matérielles du flaperon puisqu'elles appartiennent à la société BOEING. Les modèles sont fondés sur les données limitées mais disponibles dans le rapport de la DGA.

Toutefois, l'ensemble de ces données a été jugé raisonnablement représentatif des attributs essentiels du flaperon afin de produire une analyse convaincante de l'ordre de grandeur du problème en question.

Au delà du cas du MH370, ces travaux montrent les capacités des simulations d'aujourd'hui qui ont été, notamment, développées dans le cadre de programmes de recherches européens.

¹ <http://mh370-captio.net/>

LE FLAPERON

La photo, parmi tant d'autres, la plus parlante du flaperon tel que récupéré sur l'île de la Réunion ci-dessous dans la figure 1, au moment où il a été transféré pour enquête.



Fig. 1 Flaperon récupéré par les autorités françaises à l'île de La Réunion

La partie importante est la partie manquante du bord de fuite (mise en évidence par CAPTIO dans la figure 1). La conclusion du rapport français est qu'un processus d'amerrissage forcé est la cause la plus probable et non une séparation en vol suivie d'une chute libre avec impact sur la mer. Cependant, aucune simulation numérique n'avait été faite pour soutenir cette allégation.

STRATÉGIE DE MODÉLISATION DE L'AMERRISSAGE FORCÉ

L'amerrissage implique une interaction fluide-structure avec de grands changements de topologie du fluide à la suite de la création d'ondes lors de la pénétration de la structure dans l'eau. La façon la plus adéquate de simuler l'amerrissage forcé est de modéliser le fluide avec la méthode des particules afin de modéliser de grands changements topologiques ainsi que le mélange, c'est-à-dire des phénomènes qui sont très difficiles à modéliser par la méthode traditionnelle des Eléments Finis (FE). La méthode des particules qui a été utilisée pour modéliser le fluide (la mer) est la méthode Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) (« Tsunami induced Flooding Simulation and associated Fluid-Structure Interaction using the ESI Group VPS suite of codes. » <http://app.iahr2015.info/spreker/10985>). Voir la figure 2 pour les concepts de base.

Afin de choisir le pas de discrétisation appropriée du domaine des fluides pour l'amerrissage forcé, une étude systématique de l'indice de référence Von-Karman Wedge a été effectuée (benchmark). Le dimensionnement du problème est présenté dans la figure 3 ci-dessous correspondant à un coin infini de 120 degrés heurtant verticalement un domaine semi-infini de fluide.

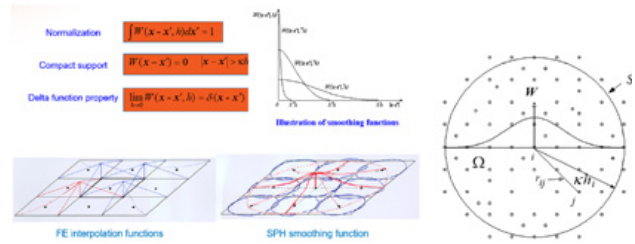


Fig. 2 Principes des idéalizations SPH par rapport aux FE

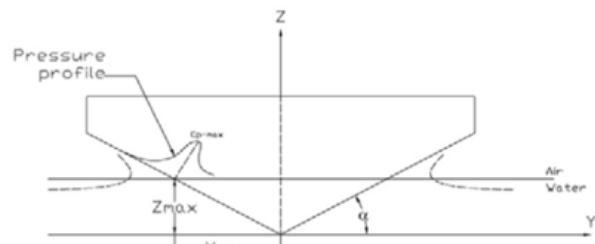


Fig. 3 Définition de la couverture Von-Karman

Le choix de 120 degrés implique le choix d'un angle de 30 degrés de la forme du coin externe par rapport à l'eau, correspondant à l'hypothèse d'un flaperon incliné à 30 degrés de sa position neutre.

Le problème est essentiellement 2D (sur les axes Y et Z) car la troisième dimension (axe X) qui part à l'infini est auto-similaire, d'où le problème correspond à la classe de « déformations planes » problèmes, qui est zéro déplacement en X.

