

# Paramétrage de formes pour l'optimisation en crash de pièces de structures minces

Projet de Fin d'Etudes

- SOUSA DE PAULA/André
- 3A – Matériaux Structuraux
- Année universitaire 2013/2014
  
- Suivis entreprise : Frédéric MERCIER /  
Laurent GENEST
- Suivi ENSICAEN : Sophie EVE



Une grande école pour réussir



## REMERCIEMENTS

Je remercie premièrement à Dieu pour l'opportunité de faire un échange si productif. Avec le soutien de l'ENSICAEN et les excellentes conditions données pour Renault pour faire le stage de fin d'études. Je suis passionné pour les automobiles, et cette expérience c'était vraiment génial.

Je voudrai remercier mes tuteurs, Frédéric MERCIER e Laurent GENEST pour m'avoir donné l'opportunité d'intégrer l'équipe d'Optimisation et Méthodes de Simulation Numérique au sein du Technocentre Renault avec un sujet de stage enthousiasmant.

Pour finir, je souhaite remercier vivement toute l'équipe Optimisation et Méthodes de Simulation Numérique ainsi que le personnel d'EuroDécision pour son très bon accueil et sa convivialité.

# SOMMAIRE

|   |    |
|---|----|
| <i>Remerciements</i> .....  | 1  |
| <i>1. Présentation de l'entreprise</i> .....                            | 3  |
| 1.1. Bref historique.....   | 3  |
| 1.2. Le Groupe (Alliance, Marques.....)                                 | 4  |
| 1.3. Le Technocentre.....   | 5  |
| <i>2. Présentation de l'équipe</i> .....                                | 6  |
| 2.1. Présentation de l'unité Optimisation.....                          | 6  |
| 2.2. Présentation des acteurs.....                                      | 6  |
| <i>3. Introduction</i> .....  | 7  |
| 3.1. Introduction au Crash.....   | 7  |
| 3.2. Modèles de Chocs frontaux.....                                     | 8  |
| <i>4. Présentation du sujet</i> .....                                   | 9  |
| 4.1. Sujet de stage.....  | 9  |
| 4.2. Présentation du longeron.....                                      | 10 |
| 4.3. Présentation du comportement souhaité et des triggers.....         | 11 |
| 4.4. Spécification du problème.....                                     | 12 |
| <i>5. Révision bibliographique</i> .....                                | 13 |
| 5.1. Etudes précédentes.....  | 13 |
| 5.1.1. Caractérisation du procédé d'emboutissage.....                   | 13 |
| 5.1.2. Morphing.....  | 15 |
| 5.2. Equations analytiques.....   | 15 |
| 5.2.1. Optimisation du comportement en compression des corps creux..... | 15 |
| 5.2.2. Mode de Flambage Elastique.....                                  | 16 |
| <i>6.1 Méthodes et résultats</i> .....                                  | 17 |
| 6.1. Présentation des méthodes utilisées.....                           | 17 |
| 6.2. Méthode analytique.....  | 18 |
| 6.3. Méthode d'optimisation.....  | 20 |
| 6.4. Méthode de l'emboutissage inverse.....                             | 22 |
| 6.5. Méthode vibratoire.....  | 23 |
| <i>7. Conclusion et futurs travaux</i> .....                            | 32 |
| <i>Références</i> .....   | 33 |
| <i>Références des Images</i> .....                                      | 34 |
| <i>Annexes</i> .....  | 35 |
| 1) La Méthode De L'intégration Explicit.....                            | 35 |
| 2) Nuage De Points Et Loi De Pareto.....                                | 37 |
| <i>Resumé / Abstract</i> .....  | 39 |

# 1. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

## 1.1. BREF HISTORIQUE

En 1898, le premier modèle de la marque Renault fut fabriqué, dérivé d'un tricycle De Dion-Bouton et transformé en voiturette à 4 roues (Figure 1). Louis Renault a équipé son véhicule avec une invention originale pour l'époque, une boîte de vitesse en prise directe. La fondation de la société Renault Frères remonte au 1<sup>er</sup> octobre de 1898 et fut officiellement créée pour l'association de Louis, Marcel et Fernand Renault le 25 février de 1899 à Boulogne-Billancourt.

Les frères Renault reconnaissent très tôt la publicité que la société pouvait tirer de la participation aux courses automobiles et engagèrent dans des courses sur route. En 1906, la Renault AK de 90 CV participe au premier Grand Prix.

En 1914, lorsqu'éclate la guerre, l'entreprise fabrique de nombreux véhicules militaires, camions, ambulances et chars. Renault est devenu le premier manufacturier privé de France et il fut honoré par les Alliés pour sa contribution à l'effort de guerre.



**Figure 1 - La voiturette à 4 roues**

Au sortir de la guerre, Louis Renault diversifie encore plus en se lançant dans la machinerie agricole et industrielle. Après 1920, les modèles de Renault vont des petites automobiles aux poids-lourds et l'emblème Renault, d'abord de forme circulaire, devient le losange actuel en 1925. L'usine de Boulogne-Billancourt démarre en 1929 malgré un climat social dégradé et l'entreprise comprime les coûts pour résister à la crise économique

Pendant la seconde guerre mondiale Louis Renault se plie aux exigences des Allemands par considérer le conflit une erreur. A la libération en 1944, Louis Renault est arrêté et meurt en prison comme collaborateur. L'entreprise est nationalisée en 1945 et devient la régie Nationale des Usines Renault (RNUR).



**Figure 2 - Véhicule de F1 équipe Renault**

Grace à une modernisation des usines par la régie, la petite 4 CV à moteur arrière relança la compagnie dès 1946. La régie enrichit sa gamme et continue parallèlement une progression impressionnante en rallye. La croissance se poursuit jusqu'au début des années 80. La marque s'impose dans la compétition sportive et fait son entrée en Formule 1.

Renault envisage une fusion avec Volvo, mais le projet est abandonné en 1993. En 1996, Renault est

privatisé et entre dans le capital de Nissan en 1999. L'Alliance Renault-Nissan se consolide et permet les rachats de Samsung Motors et Dacia.

Carlos Ghosn, président de Nissan, succède à Louis Schweitzer à la tête de Renault en 2005 et met en place le plan Renault Contrat 2009, qui doit positionner le groupe comme le constructeur européen le plus rentable.

En 2011, après Renault avoir multiplié ses initiatives, les premiers véhicules électriques accessibles à tous comme Kangoo Z.E. et Fluence Z.E. sont lancés suivis de Twizy et ZOE (Figure 3).



Figure 3 - Renault ZOE

## 1.2. LE GROUPE

Renault est un groupe international qui a vendu en 2013 plus de 2,6 millions de véhicules dans le monde. Il s'appuie en particulier sur la complémentarité de ses marques : Renault en tant que marque globale, Dacia en tant que marque régionale et Renault Samsung Motors en tant que marque locale. L'Alliance Renault-Nissan est le 4<sup>e</sup> groupe automobile mondial.

Créée en 1999, l'Alliance Renault-Nissan est à ce jour le partenariat transnational entre deux grands constructeurs le plus durablement installé de l'industrie automobile. Ce partenariat unique est un modèle souple et pragmatique qui peut être étendu à de nouveaux projets et à de nouveaux partenaires à l'échelle mondiale.

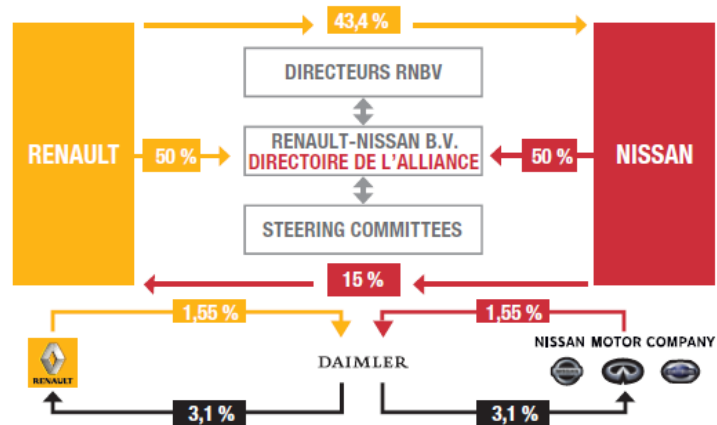


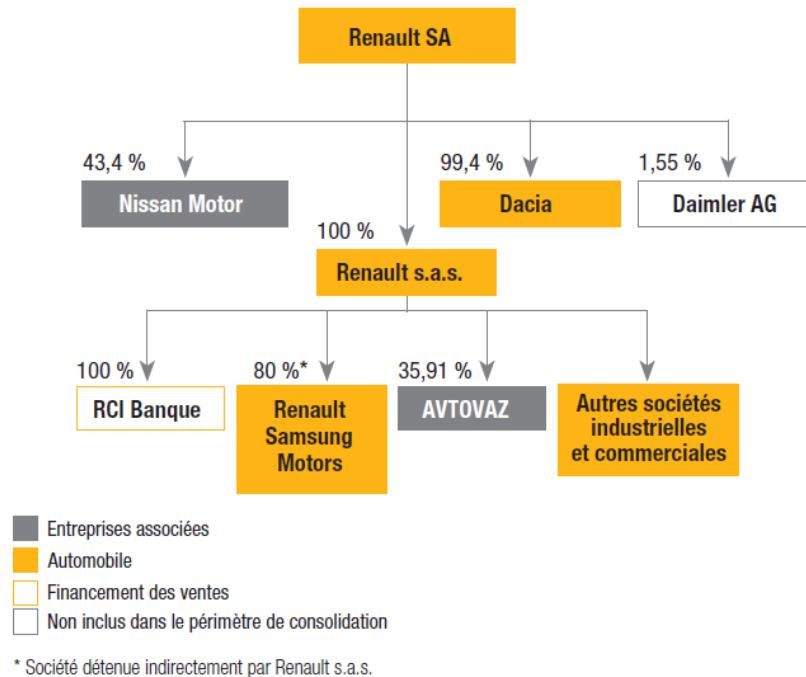
Figure 4 - Modèle actionnariat du Groupe

Renault détient 43,4 % du capital de Nissan. Nissan détient 15 % du capital de Renault. Le modèle d'actionnariat croisé – montré dans la figure 4 – garantit aux deux partenaires un intérêt mutuel et les incite à adopter des stratégies "gagnant-gagnant" bénéfiques pour chacun. Créée le 28 mars 2002, Renault-Nissan BV est en charge du management stratégique de l'Alliance. Il s'agit d'une société de droit néerlandais, dont l'actionnariat est détenu à part égale par Renault SA et Nissan Motor Co., Ltd.

Pour répondre aux grands défis technologiques du futur et poursuivre sa stratégie de croissance rentable, le groupe Renault renforce ses partenariats : alliance avec Nissan, coopérations avec AVTOVAZ en Russie, Daimler et Mitsubishi, accord avec Dongfeng en Chine et bénéficie de la

complémentarité de ses trois marques : Renault, Dacia et Renault Samsung Motors. Cette relation peut être vue dans la Figure 5.

(en % des actions émises)



1.3. LE

Figure 5 - Structure de Renault S.A.

## TECHNOCENTRE

Inauguré en 1998, le Technocentre Renault est un centre de recherche où sont conçues les futures voitures du groupe Renault et se trouve à Guyancourt dans les Yvelines à 30 km de Paris. Il emploie 9438 personnes – y compris les prestataires, sous-traitants et filiales de Renault. Il s’agit du plus grand centre de recherche et développement de France.



Figure 6 - Entrée du Technocentre Renault

Le Technocentre regroupe toutes les activités impliquées dans la conception des véhicules particuliers (recherche, design, produit, ...) hors mécanique des essais. Le site a été conçu pour approximer tous les acteurs de la conception d’un nouveau modèle de voiture. Il y a un gain de temps pour les concepteurs appréciable et Renault évite ainsi un investissement de 200 000 euros dû aux déplacements.

## 2. PRESENTATION DE L'EQUIPE

### 2.1. PRESENTATION DE L'UNITE OPTIMISATION

L'équipe Optimisation et Méthodes Numériques est issue de la réunion de l'ancienne équipe de recherche en optimisation et de l'ancienne équipe de développement d'outils pour l'optimisation et elle est en charge de:

- Préparer les dossiers de standardisation de la conception ;
- Faire évoluer les outils et méthodes de dimensionnement et d'optimisation.

