

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**  
**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE FRERES MENTOURI-CONSTANTINE 1**  
**FACULTE DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

N° ordre : ...../Doct/2021

N° série : ...../GM/2021

**THESE**

Présentée en vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences :  
Génie Mécanique : Option Construction

**Contribution à l'étude numérique par éléments finis  
et caractérisation expérimentale d'un airbag gonflable  
hyper-élastique soumis à des sollicitations multiaxiales**

**Par :**

**BENDJABALLAH DRISS**

**Soutenue le : 17/02/2022**

Devant le jury composé de :

Président :

**Mr. S. BENISSAAD**

Prof. Université Frères Mentouri-Constantine1

Rapporteur :

**Mr. A. BOUCHOUCHA**

Prof. Université Frères Mentouri-Constantine1

Examineurs :

**Mr. B. NECIB**

Prof. Université Frères Mentouri-Constantine1

**Mr. M. MELLAS**

Prof. Université de Biskra

**Mr. B. MAMEN**

M. C.A. Université de Khenchela

# Résumé de thèse

---

## **I.1. Résumé**

L'étude réalisée se focalise essentiellement sur l'analyse numérique par éléments finie du déploiement libre d'un airbag standard durant une collision frontale. Dans ce contexte, des modèles numériques éléments finis ont été développés pour simuler le déploiement d'un airbag conducteur soumis à des sollicitations multiaxiales pouvant entraîner de grandes déformations. De Plus, l'écrasement des sacs gonflables par un impacteur à grande vitesse a aussi été analysé. Pour ce faire, des tests préliminaires de traction ont été réalisés afin de déterminer les caractéristiques mécaniques en traction uni-axiale des différents matériaux retenus dans cette étude. Les simulations proposées pour simuler un choc frontal ont été effectuées à l'aide du code de calcul LsDyna. Le modèle développé a permis d'analyser et comparer le déploiement des airbags de trois grands constructeurs. Le deuxième volet comporte les simulations numériques par éléments finis du comportement du conducteur d'automobile lors des phases de pré-crash. L'analyse prend en compte l'évolution de la position du mannequin ceinturé ou pas après une collision afin d'analyser l'efficacité des systèmes de sécurité misés dans un véhicule touristique pour protéger les passagers. L'ensemble des résultats des simulations numériques ont été validés par confrontation expérimentale.

**Mots-clés :** Collision frontale, traction, Airbags, Matériaux, Simulations numériques, Eléments finis.

## **I.2. Abstract**

The study carried out focuses mainly on numerical analysis by finite elements of the free deployment of a standard airbag during a frontal collision. In this context, digital finite element models have been developed to simulate the deployment of a driver airbag subjected to multiaxial stresses that can cause large deformations. Then, the crash of the air bags by a high-speed impact was also analyzed. To do this, preliminary tensile tests were carried out in order to determine the mechanical characteristics in uni-axial traction of the different materials used in this study. The simulations proposed to simulate a frontal impact were carried out using the Ls Dyna calculation code. The model developed made it possible to analyze and compare the deployment of airbags from three major manufacturers. The second part includes digital finite element simulations of the driver's behavior during the pre-crash phases. The analysis takes into account the evolution of the position of the belted or not belted manikin after a collision in order to analyze the effectiveness of the security systems put in a tourist vehicle to protect the passengers. All the results of the numerical simulations have been validated by experimental comparison.

**Keywords:** Frontal collision, Airbags, Traction, Materials, Numerical simulations, Finite elements.

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Le trafic routier est devenu de plus en plus dense et dangereux pendant ces dernières années et présente un des grands facteurs des accidents de la route [1-3]. Cependant, la réduction de ces accidents est devenue un des objectifs de la politique des transports dans le monde. D'après l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), les accidents de la route sont considérés comme un problème majeur de santé publique qui risque d'augmenter de 65% les décès et les traumatismes entre 2000 et 2020 si aucune nouvelle action de prévention n'est entreprise [4-7]. Cette augmentation du nombre de tués et de blessés s'explique par la dynamique du développement économique qui implique directement la mise en place de systèmes de transport qui soient denses et performants. Dans ce contexte, la sécurité routière est devenue de plus en plus un sujet de préoccupation majeure tant pour les industriels d'automobiles que pour le grand public. En mettant en évidence les risques encourus par les usagers en cas d'un accident de la route, les constructeurs automobiles cherchent essentiellement à améliorer les performances de leurs véhicules de manière à assurer que ces voitures protègent bien leurs passagers [8-11].