Les simulations ont été effectuées à l'aide du code dynamique transitoire explicite VPS (PAMCRASH) du groupe ESI (<https://www.esi-group.com/fr/pam-crash>) et en utilisant l'option 2D du modèle SPH. La modélisation du matériau « eau » nécessite une équation d'état appropriée (en anglais Equation Of State EOS). Traditionnellement une EOS polynomiale est utilisée pour des impacts dans l'eau mais parce que, dans le cas d'un amerrissage forcé (pour les vitesses qui nous intéressent), la compressibilité de l'eau est très faible, il est plus efficace d'adopter le Murnahan-Tait EOS (voir ci-dessous),

$$p = p_0 + B \cdot ((\rho / \rho_0)^\gamma - 1)$$

Ceci permet des intervalles temporels relativement grands grâce à l'utilisation d'une valeur judicieuse de la vitesse du son (d'un ordre 10 fois supérieur à la vitesse maximale prévue de l'eau, induite par les éclaboussures).

Le coin a été analysé pendant la pénétration d'une surface d'eau parfaitement plane à une vitesse verticale constante donnée (10 m/sec). Les résultats caractéristiques obtenus pour le champ vectoriel d'écoulement

SCIENCES ET TECHNIQUES AEROSPATIALES

LA FIN DU VOL MH370 : UN AMERRISSAGE FORCÉ, ÉTUDE DU FLAPERON HEURTANT LA SURFACE DE LA MER

des flux dans le domaine segmenté choisi sont illustrés figure 4 ci-dessous.

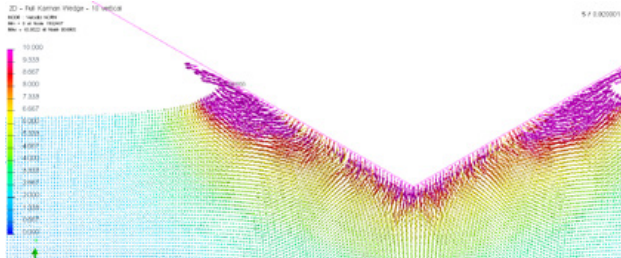


Fig. 4 Champ vectoriel d'écoulement des flux pour un coin de type Von-Karman Wedge pénétrant de haut en bas dans l'eau

De même, la force totale de réaction verticale appliquée sur le coin en fonction de la pénétration de l'eau est indiquée dans la figure 5 ci-dessous en comparaison à la prédiction de la théorie Von-Karman (adaptée à une vitesse verticale constante et intégrant la « correction de Wagner »).

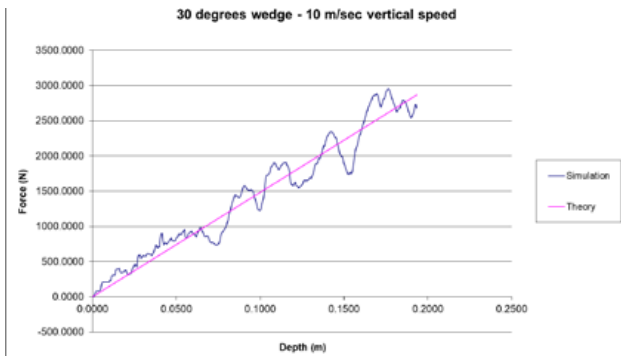


Fig. 5 Comparaison de la simulation de la force verticale résultante de Von-Karman Wedge par rapport à la théorie (l'amplitude de la force n'est pas pertinente, seule la forme de la courbe importe)

La comparaison ci-dessus étant très satisfaisante, la granularité associée à cette modélisation numérique SPH ainsi que la caractérisation du matériel utilisée pour l'eau ont été adoptées et figées pour être utilisées dans l'analyse ultérieure du flaperon lui-même.

SIMULATION DE L'AMERRISSAGE GUIDÉ D'UN FLAPERON COMME UN CORPS RIGIDE EN 2D ET 3D

Puisque la géométrie de la surface inférieure du flaperon correspond à la moitié d'un coin de Von Karman, il a donc été possible d'en déduire le modèle 2D d'une plaque rigide inclinée à 30 degrés.