Elle fait partie de la direction transverse de l'ingénierie Renault. C'est à dire que l'unité Optimisation ne travaille pas sur les nouveaux produits et conceptions, mais son but c'est améliorer la qualité, fiabilité et relation de coûts de produits et pièces déjà conçues.

### 2.2. PRESENTATION DES ACTEURS

Chez Renault, mes tuteurs son Frédéric Mercier et Laurent Genest. Frédéric est mon tuteur légal chez Renault et Ingénieur de Recherche & Ingénierie Avancée dans le cadre de l'équipe d'optimisation et méthodes numériques. Laurent est doctorant avec une thèse sur la Paramétrage de forme pour l'optimisation du soubassement. Mon stage est une sous-partie de la thèse de Genest, spécifiquement sous le paramétrage de forme et optimisation du mode d'écrasement du longeron.

Le chef de l'Unité de méthodes numériques est Tony Gomes-Vieira et le chef de services de Méthodes et Modèles de Simulation Numérique est Jean-Pascal Reille.

Pour l'utilisation de la boucle automatique responsable pour l'optimisation, un partenariat avec l'entreprise EuroDecision a été signé. Gireg Bachelot m'a assisté dans la configuration et utilisation du logiciel Alternova et la mise au point de la boucle. Pour la correction de quelques erreurs de contact dans le modèle, Sylvain Maillot, a aussi fait partie du projet.



## 3. INTRODUCTION

### 3.1. INTRODUCTION AU CRASH

La sécurité est une prestation de grande importance dans l'industrie automobile aujourd'hui. Un grand effort a été fait pour diminuer le nombre d'accidents mortels. L'évolution de la technologie a apporté aux voitures une grande amélioration de la sécurité des occupants (ABS, ESP, contrôle de traction, etc.) et les piétons. Ces éléments comprennent la sécurité active du véhicule.

Une fois que l'accident devient inévitable, entre en jeu la sécurité passive. Responsable pour réduire les effets de la collision transférée aux occupants et les piétons. Comme exemple il y a la ceinture de sécurité, l'airbag et la déformation prévue de la structure d'automobile pour l'absorption d'énergie.

Avant d'agir pour améliorer le comportement des structures du véhicule pendant le crash, il faut le maîtriser pour comprendre la mécanique et dynamique associée. En raison de coûts et poids, les structures du soubassement automobiles sont en grande partie corps creux à paroi mince, comme dans le cas du longeron avant, l'élément responsable d'absorption d'une fraction significative de l'énergie lors d'un choc frontal. L'optimisation du comportement en crash du longeron est essentielle pour avoir un bon résultat en situations de collisions.

A partir d'une géométrie définie du longeron, l'ajout de nervures peut être une méthode pour rigidifier ou créer des déclencheurs de plis d'une forme contrôlée. Pour que cela se produise il est nécessaire de savoir bien placer les nervures ainsi que les positions, dimensions et les formes optimales. En tenant en compte les contraintes de mise en forme dans le processus de fabrication.

Ce rapport contient la démarche de travail effectuée en 6 mois au sein du Technocentre Renault depuis l'introduction aux modèles de chocs frontaux, la révision bibliographique qui présente les études déjà faites autour du sujet du paramétrage de forme, jusqu'au processus utilisés en cherchant le meilleur comportement en crash du longeron.

Quatre méthodes ont été définies pour conjointement avoir une compréhension la plus proche que possible de la réalité. Ces méthodes seront mieux expliquées en aval et sont essentiellement: analytique, vibratoire, gestion de l'emboutissage et optimisation.

### 3.2. MODELES DE CHOCS FRONTAUX

Les collisions de véhicules sont encore une des principales causes de morts et blessures, même avec les voitures devenant de plus en plus sûres. Une des raisons qui font que les voitures deviennent plus sûres est un programme d'essais bien établis.

Le test de choc frontal est développé sur la base du Comité de la sécurité des véhicules européen pour l'amélioration de la législation. Pour évaluer la tenue en crash frontal [14], il existe quelques tests comme le RCAR – un organisme international qui comprend des centres de recherche nationaux d'assurance individuels et comités de réparation de moteurs de réparation concernent la recherche, la formation et l'exercice d'activités d'intérêt technique commune – et le BFD et BFR de l'Euro NCAP.

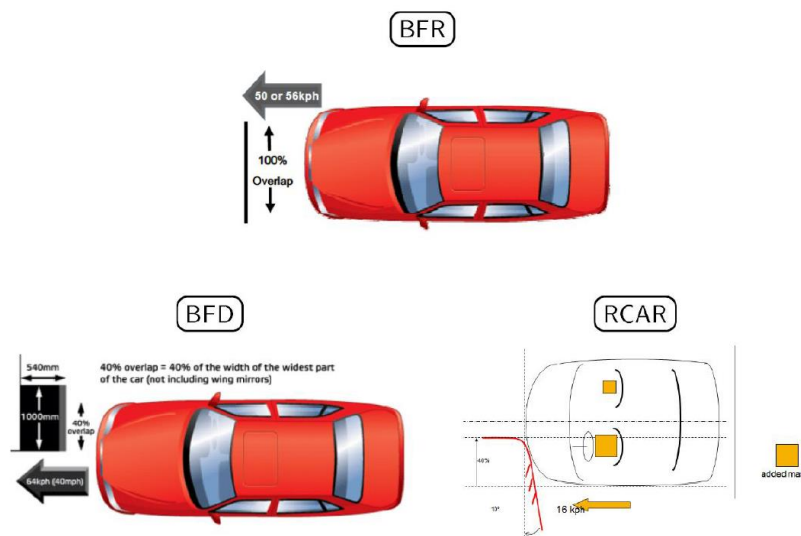


Figure 7 - Quelques types d'essais de choc frontal

Créé en 1997, Euro NCAP est composé de sept gouvernements européens, ainsi que les organisations automobiles et de consommateurs dans tous les pays de l'Europe. L'Euro NCAP rapidement est devenu un catalyseur pour encourager les améliorations de la sécurité des nouvelles conceptions de véhicules. Les crash-tests effectués pour l'Euro NCAP (European New Car Assessment Programme) offrent aux consommateurs des réalistes et indépendants résultats de performance de la sécurité des voitures les plus vendus en Europe.



Figure 8 - Essai BFD

L'essai BFD (Barrière Frontale Déformable) simule un choc de tête avec une autre voiture de masse similaire. Le véhicule est soumis à une vitesse finale de l'ordre de 64 kilomètres par heure qui s'écrase contre une barrière sans déclencher le freinage, comme vu dans la Figure 8. Ce test est un test sévère de la capacité

du véhicule à survivre l'impact, et donc, comme l'habitacle est affectée.

L'impact entre l'occupant et régions de l'intérieur est la cause de nombreuses blessures graves et mortelles dans les accidents. La vitesse d'essai à 64 km/h simule une collision avec une autre voiture comme dans la Figure 9. Chacun voyageant à environ 55 km/h. La différence de vitesse est due à l'énergie absorbée par la surface déformable. Des études ont montré que cette vitesse d'impact de l'accident couvre une proportion importante de « tragédies de la route » à travers le monde, mais la vitesse d'impact obtenue est en augmentation de 8 km/h en moyenne au cours des dernières années.



**Figure 9 - Type de collision simulée pour le BFD**



**Figure 10 - Exemple d'un test BFR**

Pour ce stage, le test BFR (Barrière Frontal Rigide) a été le seul essai pris en compte parce qu'il permet d'observer le comportement de la structure du véhicule dans un cas extrême. Il permet aussi de tester la robustesse de la voiture et mesurer l'énergie que chaque pièce de la structure peut absorber lors d'un crash du fait que la barrière ne se déforme pas.

Ce test sera inséré dans le protocole Euro NCAP en 2015 et il exige que l'automobile se présente face à une barrière à une vitesse de 50km/h chargé comme si il transportait des occupants. Le réservoir doit contenir 90% de sa capacité en carburant et le poids des bagages et de l'instrumentation de mesure est normalisé à 36 kg.

## 4. PRESENTATION DU SUJET

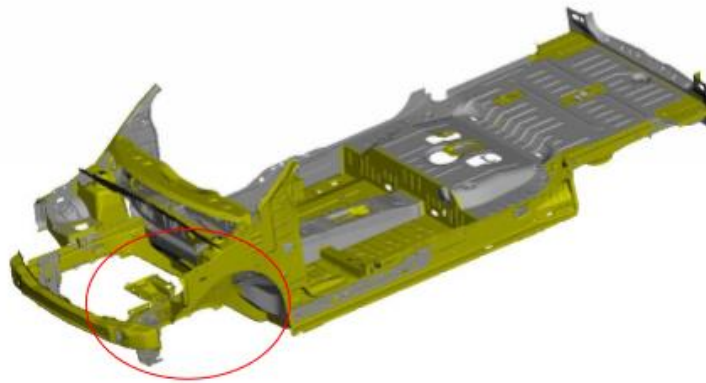
### 4.1. SUJET DE STAGE

Le sujet de mon stage chez Renault Nissan est défini comme : Paramétrage de formes pour l'optimisation en crash de pièces de structures minces. C'est-à-dire que l'objectif est la création d'un outil permettant de définir la forme et le positionnement des triggers sur le longeron afin de créer un écrasement initial stable et de permettre la rigidification de la partie arrière.

Le travail effectué jusqu'à la présentation de ce rapport est constituée : de la portion concernée à l'étude de la tête du longeron, le paramétrage de forme des triggers et utilisation des méthodes en cherchant les valeurs optimales pour l'écrasement axial de la partie frontale.

## 4.2. PRESENTATION DU LONGERON

Lors d'un crash frontal, presque toute la structure du châssis est affectée. Pour garantir la sécurité des occupants du véhicule, l'intégrité de l'habitacle doit être préservée. L'effet recherché est la diminution de la décélération subie par les passagers et limiter l'intrusion des éléments sous capot ou la déformation excessive d'éléments dans l'habitacle. Pour cela, la déformation du bloc avant doit être maximale et contrôlée pour absorber un maximum d'énergie.



**Figure 11 - Le soubassement avec le longeron avant mis en évidence**

Le bloc avant doit composer avec les éléments incompressibles comme le moteur, la batterie, la boîte de vitesse ou le maître-cylindre de freins. Néanmoins, les principaux éléments participant à la compression sont la traverse avant, les soubassements, les trains de suspension, les roues, la carrosserie et le longeron.



**Figure 12 - Le longeron avant gauche**

Le longeron est l'un des principaux composants constituant le châssis d'un véhicule. Ils sont poutres de sections variables montés longitudinalement pour assurer la rigidité structurelle du châssis.

### 4.3. PRESENTATION DU COMPORTEMENT SOUHAITE ET DES TRIGGERS

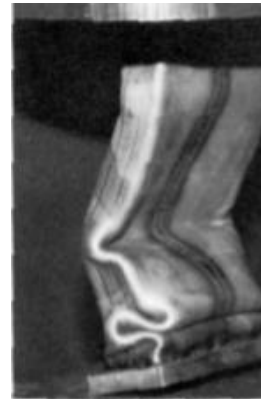
Une des caractéristiques les plus importantes dans la conception d'éléments de structure pour la gestion de l'énergie du choc est leur capacité de charge ou de force sous divers types d'effondrement qui va affecter la dissipation d'énergie de ces éléments.

Les modes d'effondrement dépendent du chargement et sont liés aux propriétés géométriques et matérielles de la section. Deux modes fondamentaux d'effondrement ont été identifiés dans les essais d'absorption de l'énergie du choc pour les poutres trouvées dans les structures automobiles. Ceux-ci sont: une compression axiale soit caractérisé régulière, de type à pliage en accordéon (Figure 13) ou froissement irrégulière de la colonne et un effondrement de flexion dans laquelle les déclencheurs plastiques discrètes sont formées et la colonne collapse dans un mode de couplage (Figure 14).