Actuellement ; il existe au moins deux approches pour la sécurité routière. D'une part, la première approche considère trois points de vue : la sécurité primaire qui s'intéresse à réduire le nombre d'accidents par leur prévention, puis, la sécurité secondaire qui cherche à augmenter la protection des passagers à l'intérieur du véhicule et enfin, la sécurité tertiaire se focalise essentiellement sur l'amélioration des secours après accident. Et d'autre part, la seconde approche fait la distinction entre la sécurité active et la sécurité passive [12-15]. En effet, la première a pour but de réduire au maximum le risque d'accident de la route, tandis que la deuxième permet d'en limiter les dégâts. Et si ces deux catégories sont différentes, elles sont surtout complémentaires, dans un but de réduire les risques d'accident de la route, ou bien d'essayer de réduire les conséquences si l'accident ne peut pas être évité. Cependant, l'apparition des systèmes de sécurité tels que la ceinture et les airbags ont permis de diminuer le nombre de tués sur les routes [16,17]. Dans ce contexte de sécurité passive, les industriels ont donc besoin d'effectuer des essais complémentaires en matière de sécurité afin de s'assurer de la fiabilité de ces

équipements. Or, construire des prototypes physiques est long et coûteux. La simulation numérique apporte donc une réponse à ce problème en répond aux exigences de fiabilité, de sécurité et de conformité aux normes. Différents types de modèles multi-physiques ont vu le jour ces dernières années [18-21]. L'une d'entre elle repose sur la méthode des éléments finis et permet une description détaillée du véhicule, du corps humain et/ou des sacs gonflables. Ces modèles permettent globalement de réaliser une étude locale du comportement dynamique du corps et plus particulièrement la simulation numérique de la déformation de la structure humaine lors d'un accident de la route.

L'objectif principal de la thèse est d'étudier le comportement dynamique d'un conducteur adulte de sexe masculin lors d'un accident de la route et sur la sécurité passive dans les véhicules touristiques. Ceci a été rendu possible grâce au développement d'un modèle numérique à l'aide de la méthode des éléments finis. Le fait que notre modèle représente le corps humain de manière à permettre une meilleure compréhension du comportement humain lors d'un choc qu'un mannequin physique. Cette approche s'appuie essentiellement sur une méthodologie qui tient compte des interactions entre le conducteur, l'habitacle intérieur du véhicule et l'airbag. Cette thèse s'articulera ainsi en cinq chapitres :

Le premier chapitre a été consacré à l'étude bibliographique sur la sécurité routière afin de mettre en évidence la richesse de la recherche dédiée à la sécurité routière dans le domaine de l'automobile. Par ailleurs, elle décrit d'une part, l'évolution des simulateurs automobiles, et d'autre part, elle présente les différentes formes de sécurité dans l'automobile.

Le deuxième chapitre s'intéresse aux différents types d'airbags intégrés dans un habitacle de voitures touristiques. Leurs principes de déploiement, et les éléments de sécurité dédiés au bon fonctionnement de ces airbags tels que : le calculateur, le générateur de gaz, le système de déclenchement, et d'un coussin gonflable. De plus, ont été présentés leurs principes de fonctionnement et leurs avantages et leurs inconvénients ont été évoqués.

Le troisième chapitre décrit les matériaux et les techniques expérimentales utilisés dans cette étude. Des éprouvettes en forme d'haltères ainsi que des éprouvettes parallélépipédiques ont été réalisées par usinage mécanique ou obtenues par découpage de tissus puis testées sur une machine de traction.

Les essais de traction ont permis de déterminer essentiellement les propriétés mécaniques nécessaires pour analyser le comportement des matériaux étudiés. Sur la base de ces essais, des paramètres de lois de comportement des modèles ont été donc mis en place dans un code de calcul de structure LsDyna®.

Le quatrième chapitre présente les résultats concernant la validation de l'étude numérique. Cette validation porte sur la comparaison de cas dits simples avec des essais expérimentaux. Dans un premier temps, un modèle numérique 3D destiné à prédire le gonflement d'un airbag conducteur a été développé. Dans un second temps, des tests d'écrasement d'airbags par impacteur, à grande vitesse ont été mis en place pour étudier les performances de ces dispositifs et déterminer la distance de sécurité minimale qui doit séparer un passager de son coussin gonflable pour assurer son sécurité.

Le cinquième chapitre présente des simulations numériques réalisés pour étudier le comportement dynamique du conducteur lors d'un accident de la route. Plusieurs scénarios ont été simulés pour étudier la réponse mécanique globale d'un mannequin ceinture ou vulnérable lors d'un choc frontal.