Le modèle a été utilisé pour une analyse d'un scénario d'amerrissage guidé avec une vitesse horizontale constante de 68,42 m/sec (153 milles/heure) et une vitesse verticale

de 2,54 m/sec (500 pieds/min) et avec la granularité SPH choisie dans la section précédente. La figure 6 ci-dessous illustre un instantané typique de la simulation.

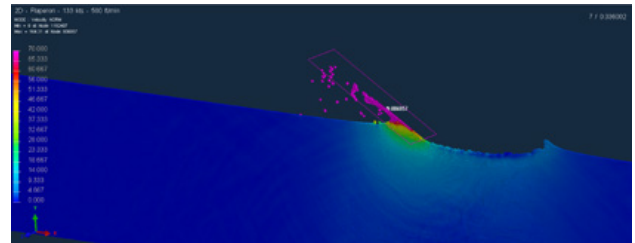


Fig. 6 Contours de vitesse de la simulation d'amerrissage 2D SPH de la plaque à 30 degrés

La force de pression sur le flaperon due à l'amerrissage forcé a été calculée comme la force résultante provenant du contact entre la plaque et le liquide. L'évolution temporelle de cette force a ainsi été obtenue, de même que le moment correspondant de flexion sur la zone où le bord de fuite du flaperon s'est rompu.

Grace au rapport du laboratoire de la Délégation Générale à l'Armement (DGA), il a été possible d'extraire les caractéristiques géométriques du flaperon (épaisseur de la peau porteuse de charge, etc.).

Les valeurs d'équilibre de contrainte en fonction de l'épaisseur de l'endroit où le bord de fuite s'est rompu ont été évaluées (voir Figure 7) montrant des niveaux élevés irréalistes fournissant ainsi une première indication que la section se briserait dans ces conditions.

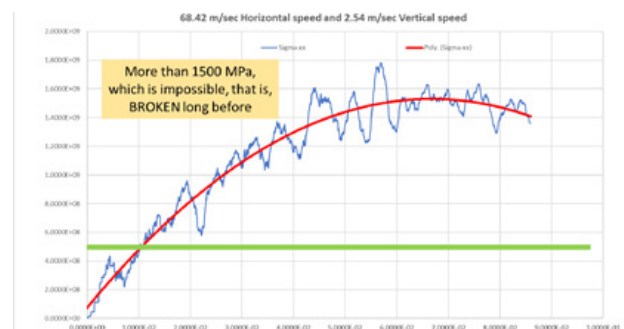


Fig. 7 Évolution temporelle directe du stress de la peau à la section où le flaperon s'est brisé

Cependant, cette analyse 2D sur une plaque infinie ne donne qu'un ordre de grandeur du problème et surestime les dégâts d'un amerrissage forcé. Elle ne prend pas en compte la réduction de pression inhérente au flux d'évacuation latérale de l'eau provenant des effets de bord puisque le flaperon est en réalité un corps fini.

SCIENCES ET TECHNIQUES AEROSPATIALES

LA FIN DU VOL MH370 : UN AMERRISSAGE FORCÉ, ÉTUDE DU FLAPERON HEURTANT LA SURFACE DE LA MER

L'étape suivante a permis d'évaluer le comportement d'un modèle de flaperon rigide complet en 3D lors d'un scénario d'amerrissage 3D lui aussi complet. La figure 8 donne un instantané de l'amerrissage forcé du flaperon rigide 3D. La Figure 9 montre une vue détaillée des éclaboussures durant l'impact.