Quand une section automobile est soumise à une compression axiale, le flambement local lance le processus qui conduit à l'effondrement éventuel ou le pliage de la section. Pour la partie frontale du longeron, le but c'est de trouver le comportement d'écrasement régulier, une des modes fondamentaux d'effondrement axial de poutre.



**Figure 13 - Mode d'écrasement régulière**

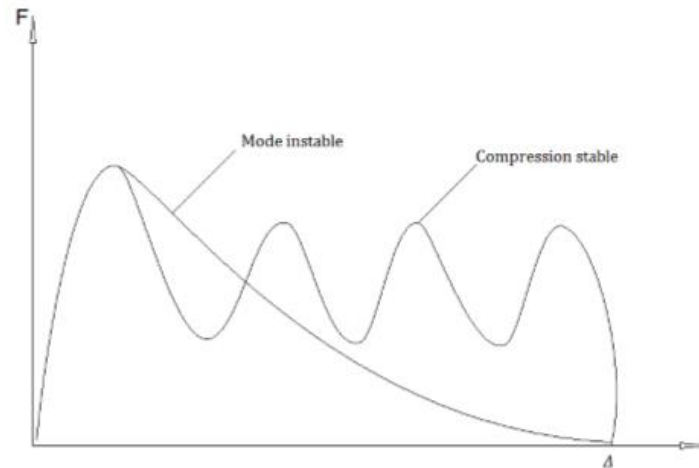


**Figure 14 - Instabilité de compression**

L'aire sous la courbe Force-Déplacement d'après la formule (1), correspond lors d'un crash à l'énergie absorbée par la structure.

$$E_{ab} = \int_0^{\Delta} F d\delta \quad (1)$$

On peut percevoir, après avoir analysé les courbes de la Figure 15, que le mode de compression régulière est le plus efficace.



**Figure 15 - Courbes Force x Déplacement**

Pour arriver au comportement souhaité, le collapse axial régulière, on a les triggers. Ce sont imperfections développées pour contrôler le mode d'écrasement et guider l'effondrement.

Les triggers sont très effectifs. *Kh. Fallah et al.* ont montré que les déclencheurs d'écrasement (triggers) sont une type de méthode pour contrôle de la déformation peuvent être utilisés pour éviter l'échec résultant de flexion générale ou d'autres modes de déformation catastrophiques des membres carrés sous une charge de compression axiale. L'introduction des triggers à un élément de structure peut initier une mode d'effondrement axial spécifique, stabiliser le processus de collapse et de minimiser l'effort maximale de l'écrasement. Ce mode de déformation donne des valeurs plus élevées de la CFE en générant une faible valeur de la force d'écrasement maximale par rapport à spécimens sans déclencheurs.

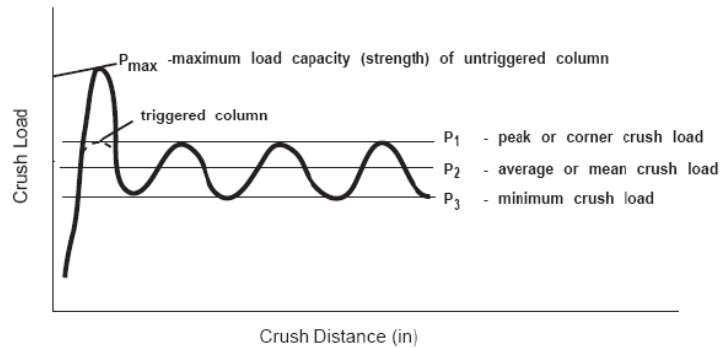


**Figure 16 - Exemple des triggers placés sur le longeron**

Le crash est un phénomène très difficile de maîtriser. Donc, le but de ce stage au-delà de améliorer le comportement en questions de sécurité du véhicule est aussi de contrôler le mode de collapse. Une fois que la forme d'effondrement optimale est trouvée, d'autres études peut suivre plus précisément.

#### 4.4. SPECIFICATION DU PROBLEME

Sachant que l'addition « d'imperfections » appropriées (*triggers*) peut atténuer l'effort maximum pendant l'écrasement – vu dans la Figure 17, minimiser la charge transférée aux autres structures et dissiper le maximum d'énergie, il faut savoir où les placer avec toutes les dimensions caractéristiques afin d'avoir un résultat plus efficient.



**Figure 17 - Atténuation de l'effort car la présence des triggers**

Pour cela ont été choisies trois formes arbitraires basées sur la faisabilité de la mise en forme. Génériquement, l'ellipse, le triangle et le créneau. Les dimensions paramétrisées sont : la position de la nervure sur le longeron, la profondeur et la largeur du trigger. La présence/absence ont été aussi prise en compte.

Il y a peu d'études sur ce sujet, et peu d'informations sous le comportement attendu. Donc, le but de ce stage est également de définir le mode plus efficace de collapse pour le longeron en étude. Observant le types d'effondrement que le modèle nécessite dans chaque partie de la pièce pour avoir un bon résultat sous toutes les réponses.

Les réponses du cahier de charges consistent dans la valeur de l'OLC (accélération sur les occupants) et des intrusions dans l'habitacle. Le maximum acceptable de ces réponses varient et sont définis pour l'Euro NCAP qui donne une note jusqu'à 5 étoiles en dépendant des valeurs obtenues.

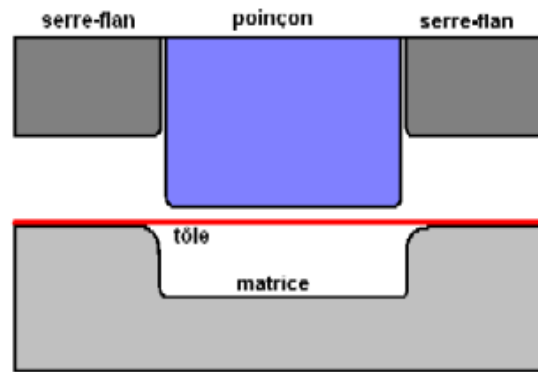
## 5. REVISION BIBLIOGRAPHIQUE

### 5.1. ETUDES PRECEDENTES

#### 5.1.1. CARACTERISATION DU PROCEDE D'EMBOUTISSAGE

Le processus d'emboutir est très ancien, en ayant comme définition le travail d'une plaque de métal avec du marteau sur une enclume. Et, « l'emboutissage est la transformation permanente d'une feuille de métal en une forme tridimensionnelle par l'action d'outils. ». Aujourd'hui le processus a comme outil le Poinçon qui applique des efforts sur une plaque mince. On a aussi la matrice qui donne la forme, et un mode de serrage avec des pinces et des étriers pour fixer le flan qui est exemplifié dans la Figure 18.





**Figure 18 - Système de l'emboutissage**

D'abord, les concepts de l'élasto-plasticité sont importants et ils régissent le comportement de la tôle pendant et immédiatement après la déformation. L'étude de la réponse plastique du matériau peut éviter des défauts en sachant sa courbe d'érouissage et, ainsi, les seuils de forme.

Pour avoir une bonne réponse de la pièce, on a des opérations complémentaires, comme : le calibrage (détails fins/réduire dispersion géométrique) ; le détourage ; le tombage et le relevage bord (réorienter les zones périphériques) ; Poinçonnage et Relevé de collet. L'alimentation de la tôle peut se faire en continu ou, la plupart du temps, en discontinu (pièce à pièce) avec un cadencement de l'ordre de 10 à 20 coups/min.

Les critères d'acceptation des pièces peuvent varier selon la destination et ils sont fondamentalement liés aux problèmes de résistance mécanique ou de qualité d'aspect de surface comme des strictions, ruptures, plis, aspects de surface (défauts accidentels ou systématiques), tolérances dimensionnelles, etc. on a comme paramètres de réglage du processus : Cadence, lubrification, Pression de serre flan, Joncs de retenue, Forme du flan.

La simulation numérique présente plusieurs intérêts dans conception et mise au point d'une pièce à l'emboutissage. Les logiciels CAD et CAE peuvent offrir : le remplacement des expérimentations physiques en diminuant des délais et des coûts d'outillage, la comparaison de différentes configurations pour optimiser la solution, la prévision des défauts pour mieux comprendre leurs mécanismes de formation, une évaluation des efforts qui peut aider le choix des machines et outils, l'évaluation du poids de chaque paramètre en cherchant un meilleur compromis coût/résultat et la optimisation de la pièce par rapport aux conditions de service.

Au niveau de l'investigation, on a différentes approches : - L'approche géométrique où il s'agit principalement de l'utilisation des logiciels CAO pour obtenir une forme désirée et en cherchant les informations sur les sections de la pièce. - L'approche 2D qui fonctionne principalement sur les longues



pièces ou proches de la symétrie de révolution et permet d'obtenir informations en travaillant sur des sections de la pièce.

Il y a une méthode simplifiée, appelé approche inverse, qui part de la pièce finie pour estimer les épaisseurs résiduelles attendues et qui peut faire une approche strictement géométrique ou prendre en compte les paramètres de plasticité et de frottement. De l'autre côté, on a les approches 3D, qui assurent une simulation complète du processus d'emboutissage, cependant la prévision des retours élastiques s'avère délicate.

### 5.1.2. MORPHING

L'objectif est l'optimisation du Longeron avec un développement d'outils pour permettre d'ajouter les paramètres de morphing de façon plus systématique. Cette étude possède au total 31 facteurs de conception, comme épaisseurs, matériaux, présence/absence et de morphing.

Tout d'abord, les trous et les emboutis ont été supprimés pour éviter des « fausses contraintes ». Pour l'étude de la gestion de l'inertie du longeron (hauteurs, largeur) il a seulement été possible de réduire ses dimensions de l'ordre de 20% de la « hauteur » et, aussi, 20% de la « largeur ».

L'ajout de triggers pour faciliter la bonne compression du longeron est une stratégie permis pour les paramètres de morphing. En utilisant Alternova, on a 4 facteurs à gérer.

La configuration minimale montre un gain de 4,25 kg, soit une masse référence de 11,11 Kg. Et la configuration maximale a une masse de 15,64Kg.

## 5.2. EQUATIONS ANALYTIQUES

### 5.2.1. OPTIMISATION DU COMPORTEMENT EN COMPRESSION DES CORPS CREUX

L'évolution de la technologie a apporté aux voitures une grande amélioration de la sécurité des occupants ainsi que pour les piétons. Afin de dimensionner cette prestation, il y a des organismes qui testent et certifient les véhicules, comme l'EuroNCAP.

Parmi les tests de l'EuroNCAP, on a le choc frontal, latéral ou arrière. En considérant le choc frontal, il y a encore le test avec une barrière rigide (BFR), une barrière déformable (BFD) et le RCAR. Au cours du choc, le longeron du véhicule a un rôle essentiel dans l'absorption d'énergie. Sa conception doit être de manière à bien guider l'écrasement et son plissement, en ajoutant si nécessaire des triggers.

Toutefois ce mode a un problème de stabilité d'écrasement qui doit être pris en compte [5]. Pour les tubes rectangulaires on a deux types possibles de mode d'écrasement stable : le mode symétrique et asymétrique.

Pour essayer de stabiliser l'écrasement et éviter le flambage prématuré de la structure on peut ajouter des triggers (emboutis) aux structures (le longeron). Pour ça il faut voir l'effort moyen de compression du corps (White et Jones, 1999) en forme double oméga.

$$P_m = M_0 \left\{ B1 \frac{r}{t} + B2 \frac{L}{H} + B3 \frac{H}{r} \right\} \frac{2H}{\delta_{eff}} \quad (2)$$

La procédure de développement de pièces commence avec la modélisation et calculs virtuels. Pour analyser le comportement du longeron, tout d'abord la modélisation est effectuée sous CATIA, le maillage et prétraitement sont réalisés à l'aide du logiciel ANSA. Ensuite un solveur comme PAMCRASH exécute les calculs et enfin le post traitement est laissé au logiciel METAPOST qui écrit un fichier de rapport de calcul.