## Références

- [1] F. Robache, Évaluation sur simulateur de conduite du comportement humain en situation de pré-crash: application à l'amélioration des airbags, Thèse soutenue à l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2017.
- [2] R. Desbats, Analyse du comportement de l'abdomen lors d'un choc automobile pour l'amélioration de la bio-fidélité et de la prédiction des lésions abdominales par le mannequin de choc THOR. Thèse soutenue à l'Université Claude Bernard Lyon 1, 2016.
- [3] K. Messoudene, Dispositif Innovant de Frein Automobile par le Volant, Intégré à un Système de Direction Type Steer-by-Wire, Thèse soutenue à l'Université d'Evry-Val d'Essonne, 2011.
- [4] <https://www.educasante.org/connaissances/epidemiologie/les-traumatismes-une-problematique-de-sante-publique/situation-en-europe/>
- [5] <http://www.childsafetyeurope.org/reportcards/info/child-safety-report-cards-2012-pr-fr.pdf>
- [6] [http://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0006/158181/Policy-Briefieng-9-Risk-taking-and-injuries-among-young-people.pdf](http://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0006/158181/Policy-Briefieng-9-Risk-taking-and-injuries-among-young-people.pdf)
- [7] <http://www.childsafetyeurope.org/archives/news/2014/info/ciir-report.pdf>
- [8] M.M. Ahmed, R. Franke, K. Ksaibati, D.S. Shinstine, Effects of truck traffic on crash injury severity on rural highways in Wyoming using Bayesian binary logit models, *Accid. Anal. Prev.*, Vol. 117, pp. 106-113, 2018.
- [9] H. Yu, R. Yuan, Z. Li, G. Zhang, D. T. Ma, Identifying heterogeneous factors for driver injury severity variations in snow-related rural single-vehicle crashes, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 144, pp. 105587, 2020.
- [10] B. Han and J. H. Seo, "Analysis of vehicle rollover using multibody dynamics, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, pp. 797-802, 2016.
- [11] M. R. Seyedi, S. Jung, Numerical assessment of occupant responses during the bus rollover test: A finite element parametric study, *J. of Automobile Engineering*, 2019, <https://doi.org/10.1177/0954407019894425>
- [12] T. Kapoor, W. Altenhof, A. Snowdon, A. Howard, J. Rasico, F. Zhu, D. Baggio, A numerical investigation into the effect of CRS misuse on the injury potential of children in frontal and side impact crashes, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 43, pp. 1438-1450, 2011.

- [13] N. Li, H. Fang, C. Zhang, M. Gutowski, E. Palta, Q. Wang, A numerical study of occupant responses and injuries in vehicular crashes into roadside barriers based on finite element simulations, *Advances in Engineering Software*, Vol. 90, pp. 22-40, 2015.
- [14] M. R. Seyedi, S. Jung, Numerical assessment of occupant responses during the bus rollover test: A finite element parametric study, *J. of Automobile Engineering*, 2019, <https://doi.org/10.1177/0954407019894425>
- [15] T. Tan, M. Mongiardini, R. Grzebieta and G. Mattos, Reconstruction of a Rollover Crash for Thoracic Injury Etiology Investigation, *Safety*, Vol. 3, 2017, doi:10.3390/safety3040027
- [16] Observatoire national interministériel de sécurité routière. "Les accidents corporels de la circulation routière - les résultats de juillet 2009". Vol. 3, pp. 7, 2009.
- [17] S. Potula, K.N. Solanki, D.L. Oglesby, M.A. Tschopp, M.A. Bhattia, Investigating occupant injuries and safety through simulating the interaction between side curtain airbag deployment and an out-of-position occupant, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 49, pp. 392-403, 2012.
- [18] N. Li, H. Fang, C. Zhang, M. Gutowski, E. Palta, Q. Wang, A numerical study of occupant responses and injuries in vehicular crashes into roadside barriers based on finite element simulations, *Advances in Engineering Software*, Vol. 90, pp. 22-40, 2015.
- [19] S. W. Kirkpatrick, Development and validation of high fidelity vehicle crash simulation models, *SAE Trans*, Vol. 109, pp. 872-881, 2000.
- [20] T. Serre, M. Llari, Numerical analysis of the impact between a PTW rider and a Car in different accident configuration *IFMBE Proc.*, Vol. 31, 2010.
- [21] J.K. Yang, P. Lövsund, C. Cavallero, J. Bonnoit A human-body 3D mathematical model for simulation of car-pedestrian impacts, *J. Crash Prev. Inj. Control*, Vol. 2, pp. 131-149, 2000.