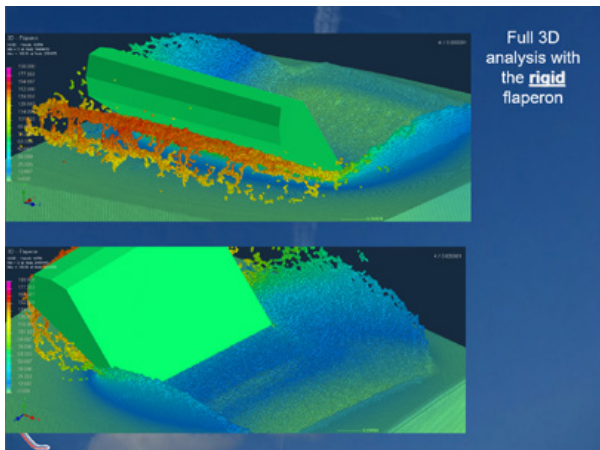


Fig. 8 Simulation d'amerrissage par SPH du flaperon rigide 3D

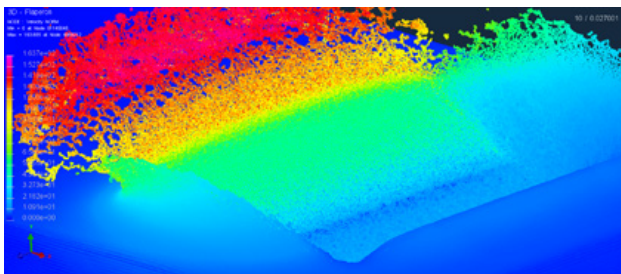


Fig. 9 Détail des contours de la vitesse de l'eau dans la simulation d'amerrissage forcé SPH

Les forces obtenues induites par la pression résultante ont eu la même évolution globale que dans le cas 2D mais avec une réduction de 25% par rapport à celui-ci. Cela ne change toutefois pas la conclusion globale que le flaperon connaîtrait des contraintes très élevées dans cette zone.

L'amerrissage violent d'un corps rigide implique en général (aux premiers stades) des impulsions de pression très élevées de courte durée qui sont causées par des sautes de stress lors de l'impact avant que ne soit établi un flux de Bernoulli (décuplé à l'interface de contact puisque le corps est rigide; à la limite de la condition faible de Shock-Hugoniot). Dans le cas d'une structure flexible, les contraintes associées provoqueraient des dommages certains ou déclencheraient de grandes déformations locales. Étant donné que le flaperon n'est pas une structure rigide, loin s'en faut, l'étude doit se poursuivre en considérant l'amerrissage entièrement en 3D comme

discuté ci-dessus mais avec un modèle élastique de flaperon. L'étude couvrira donc aussi les dommages et la défaillance causés au flaperon.

SIMULATION DE L'AMERRISSAGE GUIDÉ D'UN FLAPERON ÉLASTIQUE EN 3D

L'annexe 1.12A-2 du rapport d'analyse de la DGA fournit les caractéristiques géométriques et matérielles du flaperon. Il y est clairement noté que la peau extérieure (supérieure et inférieure) du flaperon est composée de deux stratifiés composites séparés par un noyau en nid d'abeilles. Chaque stratifié est composé de trois couches de matériau collées dont les laies sont croisées et orientées à +/-45, 0/90 et de +/-45 degrés entre eux comme indiqué dans la figure 10 ci-dessous.

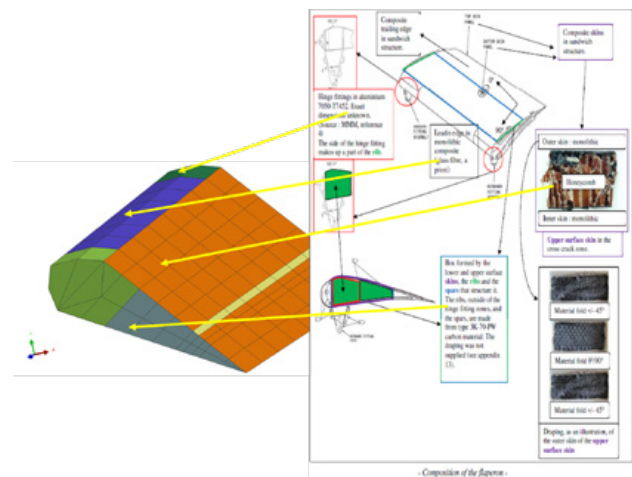


Fig. 10 Informations de modélisation du flaperon élastique 3D

La modélisation d'une telle structure s'appuie sur l'utilisation de la méthode des Éléments Finis appliqués à une coque 3D en matériaux composites. L'option avancée dans le code VPS pour une coque multi matériau multicouches a été utilisée, ce qui permet de mélanger différentes couches avec des propriétés matérielles différentes et avec différentes orientations dans leur superposition.