### 5.2.2. MODE DE FLAMBAGE ELASTIQUE

Le flambage local commence le processus du collapse ou du pliage [4]. Ce phénomène dépend plutôt de la géométrie et se produit en plusieurs demi-ondes. Par exemple, une poutre parfaitement plane de section carrée sous une compression uniforme flambe dans une contrainte critique.

$$\sigma_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} (t/b)^2 \quad (3)$$

Où,  $\sigma_{cr}$  = force critique de flambage ;

$E$  = module de élasticité ;

$k$  = coefficient élastique de plaque ;

$t$  = épaisseur (pouces) ;

$b$  = largeur de la plaque de flambage (pouces) ;

$\nu$  = ratio de poisson = 0,3.

$$k = \left( \frac{mb}{l} + \frac{l}{mb} \right)^2 = \left( \frac{b}{\lambda} + \frac{\lambda}{b} \right)^2 \quad (4)$$

$$k = \left(\frac{b}{\lambda}\right)^2 + p + q\left(\frac{\lambda}{b}\right)^2 \quad (5)$$

Où,  $m$  = nombre de demi-ondes ;

$l$  = longueur de la poutre ;

$\lambda$  = longueur de demi-onde ;

$b = d$ .

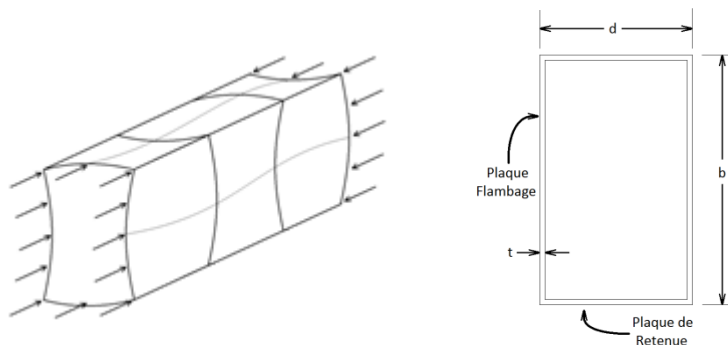


Figure 19 - Modes de flambage de plaques et variables géométriques.

## 6. METHODES ET RESULTATS

### 6.1. PRESENTATION DES METHODES UTILISEES

Les instabilités locales rendent une complexité mathématique en déterminer la capacité de charges théorique ou les limites de force d'une paroi fine. Cette complexité est renforcée par la nature statistique de la force et de géométrie des imperfections matérielles. Codes d'éléments finis de plaque (EF) peuvent être utilisés pour déterminer la capacité de charge maximale. Ceux-là, toutefois, ne sont pas des aides pratiques dans les étapes initiales de la conception, lors de la génération de conception et de dimensionnement des éléments, et contribuent peu à la compréhension de concepteur des paramètres qui contrôlent la force et le comportement de l'effondrement des éléments structuraux.

En outre, ils n'ont pas encore la capacité de prédiction des caractéristiques de déformation, telles que la charge moyenne à l'écrasement et à distance qui sont indispensables à la conception des structures d'absorption d'énergie.

Pour cela, la première méthode utilisée est la méthode analytique, pour définir la position initiale des triggers en se basant sur l'équation de demi-longueur d'onde. Après la méthode vibratoire est utilisée pour voir la relation des modes de résonance de poutre et de plaque sur les modes de collapse du longeron.

La méthode de gestion de l'emboutissage inverse collabore dans tous les calculs approximant le résultat de la simulation du résultat réelle. Car il prend en compte l'histoire de forme de la pièce.

La dernière méthode est utile pour trouver les valeurs les plus efficaces avec les contraintes proposées. L'optimisation s'utilise de tous les résultats précédents comme point de partie pour essayer différents valeurs dans les modèles.

## 6.2. METHODE ANALYTIQUE

Deux modes de collapse basiques ont été identifiées dans les tests d'énergie de crash absorbée en éléments de poutre automobiles : Un collapse axial régulier, plie type accordéon ou plissement irrégulier et le mode de collapse pour fléchissement.

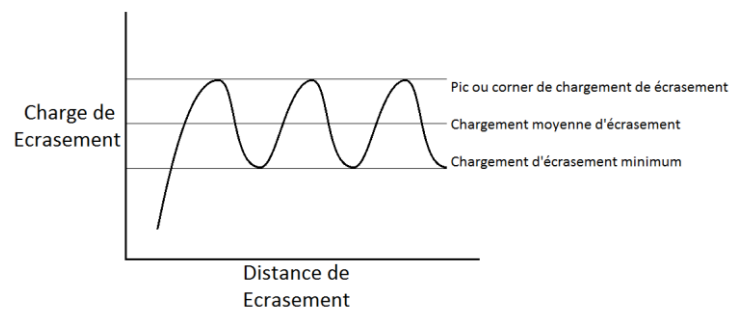
Cette étude donne des méthodes de développement pour la conception de tôles minces en utilisant une approche semi-empirique. Avec le minimum de k, qui se trouve en définissant le  $\frac{\partial \sigma_{cr}}{\partial \lambda} = 0$  on a la longueur d'onde  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{l}{m} = 0.8 * bq^{-0.25} \quad (6)$$

Où,  $q$  = facteur dépendent du degré de contraintes de bords.

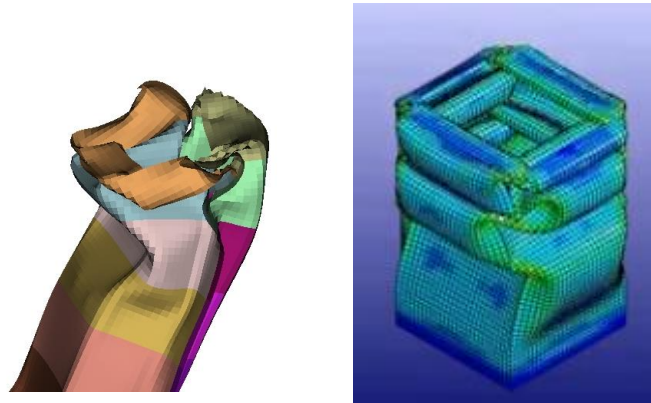
En considérant le longeron comme une poutre simplement supportée, la valeur du facteur  $q$  est de ( $q = 1,00$ ). Donc,  $\lambda = b$ .

Pour un modèle avec des nervures, on a une courbe idéalisée pour la longueur d'onde vue dans la Figure 20.



**Figure 20 - Courbe idéalisée.**

La formule de la contrainte maximale d'effondrement montre la relation entre la contrainte et la longueur de demi-onde. Mais en observant le comportement en crash du modèle de longeron étudié, on peut voir une forme de déformation différent de celle proposé pour l'équation.

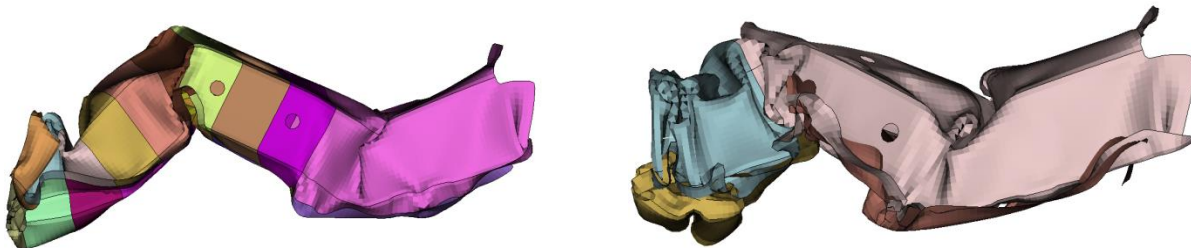


**Figure 21 - Comparaison du modèle simulé et le modèle attendu.**

Dans la structure carrée, on peut percevoir la composition du crash avec un écrasement asymétrique (Figure 21). Néanmoins, le longeron ne présente l'effondrement que dans un côté. De cette manière, les résultats obtenus pour la formule de contrainte maximale ne sont pas optimaux.

### 6.2.1. PREMIERES RESULTATS DU MODELE AVEC TRIGGERS

Une étude a été lancée sur le longeron gauche avec des triggers. Les positions choisies ont été définies par rapport au calcul analytique. De cette façon, en prenant la valeur de la demi-onde on a placé chaque trigger (l'entraxe a été égal à 2 demi-onde). Les dimensions ont été déterminées comme la moyenne dedans la plage de variation.



**Figure 22 - Résultats (Gauche : Sans triggers; Droit : Avec triggers).**

Les résultats obtenus ont été encourageants. Pour la prestation Intrusion à l'habitacle, avec l'addition des triggers, on a eu une réduction de 9,5% en rapport au modèle initial. On a arrivé à une diminution de 9.5% dans la prestation Intrusion à l'habitacle, une réduction d'OLC de 0.25% et diminution dans l'ordre de 40% sur l'effort dans le longeron.

### 6.3. METHODE D'ESTIMATION DE L'EMBOUTISSAGE PAR APPROCHE INVERSE

Lors d'un essai de crash, il faut prendre en compte les effets de la mise en forme qui modifient les caractéristiques de la structure au travers de la déformation plastique [15]. Le processus d'emboutissage, la méthode utilisée pour la mise en forme du longeron et pour les triggers, provoque

dans le matériau une variation de son épaisseur, (une variation de la raideur pour la rigidification du matériau) et une addition de contraintes résiduelles [2].

Ces variations modifient le résultat de la simulation de crash et, doivent être prises en compte pendant le calcul comme a montré *H. Huh et al* [15]. La distribution de la déformation plastique effective joue un rôle dans le crash comme des renforcements avec la contrainte augmentée et la distribution d'épaisseurs agit comme des défauts provenant de l'amincissement après l'emboutissage.

Le mode de déformation est considérablement modifié quand l'histoire de la mise en forme est prise en compte en analyse de crash et le facteur le plus influent est la distribution non-uniforme de la déformation plastique effective et de l'épaisseur.

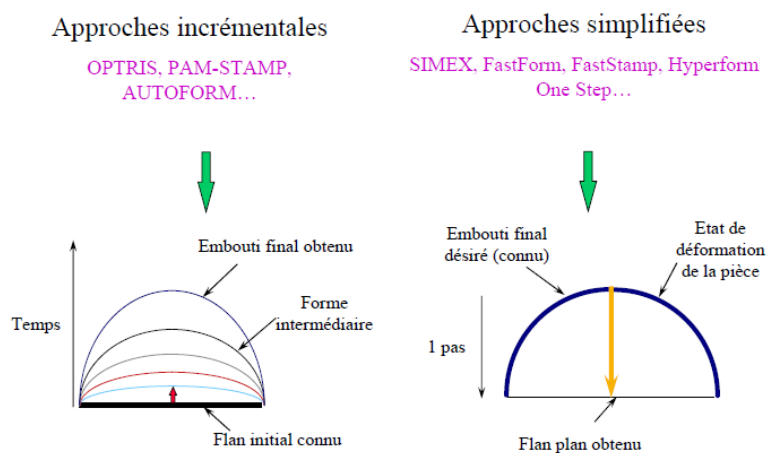


Figure 23 - Méthodes de gestion de l'emboutissage [10].

Pour obtenir l'histoire de la mise en forme du longeron pendant cette étude, avant le calcul de crash, un calcul d'emboutissage simplifié a été fait en utilisant la méthode de l'emboutissage inverse. Cette méthode a comme principe l'utilisation d'un seul pas : à partir de la forme finale, le flan initial est obtenu - comme montré dans la Figure 23 – ainsi que la variation d'épaisseur, les déformations et les contraintes [13].

Les résultats des calculs de l'emboutissage inverse du longeron montrent l'importance de la prise en compte de ces variations. On peut voir dans la Figure 24, le processus de la méthode au travers du logiciel Meta-Post.