# **Chapitre I : Étude bibliographique**

---

## I.1. Introduction

Au début du XX<sup>ème</sup> siècle, l'humanité a connue une révolution dans le domaine des transports, notamment dans celui de l'aviation [1-4]. Les commandes des premiers avions étaient particulièrement difficiles à appréhender, et l'issue d'une erreur de pilotage souvent était fatale. En effet, la persistance d'accidents en conditions de vol sans visibilité restait toutefois un problème majeur pour les industriels. Dans ce contexte, les ingénieurs dans le domaine de l'aéronautique ont eu l'idée de concevoir et de développer des simulateurs d'entraînement, afin de répéter les manœuvres de base en toute sécurité [5-7]. Un des premiers systèmes conçus, le simulateur d'Antoinette qui permettait au pilote de se familiariser et de bien contrôler les commandes de l'appareil (Fig. I.1). Le pilotage de l'avion s'effectuait au moyen de volants situés de part et d'autre du cockpit. Ce système a permis de rendre le contrôle peu naturel malgré quelques difficultés liées à la manœuvre, d'où la nécessité d'un entraînement important avec ces simulateurs pour maîtriser les effets [8-11].



**Figure I.1.** Simulateur d'Antoinette de la société LEVASSEUR [12,13]

Les simulateurs ont donc été conçus et non pas cessé d'être perfectionnés au cours des dernières décennies. Les guerres ont largement contribué aux nombreux progrès technologiques introduites dans ces simulateurs. À l'aube de la deuxième guerre mondiale, Edwin Link était le premier à développer un simulateur aéronautique équipé d'actuateurs électropneumatiques répondant aux commandes du pilote [14]. Ce système fera partie intégrante de la formation initiale de nombreux

stagiaires pilotes jusque dans les années soixante [15]. Cette nouvelle génération de simulateurs a permis de reproduire une situation réelle pour garantir un réalisme de la formation. Les applications d'abord ont été réservées au domaine de l'aviation militaire et surtout à la conquête spatiale puis, ils sont devenus accessibles aux industriels, principalement dans l'industrie de l'automobile et aussi aux chercheurs. En ce qui concerne l'industrie automobile, c'est Volkswagen qui a construit dans les années soixante-dix, le premier simulateur dynamique avec 3 degrés de liberté. Puis, en 1985 Mazda améliore le concept avec 4 degrés de liberté et la même année Daimler-Benz présente son premier modèle doté de 6 degrés de liberté équipé d'un logiciel qui permet d'analyser en temps réel les réactions des conducteurs en situation de conduite stressante (Fig. I.2). Ce niveau de réalisme correspond au standard atteint par la plupart des constructeurs et grands instituts de recherche jusqu'en 2000 [16].

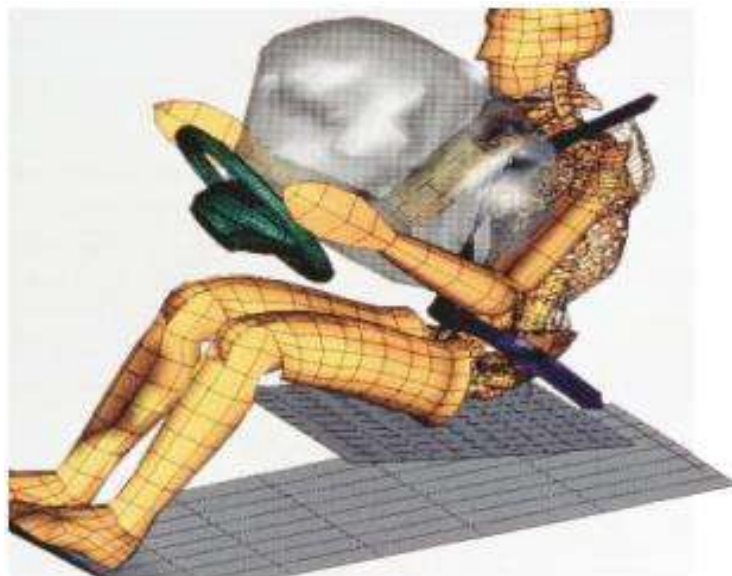


**Figure I.2.** Simulateur 3D pour analyser les réactions des conducteurs en situation d'urgence [16]

Avec l'invention du transistor dans les années cinquante, puis du microprocesseur dix ans plus tard ont donné naissance à l'informatique et à l'apparition des premiers calculateurs numériques. En effet, le coût de plus en plus élevé de cette génération de simulateurs avec souvent une utilisation très limitée pour envisager plusieurs scénarios de collision a conduit les ingénieurs à développer des simulateurs virtuels et interactifs. L'enjeu économique était tellement très important pour le développement technologique de l'industrie de l'automobile avec le respect des nouvelles normes internationales dans le domaine de la protection des occupants des véhicules ont conduit ces industriels à s'y adapter rapidement. Ceci a enfin permis aux ingénieurs de concevoir des simulateurs virtuels qui permettent de