Le rapport de la DGA mentionne uniquement le composite 3K-70-PW comme composant du flaperon, il n'y a pas d'autre solution que d'utiliser ce matériau pour l'analyse qui suit.

Comme ce même rapport ne fournit aucune donnée matérielle explicite sur ce composite, les propriétés typiques du composite 3K-70-PW ont donc été obtenues à partir du rapport AGATE de la NASA comme le montre la figure 11.

LA FIN DU VOL MH370 : UN AMERRISSAGE FORCÉ, ÉTUDE DU FLAPERON HEURTANT LA SURFACE DE LA MER



B – Basis Design Allowables for Epoxy – Based Prepreg

Fiberite Plain Weave Graphite Fabric T650 3K-70-PW / 7740

AGATE-WP3.3-033051-100

September 2001

J. Tomblin, J. McKenna, Y. Ng, K. S. Raju
National Institute for Aviation Research
Wechs State University
Wechs, MS 39290-0000

Fabric 3K-70-PW

Resin Content [%] **38 %**
Average Fiber Density **1.778 g/cc**
Average Resin Density **1.27 g/ccm**

Average Ply density **1.585 g/ccm**

Ply thickness **0.2 mm**

0 / 90 degree modulus **~69 GPa**
(tension/compression)

Failure strain **~1.3%**
(tension/compression)

Shear modulus **~4 GPa**
"yield strain" **~2%**

Failure strain **~10%**
Shear Strength **~96 MPa**

Fig. 11 Détails des caractéristiques du matériau constituant les couches du composite

La figure 11 montre que chaque couche a des propriétés qui, en termes de rigidité axiale (pas de rupture) au niveau stratifié, correspondent à peu près à un «black aluminium».

Les propriétés d'endommagement et de ruine ont été estimées afin de correspondre aux caractéristiques du matériau ci-dessus et ont été introduites dans le modèle de matériau composite biphasique du VPS.

Le bord de fuite du flaperon, c'est-à-dire la zone située entre la section du longeron où la rupture du flaperon s'est produite et l'extrémité arrière du flaperon, est supposé être rempli par un nid d'abeilles. Cette information provient de la similitude de conception entre les bords de fuite d'un flaperon, d'un volet ou d'un aileron lors de la conception d'une aile. Cela augmente la rigidité transversale en épaisseur car l'enveloppe est très mince et flexible et que le bord de fuite se termine par un coin effilé. Cela a été modélisé de manière indirecte en utilisant judicieusement l'option « auto-contact » du VPS avec une épaisseur de contact variable, initialement ajustée automatiquement par le VPS pour être assez grande afin de garder séparées les surfaces supérieures et inférieures. De cette façon, il n'y a pas besoin de modéliser le nid d'abeilles lui-même qui aurait exigé beaucoup d'efforts et aurait pénalisé les calculs pour un gain discutable, si ce n'est de fournir une rigidité à travers l'épaisseur.

Le flaperon a donc été analysé dans le scénario d'amerrissage en 3D complet décrit précédemment, mais en utilisant le modèle élastique avec la modélisation des dommages matériels caractérisés ci-dessus. Le résultat est illustré dans la figure 12 et la fracture du bord de fuite juste au-delà de l'extrémité du longeron de bord de fuite est clairement visible.