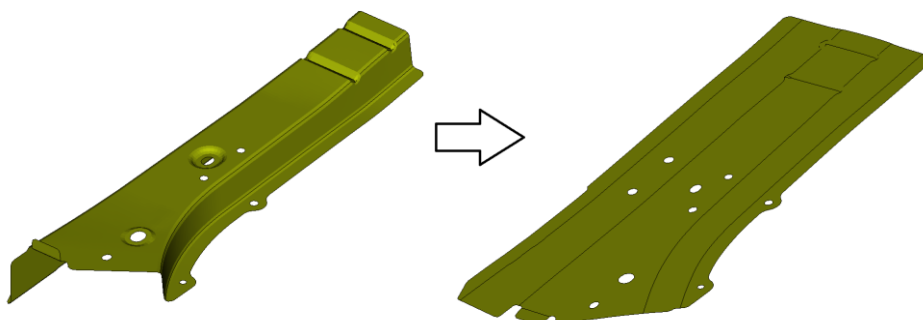
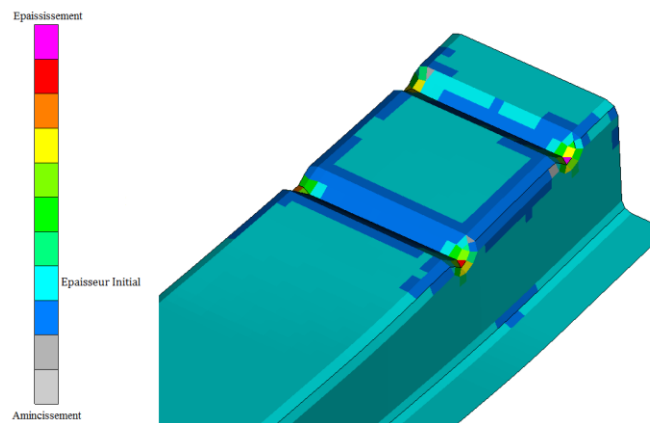


Figure 24 - Processus de l'approche inverse.

Malgré la déformation imposée pour la formation du longeron, la grande partie de la pièce reste sans grande variation d'épaisseur. Comme prévu, la variation d'épaisseur est plus notable dans les coins et dans les triggers. Il y a un ajout de matériau au fond de chaque trigger provoquant une rigidification locale. Dans la Figure 25 c'est facile de comprendre la distribution d'épaisseur dans une face du longeron et voir l'amincissement dans les congés et un épaissement du fond des triggers ajoutés.



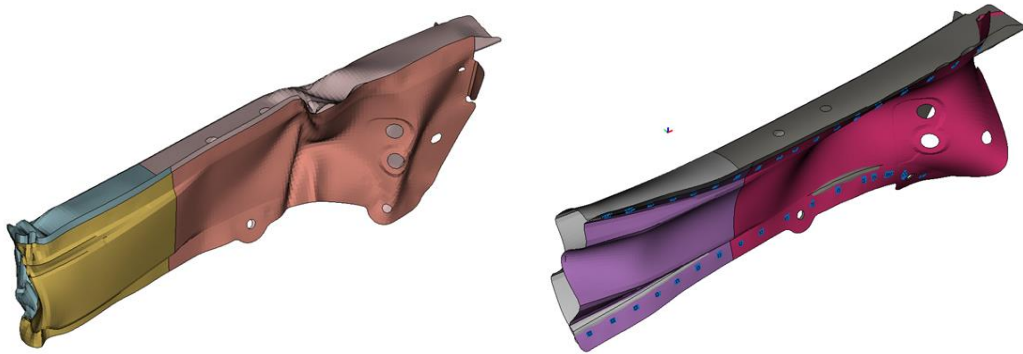
**Figure 25 - Distribution d'épaisseur.**

#### 6.4. METHODE VIBRATOIRE

La méthode vibratoire consiste en l'analyse d'un modèle du longeron sans l'ajout de triggers et de regarder le comportement de la pièce en fréquences propre. L'objectif et la méthode est de vérifier la relation entre les modes de résonance qui apparaissent et le mode d'écrasement en crash.

Pour faire cette analyse, il faut avoir un modèle CAO du longeron avec le matériau et les points de soudure bien définis pour lancer le logiciel de maillage et de pré-calcul (le logiciel ANSA a été utilisé pour cette partie). Le calcul est lancé avec le support du logiciel NASTRAN après la définition des conditions aux limites.

Le mode cherché est celui que s'approche-le plus de la forme d'écrasement de la pièce.



**Figure 26 - Gauche : Longeron lors d'un essai de crash ; Droit : Mode de résonance correspondant.**

La Figure 26 montre du côté gauche le comportement du longeron lors d'un essai de crash, où est possible de visualiser de son mode de déformation qui inclue un écrasement du début de la tête et un pliage de la partie arrière. Du côté droit, c'est la représentation du mode de résonance correspondant à la déformation présentée.

Pour analyser et choisir le mode qui représente le plus le comportement vu, il est nécessaire de chercher un mode de plaque qui se produise dans les hautes fréquences.

Jusqu'à la fin de ce rapport, l'essai avec les positions basées sur la méthode vibratoire n'ont pas apporté des améliorations du comportement en crash du longeron. Comme lors d'un crash il y a un impact, plusieurs modes apparaissent et en conséquence, on peut avoir de combinaison de modes. Cela complique l'analyse des modes correspondant.

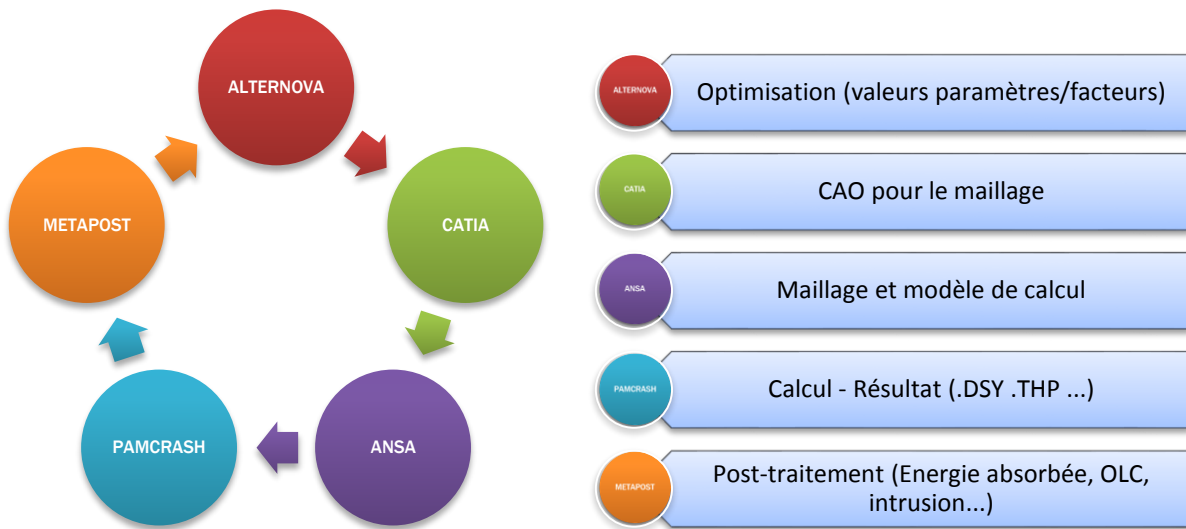
## 6.5. METHODE D'OPTIMISATION

Chez Renault, la méthode d'optimisation consiste dans l'utilisation de 5 logiciels en boucle, de façon à ce que plusieurs paramètres soient modifiés à chaque fois que la boucle est complété selon la surface de réponses de l'optimisation.

Le premier logiciel de la boucle est le responsable pour la modélisation de la pièce et le paramétrage des formes et dimensions, le logiciel CAO. Dans cette étude, CATIA de chez Dassault Systèmes a été utilisé. Ensuite pour le maillage et pré-calcul, la boucle passe à l'ANSA où sont présent en compte tous les paramètres de taille et qualité de maille pour le maillage de tout le modèle. Le calcul de crash est délégué au logiciel PAMCRASH et le post-traitement au logiciel METAPOST.

Alternova est un logiciel conçu par EuroDécision et utilisé chez Renault pour faire l'analyse de la surface de réponses et créer des nouveaux essais à faire dans chaque itération. Pour faire l'étude d'optimisation il faut avoir le modèle CAO bien paramétré, avec une plage de variation définie et la table de correspondance.

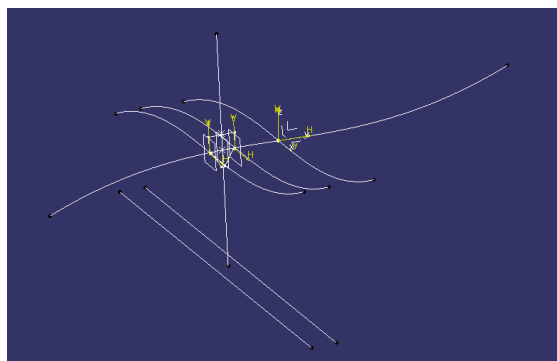




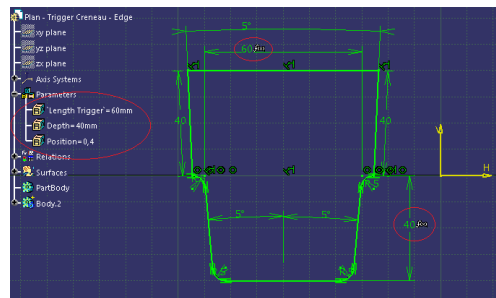
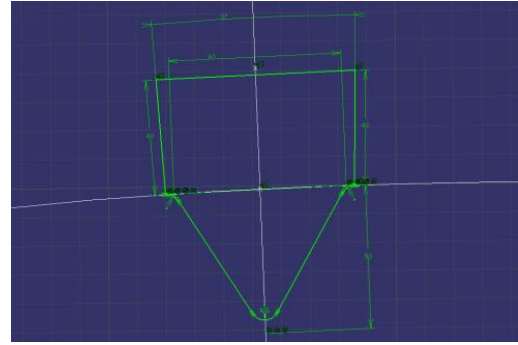
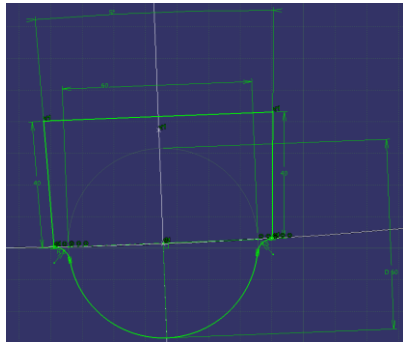
La **Figure 27 - Fonctionnement de la boucle automatique.** première étape du processus d'optimisation et la conception et paramétrisation de la pièce. Le processus de conception des triggers paramétrés dans le longeron peut être expliqué à partir d'un exemple sur une surface générale sous CATIA.

Les étapes sont :

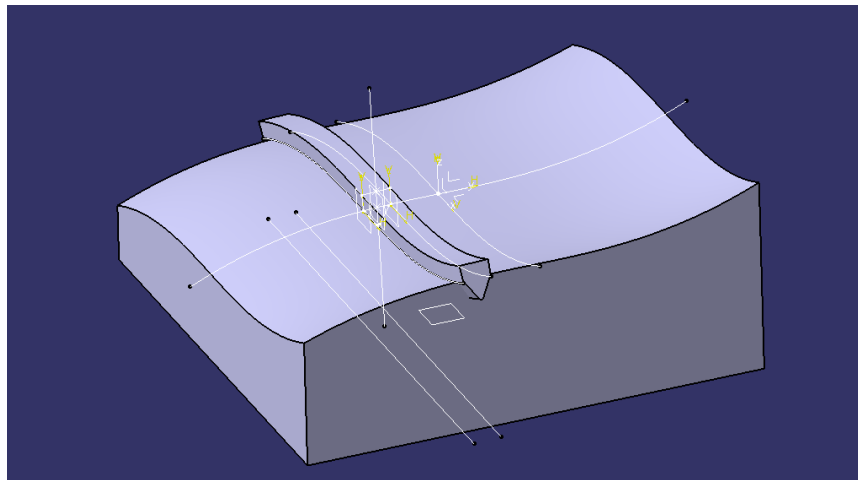
1<sup>er</sup> étape : Définition des éléments de référence et lignes guides.



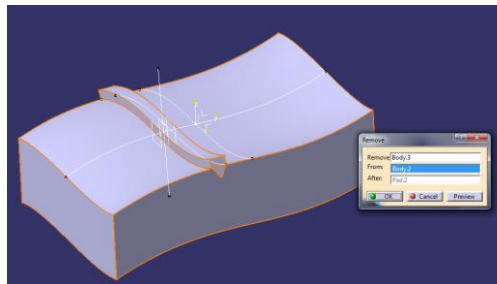
2<sup>ème</sup> étape : Création du profil du poinçon et paramétrage de la forme.