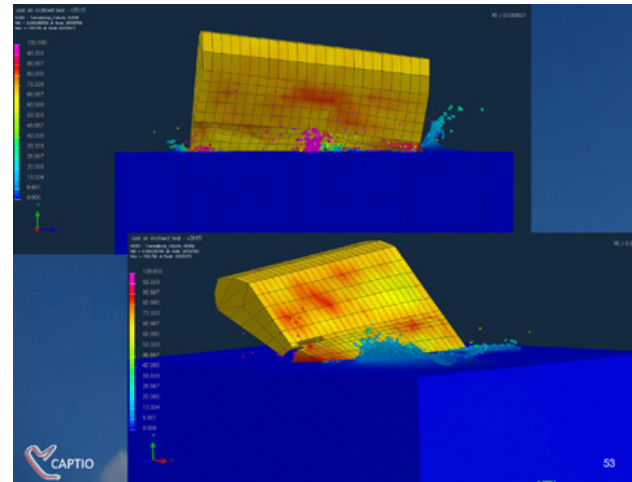


Fig. 12 Simulation d'amerrissage forcé du flaperon élastique 3D

Ce résultat a été systématiquement reproduit avec de légères variations dans les propriétés du matériau ainsi que dans le cas extrême, de la simulation d'une feuille d'aluminium équivalente («black aluminium»); une déformation plastique local et très forte se produit toujours à l'arrière du longeron de bord de fuite du flaperon.

Une des simulations a permis de mieux entrevoir la façon de se déformer et de rompre du matériau. Il est apparu qu'une rupture par tension a semblé se produire simultanément sur l'enveloppe supérieure et l'enveloppe inférieure du flaperon à l'arrière du longeron de bord de fuite. Il semble que la présence du remplissage en structure de nid d'abeilles du bord de fuite (son effet a été modélisé comme une variable « auto-contact ») a permis la transmission des forces de pression d'amerrissage de l'enveloppe inférieure à l'enveloppe supérieure du flaperon au moment de l'impact sur l'eau.

Du point de vue de la simulation, la façon de rompre de l'enveloppe du flaperon à proximité du longeron de bord de fuite devient plus locale, si l'on tient compte du fait que la peau n'est pas reliée au longeron par une soudure continue mais par des attaches ponctuelles (vis). Les trous associés sont des concentrateurs de contraintes, les dommages locaux sous tension peuvent être plus élevés dans leur voisinage pour un même stress exercé à distance. Pour éviter de modéliser explicitement ces trous, ils peuvent être émulés en réduisant le volume des éléments finis localement dimensionnés grossièrement qui les englobent et/ou en abaissant les seuils de dégâts qui leur sont associés. La pré-contrainte des vis est, bien sûr, une variable supplémentaire, très difficile à quantifier dans la réalité, mais, à l'impact, elle ne modifiera pas la présence d'une concentration locale du stress.

SIMULATION DE L'AMERRISSAGE D'UN FLAPERON ÉLASTIQUE EN 3D EN CHUTE LIBRE

Nos scénarios de simulation ont été inspirés par le travail effectué par la DGA. Dans son rapport, il a été spéculé que l'amerrissage forcé du flaperon aurait pu entraîner une rupture sur bord de fuite tandis qu'une chute libre aurait montré un premier impact plutôt sur le bord d'attaque.

Pour le cas de chute libre, les forces aérodynamiques (portance et traînée) et la force de gravité ont été prises en compte pour calculer l'évolution de la portée, de la vitesse et de l'angle de trajectoire de vol du flaperon avec un angle d'attaque monotone pratiquement nul. Comme mentionné dans le rapport de la DGA, le Centre de Gravité (CG) du flaperon est bien sur l'avant de son centroïde. La force de gravité aurait donc tendance à produire un moment de tangage vers le bas tandis que la forme de traînée agirait plus en arrière. De ce fait, le scénario privilégié est une descente monotone le nez en bas avec un impact dans l'eau le bord d'attaque en premier.

Les équations de base du mouvement, en l'absence de poussée, ont été écrites en termes de directions longitudinales (suivant la corde) et normales (suivant l'épaisseur) du flaperon, en supposant un certain angle de trajectoire de vol « alpha ». L'équilibre longitudinal inclut la traînée et la projection de poids correspondante du flaperon, tandis que la direction normale inclut la portance et la projection de poids correspondante due à l'angle « alpha ». Les accélérations longitudinales et normales peuvent être calculées et intégrées dans le temps. Les incréments de vitesse correspondants sont ensuite obtenus, puis on effectue la mise à jour de l'angle de trajectoire de vol « alpha » et la mise à jour des vitesses horizontale et verticale correspondantes qui, grâce à une intégration plus poussée dans le temps, donnent la portée et l'altitude à chaque itération.