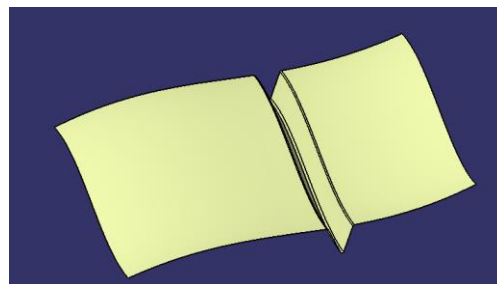
3<sup>ème</sup> étape : Extrusion du profil.



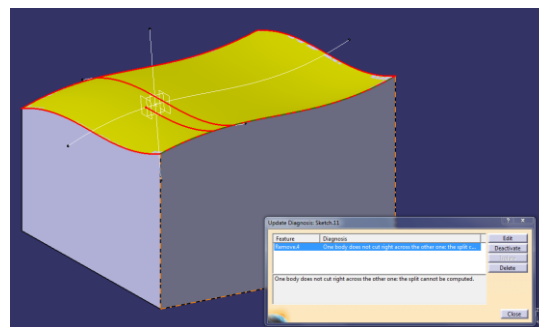
4<sup>ème</sup> étape : Opération Boolienne de suppression.



5<sup>ème</sup> étape : Extraction de la surface finale.



Il a été essayé une démarche avec les congés déjà sur l'esquisse, néanmoins un problème de tangence a été trouvé dans le logiciel CATIA. Ce problème ne permet pas de créer une surface parfaitement tangente sur l'autre, le qui on a le besoin. Donc, l'ajout des congés doit être faite après la création du nouveau solide d'apport avec l'outil Edge Fillet.



**Figure 28 - Erreur lors de la création des triggers avec des congés.**

La construction d'un modèle CAO paramétré de qualité est très importante, parce qu'avant d'initialisation de la boucle automatique d'optimisation, le test de faisabilité du modèle est fait. Et les paramètres sont essayés dans la plage de variation définie. Seulement après la validation de la faisabilité, les étapes suivantes d'optimisation peuvent être faites.

Avec le longeron modélisé et les triggers placés, l'assemblage du modèle complet du véhicule est fait par un fichier « header » qui contrôle les includes (parties de la voiture) appelés sous ANSA pour effectuer le maillage. ANSA est un outil de prétraitement CAE multidisciplinaire qui fournit la

fonctionnalité nécessaire pour l'assemblage du modèle complet, à partir des données CAO au pré-calcul du fichier d'entrée du solveur.

Le calcul est fait par PAMCRASH, qui a été développé par ESI (Engineering Systems International S.A.). Cette simulation de crash, en utilisant une méthode des éléments finis dans une formulation explicite (démontré dans l'annexe 1), a été conçue dans le but d'étudier la réponse dynamique dans le cas des grandes déformations de structures tridimensionnelles. PAMCRASH est spécialement dédié aux simulations de crash dans l'industrie du transport. Les modèles structurels peuvent être faits de briques en 3D, des casques et des poutres. Un grand nombre de modèles de matériaux sont disponibles, permettant de tenir en compte les modes : inélastique, plastique, de ruine et des options de défaillance.

Les résultats sont lus par MetaPost, qui à partir d'un betascript donne à la sortie des fichiers texte avec les valeurs demandés de chaque réponse attendu. Lors de l'étape d'optimisation, le logiciel ALTERNOVA fonctionne à partir de quelques sous étapes bien définies.

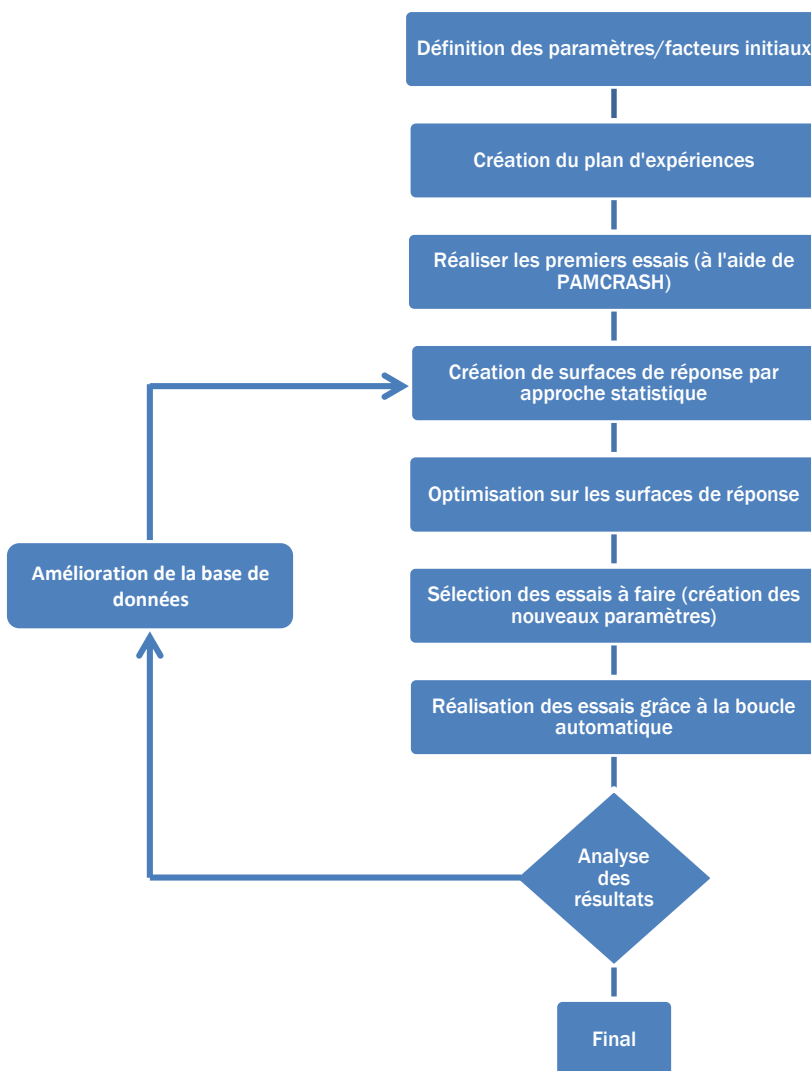
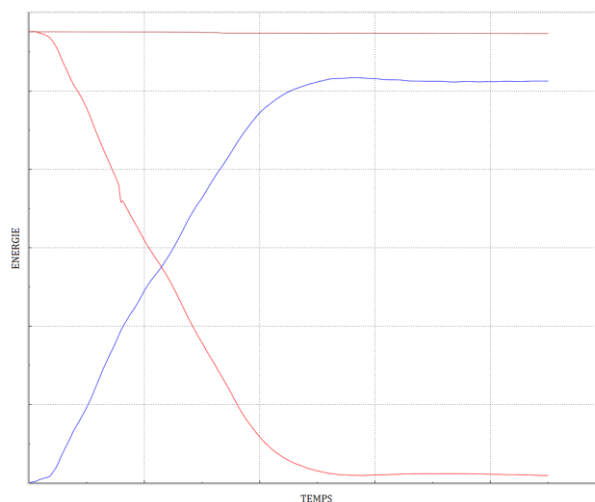


Figure 29 - Processus d'optimisation.

Comme vu dans la Figure 29, les étapes sont séquentielles et part de la définition des valeurs paramétrés sous logiciel CAO et la plage de variation. Donc, est devenu possible la création du plan d'expériences que va gérer les premiers essais sous PAMCRASH.

Les résultats forme des surfaces de réponse, qui à partir d'un approche statistique permet l'optimisation du modèle. Le logiciel choisit les nouveaux paramètres pour les essais à faire et automatiquement lance les calculs. Si l'utilisateur trouver l'essai acceptable, la boucle est terminée. Ou les essais sont gardés pour améliorer la base de données du logiciel et créer ensuite une nouvelle surface de réponse pour d'autre itération d'optimisation.

A chaque résultat, l'analyse de la courbe d'énergie interne et d'énergie cinétique nous donne une évaluation sur l'essai. La Figure 30 montre la relation entre l'énergie interne totale (bleu), l'énergie cinétique totale (rouge) et l'énergie totale (marron) par rapport au temps d'essai.

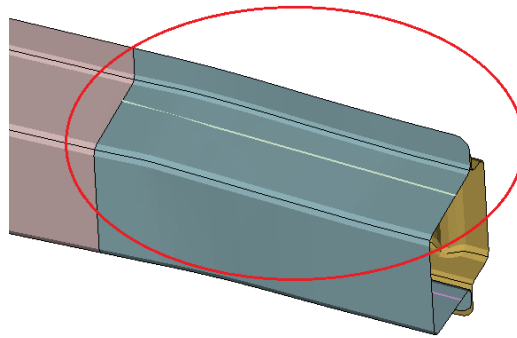


**Figure 30 - Rapport entre l'énergie totale, Interne et Cinétique.**

La seule pièce modifiée dans le modèle pour ce stage a été le longeron gauche, avec l'addition des triggers selon le plan d'expériences. Néanmoins, une erreur de contact dans le groupe du système de refroidissement a causé des échecs de quelques essais. La gestion du contact entre les parties qu'en mouvement a été nécessaire pour la continuation de l'étude et la création de stratégies.

Avec un nombre satisfaisant d'essais réussis, le lancement de la boucle d'optimisation est possible. Pour ça, il faut définir les stratégies d'optimisation pour que le logiciel sache les objectifs et les contraintes au-delà de possibles restrictions. La première stratégie lancée avait comme objectif la minimisation de l'OLC et de l'intrusion dans l'habitacle et aucune contrainte ou restriction.

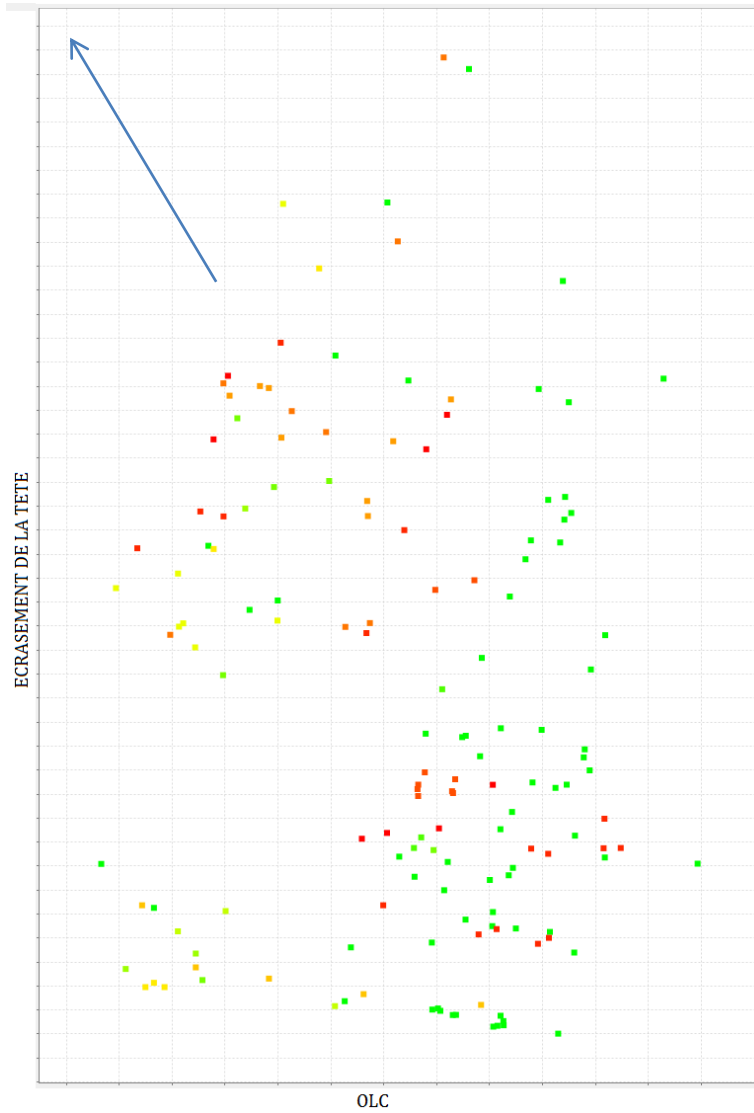
Les premiers résultats n'ont pas été assez satisfaisants. On a vu que l'optimisation poursuivait la minimisation de l'intrusion malgré le bon écrasement de la tête du longeron. Donc il faudrait ajouter des contraintes de façon à gérer l'effondrement de la pièce. Ainsi, en utilisant un élément *spring* de mesure placé dans la partie frontal du longeron, nous pourrions contrôler le mode d'écrasement exigeant une variation relative minimum de l'élément (Figure 31).



**Figure 31 - Élément de mesure.**

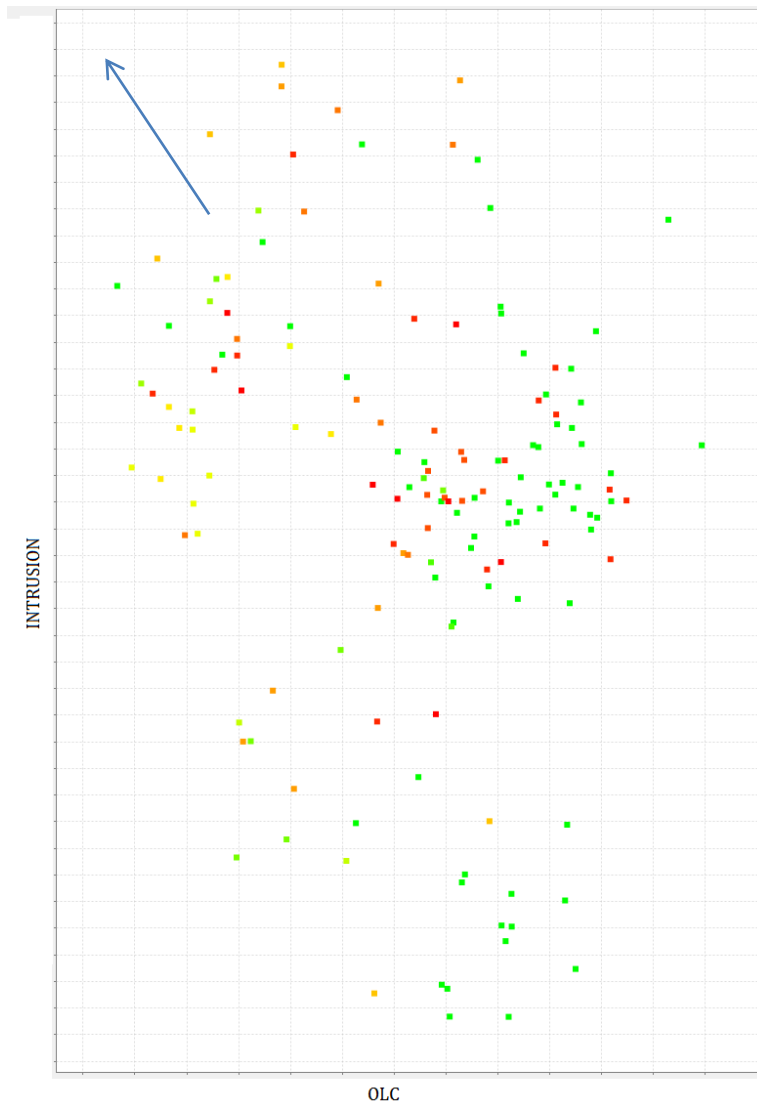
Avec le mode d'effondrement contrôlé, plusieurs itérations ont été faites en cherchant la configuration optimale des triggers. Un nuage de points est créé avec les essais réalisés qui servent à comprendre le comportement et relation des réponses.

Les figures en dessous montrent les résultats obtenus jusqu'au ce rapport. L'échelle de couleurs part du vert pour les premières itérations jusqu'à le rouge pour les dernières itérations, qui s'approchent plus du objectif données les contraintes. La Figure 32 nous donne l'OLC en rapport l'écrasement de la tête, où le point optimum est le plus proche du coté supérieur gauche. C'est-à-dire, le minimum d'OLC et le maximum d'effondrement.



**Figure 32 - Nuage de Points (Ecrasement x OLC)**

Néanmoins, pour obtenir la meilleure configuration, il faut considérer le lien entre le résultat des essais en rapport à l'intrusion à l'habitacle. Cette relation est montrée dans la Figure 33, où les meilleurs résultats sont trouvés aussi, dans le côté supérieur gauche.



**Figure 33 - Nuage de Points (Intrusion x OLC)**

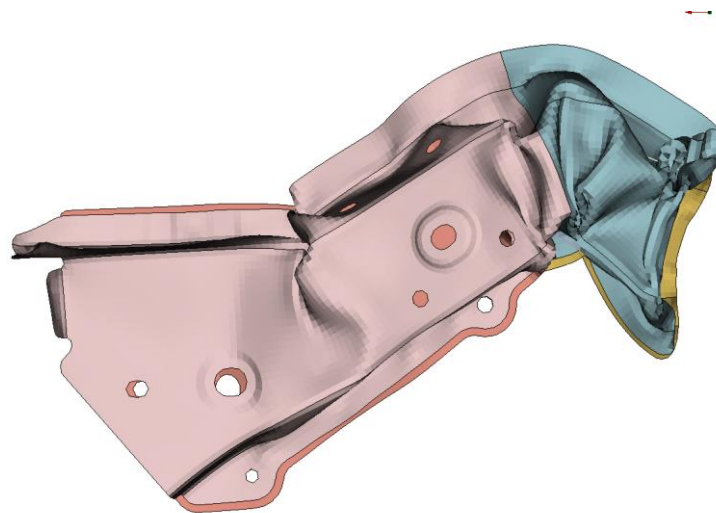
Une courbe de Pareto peut être tracée dans chaque graphique, qui nous montre une limite des données pour les relations. Cette courbe est observée dans la Figure 34 et quelques essais apparaissent comme les possibles résultats optimaux. Dans l'annexe 2, le nuage de points et une brève explication du mode d'obtention de la courbe de Pareto sont montrés.





**Figure 34 - Pareto et essais plus proches du attendu jusqu'à maintenant**

En commun avec les essais sélectionnés on a le mode d'effondrement qui s'assemble à la Figure 35 et une amélioration de l'intrusion de l'ordre de 14 % à 21 % et de l'OLC de 3 % à 5,4 % en comparaison aux modèles sans triggers.



**Figure 35 - Mode d'écrasement le plus efficace avec les essais réalisés.**

## 7. CONCLUSION ET FUTURS TRAVAUX

Le marché d'automobiles d'aujourd'hui se montre chaque fois plus exigeant en rapport à la sécurité des véhicules tant pour les occupants comme pour les piétons. L'avancement de la sécurité passive est, donc, essentiel lors d'un accident inévitable.

Dans le soubassement de la voiture, le longeron joue un rôle des plus importants en absorbant une partie considérable d'énergie du crash. L'optimisation de cette énergie absorbée peut changer radicalement le comportement du véhicule, en améliorant son classement pour les organismes qui test la tenue en crash.

L'Euro NCAP, le organisme plus connue de l'Europe, classe les voitures essayées en étoiles qui peuvent arriver au maximum à 5. Entre les essais sélectionnés comme des meilleurs résultats, les valeurs d'intrusion et d'OLC correspondent à un niveau de sécurité d'un véhicule 3 étoiles. Un résultat déjà satisfaisant en basant sur le modèle sans triggers.

Avec les *springs* de mesure du niveau d'effondrement, un mode de contrôle d'écrasement est devenu possible. Ainsi, un objectif de stage a été atteint. Car il n'y a pas beaucoup de point de l'optimisation sans maîtriser le comportement de la pièce lors du crash.

Malgré le mauvais résultat de la méthode vibratoire, une étude plus profonde sur les modes de résonance combinés peut être utile dans la définition d'une nouvelle plage de variation des paramètres pour une future étude d'optimisation.

La méthode analytique s'est révélée très utile pour déterminer les positions initiales des triggers en dépit de la différence de comportement attendu dû à la dissemblance du longeron en compression par rapport à la pièce du modèle. Et l'optimisation de la position et dimensions des triggers est de ce fait indispensable pour avoir un comportement contrôlé et plus efficace du longeron avant en cas de collision frontal.

Pour la séquence de l'étude de la partie frontale du longeron, plus d'itérations sont nécessaires pour arriver le plus proche possible de la valeur limite de la courbe de Pareto.

Ensuite, le prochain pas est de mettre en œuvre la deuxième étude sur la rigidification de la partie arrière du longeron. Avec le processus de la première étude (tête du longeron), cette étude peut partir d'un point plus avancé. Une fois que la boucle automatique est déjà en opération. L'objectif est de placer les nervures de façon à rigidifier la pièce suffisamment à point de pouvoir supprimer les renforts et réduire son poids totale.

## REFERENCES

- [1] MERCIER, Frédéric. Méthodes et Principes de Conception des Outillages pour l'Emboutissage de Tôles, 2004.
- [2] RONDE-OUSTAU, François. Conception et Mise au Point d'une Gamme d'Emboutissage.
- [3] N. JONES, Structural Impact. Cambridge University Press.
- [4] P. Du Bois, C. C. Chou, et al. , VEHICLE CRASHWORTHINESS AND OCCUPANT PROTECTION. American Iron and Steel Institute.
- [5] J. MOINARD, Optimisation du comportement en compression des corps creux.
- [6] K. Abe, M. Ohta, et al., Collapse of Thin-Walled Curved Beam with Closed-Hat Section – Part 2: Simulation by Plane Plastic Hinge Model. SAE Technical Paper Series.
- [7] H. F. Mahmood et A. Paluszny, Design of Thin Walled Columns for Crash Energy Management – Their Strength and Mode of Collapse. Ford Motor Co.
- [8] F. Tarlochan, F. Samer, et al. , Design os thin wall structures for energy absortion applications: Enhancement of crashworthiness due to axial and oblique impact forces. Elsevier.
- [9] S. Dugardin, Note Technique n° X/68240. Renault.
- [10] M. Frédéric, Simulation numérique de l'emboutissage par Approche Inverse. Présentation d'un modèle basique. Renault.
- [11] F. Rondé-Oustau, Conception et mise au point d'une gamme d'emboutissage. Techniques de l'ingénieur.
- [12] Theory Notes Manual, PAM-SCL.
- [13] M. Frédéric, Simulation Numérique de la Mise en Forme des Matériaux Métalliques.
- [14] L. Genest, Paramétrage de forme pour l'optimisation du soubassement. RMTI Renault Nissan.
- [15] H. Huh et al, Crashworthiness assessment of front side member in an auto-body considering the fabrication histories. Internal Journal of Mechanical Sciences.
- [16] [http://vivienfrederic.free.fr/terminaleES/chapitre2\\_statistiques\\_ajustements.pdf](http://vivienfrederic.free.fr/terminaleES/chapitre2_statistiques_ajustements.pdf)
- [17] Serge Mehl - [www.chronomath.com](http://www.chronomath.com)

## REFERENCES DES IMAGES

- 1) Vehicle Crashworthiness And Occupant Protection. American Iron and Steel Institute.
- 2) M. Frédéric, Simulation numérique de l'emboutissage par Approche Inverse. Presentation d'un modèle basique. Renault.
- 3) L. Genest, Paramétrage de forme pour l'optimisation du soubassement. RMTI Renault Nissan.
- 4) X.W. Zhang, Q.D. Tian, T.X. Yu, Axial crushing of circular tubes with buckling initiators. Elsevier.
- 5) <http://www.renault.com/fr/pages/home.aspx>
- 6) <http://us1.webpublications.com.au/>
- 7) <http://www.tf1.fr/auto-moto/actualite/crash-tests-euroncap-renault-captur-et-chevrolet-trax-a-cinq-7978240.html>

## ANNEXES

### 1) LA METHODE DE L'INTEGRATION EXPLICIT

Breve explication sur le schéma d'intégration :

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \sigma(\vec{u}) : \boldsymbol{\varepsilon}(\hat{\vec{u}}) dV + \int_{\Omega} c. \hat{\vec{u}} . \dot{\vec{u}} d + \int_{\Omega} \rho . \hat{\vec{u}} . \ddot{\vec{u}} dV \\ = \int_{\Omega} \overrightarrow{f_{vol}} . \hat{\vec{u}} . dV + \int_{\Omega} \overrightarrow{f_{surf}} . \hat{\vec{u}} . \vec{u} dV \end{aligned} \quad (1)$$

Etant la somme de l'énergie interne de déformation, de l'énergie d'amortissement (plus les pertes thermiques) et de l'énergie cinétique égal aux efforts volumétriques et surfaciques.