En supposant un détachement à 5000 pieds et à 400 km/heure en vitesse longitudinale avec une masse de 50 kg, et en utilisant les propriétés sectionnelles du programme FoilSim de la NASA, le scénario décrit ci-dessus donne une vitesse terminale (vitesse d'impact) de 38 m/sec (137 km/heure), avec un angle de 50 degrés en piqué du nez. Le flaperon percuterait l'eau après 60 secondes de vol libre à une portée de 1626 mètres.

Le flaperon a été simulé percutant la mer dans les conditions calculées ci-dessus et les résultats sont illustrés par la figure 13.

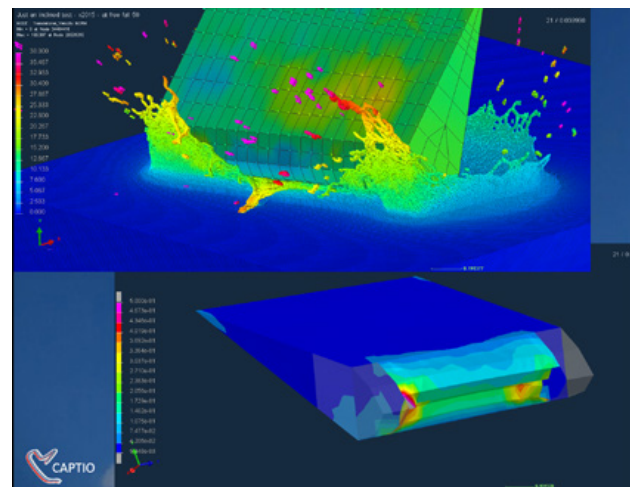


Fig. 13 Simulation de l'impact sur la mer du flaperon élastique dans l'hypothèse d'une chute libre

Il est clairement visible d'après la Figure 13 que, dans un tel scénario de choc avec l'eau, le bord d'attaque du flaperon serait très probablement victime de dommages locaux et de rupture et qui ne sont pas ceux que l'on voit sur la photo du flaperon.

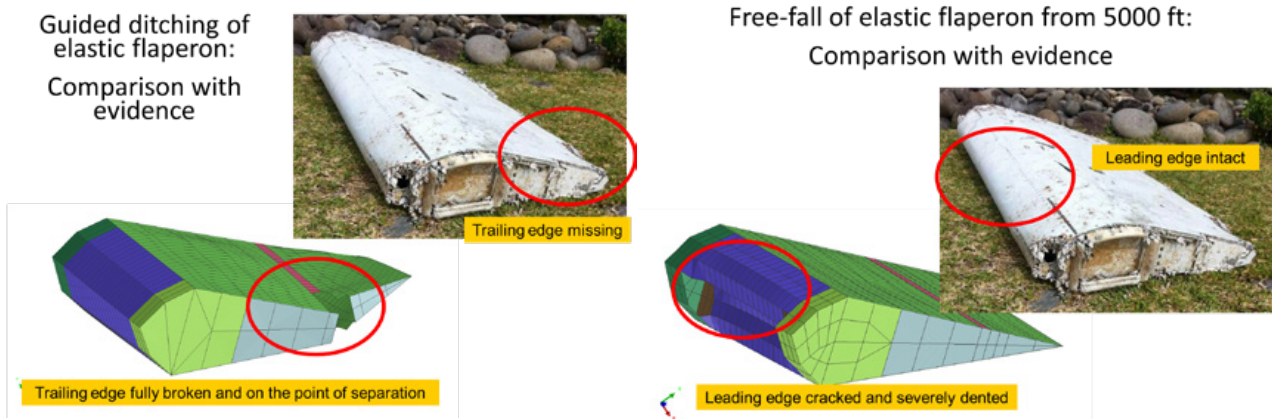


Figure 14 Comparaison des conséquences sur un flaperon élastique entre un amerrissage forcé et un impact avec la mer après chute libre