Après une discrétisation, on a :

$$\overline{K} . \vec{u} + \overline{C} . \dot{\vec{u}} + \overline{M} . \ddot{\vec{u}} = \vec{F} \quad (2)$$

Où  $\overline{K}$ ,  $\overline{C}$  et  $\overline{M}$  sont matrices de raideur, amortissement et masse respectivement.

En considérant la force interne comme la somme de la partie rigide et amortissant, on a :

$$\overline{K} . \vec{u} + \overline{C} . \dot{\vec{u}} = \overrightarrow{F_{int}} \quad (3)$$

Donc, les équations suivantes expriment la relation de mouvement pour formulation des éléments finis.

$$\overline{M} . \ddot{\vec{u}} = \overrightarrow{F_{ext}} - \overrightarrow{F_{int}} \quad (4)$$

$$\ddot{\vec{u}} = \overline{M}^{-1} (\overrightarrow{F_{ext}} - \overrightarrow{F_{int}}) \quad (5)$$

La relation différentielle de l'équation (6) sert de base pour la résolution ensuite.

$$\dot{u} = f(u_n, t_n) = \frac{du}{dt} \quad (6)$$

On peut substituer la limite (7) dans l'équation (6) et obtenir la résolution (8).

$$\dot{u}_n = \frac{u_{n+1} - u_n}{\Delta t} \quad (7)$$

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t f(t_n, u_n) \quad (8)$$

Pour calculer les itérations il faut poursuivre un schéma des opérations, qui commence avec des éléments déjà connu pour arriver aux incognitos.

Les éléments qu'on sait la valeur sont : l'incrément de temps  $\Delta t$ , la vitesse  $\dot{u}_{n-1/2}$ , la position  $u_n$ , la contrainte  $\sigma_{n-1}$  et la variation de déformation  $\dot{\epsilon}_{n-1/2}$ .

Avec l'équation (5) précédente, on peut faire le calcul de l'accélération  $\ddot{u}_n$ . La vitesse peut être trouvée à l'instant  $t_{n+1/2}$ , grâce à l'accélération  $\ddot{u}_n$  et la vitesse  $\dot{u}_{n-1/2}$ .

En utilisant l'équation (8), la position  $u_{n+1}$  peut être calculée et, donc, la répétition incrémentale se fait possible à chaque pas pour résoudre le problème. Le schéma de résolution est montré dans la figure 1. Toutefois, il faut encore regarder la stabilité de quelques formules pour assurer la bonne obtention de résultats.

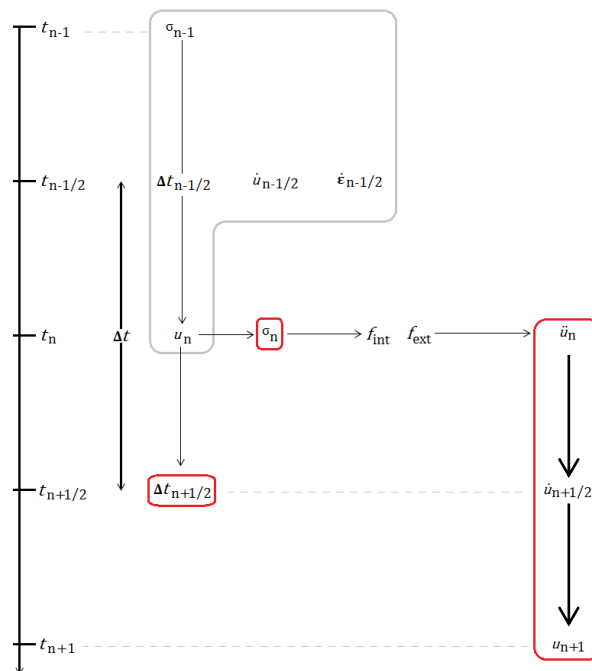


Figure - Schéma de résolution (En gris, la partie déjà connu et en rouge, les résultats).

## 2) NUAGE DE POINTS ET LOI DE PARETO

*En principe, on a une série statistique à deux variables :*

On suppose que, suite à une étude faite, on s'intéresse à deux caractères quantitatifs (i.e. deux variables numériques) sur une population donnée. À chaque individu de cette population, on associe donc un couple  $(x_i ; y_i)$  de nombres réels où la variable  $x_i$  est la valeur de la première variable pour l'individu considéré et où la variable  $y_i$  est la valeur de la seconde variable.

L'ensemble de ces couples forme une série statistique à deux variables ou encore série statistique double. Les résultats peuvent être résumés dans un tableau :

|              |       |       |     |       |
|--------------|-------|-------|-----|-------|
| Valeur $x_i$ | $x_1$ | $x_2$ | ... | $x_n$ |
| Valeur $y_i$ | $y_1$ | $y_2$ | ... | $y_n$ |

*Nuage de points :*

Dans un repère orthogonal bien choisi, l'ensemble des points  $M_i$  de coordonnées  $(x_i ; y_i)$ , avec  $1 \leq i \leq n$ , est appelé *le nuage de points* associé à cette série statistiques à deux variables.

*Loi de Pareto :*

La loi de Pareto exprime que le nombre  $N$  de contribuables soumis à un impôt  $r$  sur le revenu, dans une société donnée et pour une période donnée, est une fonction puissance décroissante du revenu, c'est dire qu'il existe deux nombres positifs  $a$  et  $k$  tel que :

$$N = \frac{k}{r^a} \quad (1)$$

*Exemple d'utilisation de la Loi de Pareto :*

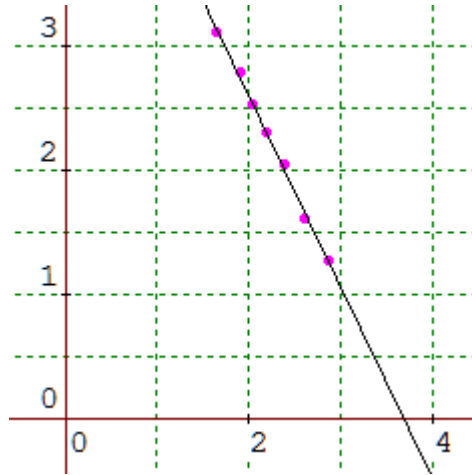
Une étude statistique portant sur le revenu annuel des contribuables soumis à l'impôt sur les salaires en 1984 dans un pays X... d'Afrique francophone faisait ressortir le tableau suivant :

| revenus $r_i$ en<br>milliers de francs<br>CFA | centre | $X_i = \log r_i$ | nombre $N_i$ de<br>contribuables<br>(en milliers) | $Y_i = \log N_i$ |
|---|--------|------------------|---|------------------|
| [30 , 60[                                     | 45     | 1,653            | 1286  | 3,109            |
| [60 , 100[                                    | 80     | 1,903            | 612   | 2,787            |
| [100 , 120[                                   | 110    | 2,041            | 337   | 2,528            |
| [120 , 200[                                   | 160    | 2,204            | 201   | 2,303            |
| [200 , 300 [                                  | 250    | 2,398            | 113   | 2,053            |
| [300 , 500[                                   | 400    | 2,602            | 41  | 1,613            |
| [500 , 1000[                                  | 750    | 2,875            | 19  | 1,279            |
| Plus de 1000                                  | ///    | ///              | 9   | 0,954            |

En utilisant le logarithme décimal ( $\log$ ) et 2 cm comme unité en abscisse et ordonnée, on représente le nuage de points  $M_i(X_i, Y_i)$  définis par :

$$X_i = \log r_i, Y_i = \log N_i \quad (2)$$

On constate, ci-contre, un très bon alignement de ces points.



En ajustant ce nuage par la droite de Y en X par la méthode des moindres carrés on obtient rapidement (arrondis à  $10^{-4}$ ) :

$$Y = -1,5315 X + 5,6686 \quad (3)$$

Résultat que nous arrondissons au centième, soit :

$$Y = -1,53X + 5,69 \quad (4)$$

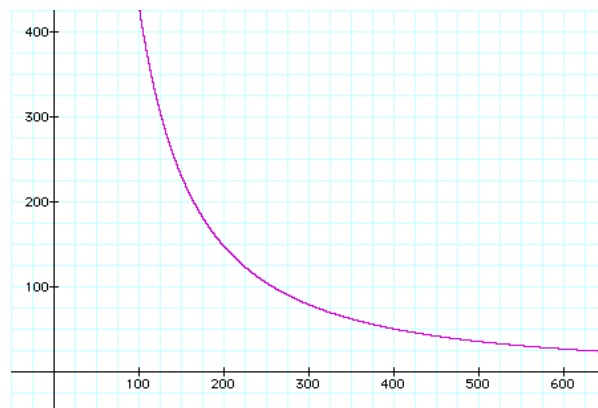
c'est à dire en fait :

$$\log N = -1,53 \log(r) + 5,69 = \log(r^{1,53}) + 5,69 \quad (5)$$

On en déduit :

$$N = r^{-1,53} \times 10^{5,69} \cong 489779 / r^{1,53} \quad (6)$$

Et, en dessous, la représentation de N en fonction de r : la courbe s'ajuste parfaitement aux données.





## RESUME

La sécurité est une prestation de grande importance dans l'industrie automobile aujourd'hui. Une fois que l'accident devient inévitable, entre en jeu la sécurité passive, responsable pour réduire les effets de la collision transférées aux occupants et les piétons. Pour évaluer la tenue en crash frontal, il existe quelques tests comme le BFR de l'Euro NCAP. Au cours du choc, le longeron du véhicule a un rôle essentiel dans l'absorption d'énergie. Sa conception doit être de manière à bien guider l'écrasement et puis son plissement, en ajoutant des triggers. Sachant que l'addition « d'imperfections » appropriées (triggers) peut atténuer l'effort maximum pendant l'écrasement, minimiser la charge transférée aux autres structures, dissiper le maximum d'énergie et contrôler le mode d'effondrement, il faut savoir où les placer avec toutes les dimensions caractéristiques afin d'avoir un résultat plus efficient. Quatre méthodes ont été définies pour, conjointement, avoir une compréhension le plus proche possible de la réalité : analytique, vibratoire, gestion de l'emboutissage et optimisation. Avec les *springs* de mesure du niveau d'effondrement, un mode de contrôle d'écrasement est devenu possible. Et l'optimisation de la position et dimensions des triggers est indispensable pour avoir un comportement contrôlé et plus efficace du longeron avant en cas de collision frontal.

**Mots-clefs :** paramétrage, optimisation, crash, longeron, triggers, nervures...

## ABSTRACT

Security is of great importance in the automotive industry today. After the accident is inevitable, comes in the passive safety, responsible for reducing the effects of collision pass to the occupants and pedestrians. To evaluate the resistance to frontal crashes, there are some tests like BFR of Euro NCAP. During the impact, the spar member of the vehicle has a key role in the energy absorption. The design must be such to properly guide the crash and then her folding, by adding triggers. Knowing that the appropriate addition of "imperfections" (triggers) can reduce the maximum force during the crash, minimize the load transferred to other structures, dissipate more energy and control the mode of collapse, we must know how to place them with characteristic dimensions in order to have a more efficient outcome. Four methods have been developed to get the closest possible to the real behavior: analytical, vibration, management of stamping and optimization. With springs for measuring the level of collapse, a control mode of crush became possible. And optimize the position and dimensions of triggers are therefore essential to have a controlled and efficient behavior of the front spar in a frontal collision.

**Key words:** parameter setting, optimization, crash, spar, triggers...