SCIENCES ET TECHNIQUES AEROSPATIALES

LA FIN DU VOL MH370 : UN AMERRISSAGE FORCÉ, ÉTUDE DU FLAPERON HEURTANT LA SURFACE DE LA MER

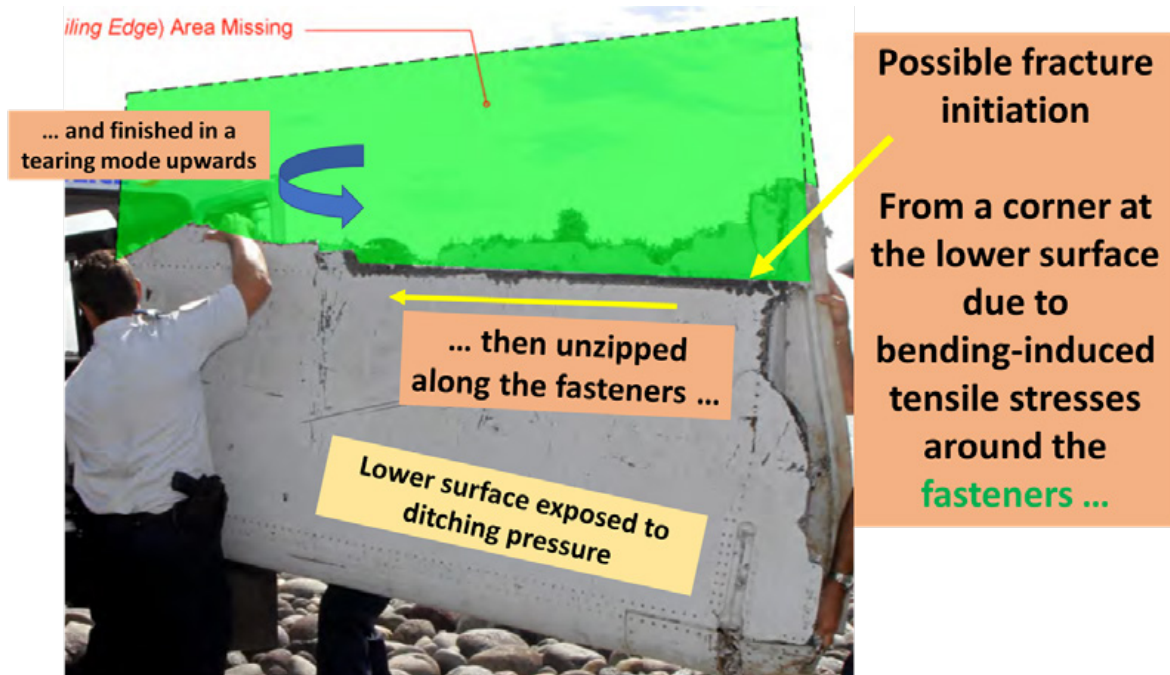


Fig. 15 Scénario possible pour la rupture du bord de fuite du flaperon

DISCUSSION DES RÉSULTATS

La comparaison entre l'amerrissage guidé et les scénarios de chute libre en termes de dommages au flaperon est montrée par la figure 14.

Il est clairement visible que seul l'amerrissage guidé (ou un scénario du même genre) produit des dommages et une rupture sur le bord de fuite, tandis qu'un scénario de chute libre, selon les hypothèses du rapport de la DGA, privilégie davantage des dommages localisés proches du bord d'attaque.

CONCLUSION

L'analyse du flaperon par CAPTIO présentée dans ce document montre que la cause la plus probable de la séparation de son bord de fuite penche en faveur d'un scénario d'amerrissage forcé, c'est-à-dire que le flaperon était toujours attaché à l'aile de l'avion jusqu'à l'impact avec la mer et qu'il ne s'était pas détaché en vol.

Ceci est en accord la conclusion du rapport de la DGA.

Le mécanisme qui a permis à l'eau de mer de percuter le flaperon de manière à créer ce type de dommages ainsi que l'éventuelle libération totale du flaperon de l'aile est actuellement à l'étude par CAPTIO et sera présenté dans une publication ultérieure.

En ce qui concerne le scénario de défaillance du bord de fuite du flaperon, la figure 15 présente le résultat le plus clair de cette enquête. ■