reproduire sur un ordinateur une collision entre deux véhicules de façon très réaliste, grâce aux développements de plusieurs codes de calculs. Le domaine de la simulation a finalement vu le jour et a trouvé rapidement dans ces technologies les moyens qu'il lui manquait pour réellement émerger. Grâce à ces progrès, les ingénieurs ont pu enfin mettre au point une nouvelle génération de simulateurs très réalistes. Leur seule difficulté était principalement d'évaluer, si le dispositif auquel il a accès, le stagiaire pilote, était en adéquation avec l'expérimentation qu'il souhaite effectuer, et si les paramètres mesurés sont sensibles aux limites de la simulation.

Dans ce contexte, différents types de simulateurs numériques ont dès lors vu le jour ces dernières années, dans un but de concevoir des voitures de plus en plus sûres afin de réduire la gravité et le nombre d'accidents de la route [17-19]. L'une d'entre elle repose sur la méthode des éléments finis et permet une description fine du corps humain. Elle est basée sur une représentation géométrique tridimensionnelle du corps découpé en un nombre fini d'éléments triangulaires et/ou quadrangulaires surfaciques ou volumiques (Fig. I.3). Ces modèles permettent une étude plus locale du comportement du corps et plus particulièrement la simulation de la déformation de la structure du véhicule, le déploiement des airbags, les différentes possibilités de traumatisme et les mécanismes lésionnels des passagers en fonction de plusieurs scénarios de collision. Ces modèles ont permis aux industriels d'envisager de nombreuses solutions pour améliorer la sécurité des passagers.



**Figure I.3.** Discrétisation volumique par la méthode des éléments finis d'un modèle 3D avec déploiement d'un airbag suite à une collision [20].

## **I.2. Evolution des dispositifs de sécurité dans la voiture**

La voiture était à peine née qu'il fallait déjà la pourvoir de dispositifs de sécurité. Certes, les premiers équipements répondaient au bon sens. L'automobile reprit l'éclairage à acétylène des carrosses, ainsi que leur système de freinage rudimentaire à patins. Mais ce système étant incompatible avec les bandages en caoutchouc, l'automobile adopta très rapidement des freins à rubans, puis à tambours. Le système de freinage ne fut adopté qu'à partir de 1910 environ, après qu'une première tentative de réalisation de freins à disque fut apparue en 1902 sur une Lancaster Lanchester 18 HP [21]. L'évolution de la circulation avec des véhicules de plus en plus rapides suscitèrent l'apparition de nouveaux équipements de sécurité, jusqu'aux années 1950, essentiellement pour améliorer la vision. Des systèmes de sécurité ont vu les jours tels que le rétroviseur, les essuie-glaces, les feux de croisement et de brouillard, puis les clignotants [22, 23]. En 1944, Volvo commercialisa le premier pare-brise en verre feuilleté, ce qui évitait son éclatement en cas d'impact. L'intégration de technologies telles que l'électricité et l'hydraulique facilita l'utilisation de quelques équipements de sécurité. Notons par exemple la commande hydraulique des freins apparue en 1921, l'assistance de freinage ou le servofrein de Renault en 1923, le freinage par double circuit en diagonale proposé par Volvo en 1966, l'essuie-glace à moteur électrique en 1926 et le dégivrage du pare-brise mise en place par Volvo. Tout ces dispositifs et d'autres entre dans la catégorie des systèmes de sécurité qui garantissent la stabilité l'aptitude routière du véhicule et donnent ainsi une sécurité et un confort aux passager.

## **I.3. La sécurité dans l'automobile**

Pour exercer la sécurité automobile on doit prendre en compte non seulement le véhicule et le comportement du conducteur au volant mais également l'environnement routier tels que les infrastructures, les conditions météo, les réseaux de communication, etc. La sécurité automobile recouvre essentiellement deux aspects, réglementés tout en constituant un domaine de différenciation : la sécurité active et la sécurité passive. La première regroupe tous les systèmes qui permettent d'éviter l'accident ou pour réduire la gravité d'un accident inévitable tandis que la seconde a pour rôle de réduire les conséquences d'un accident lorsque celui-ci n'a

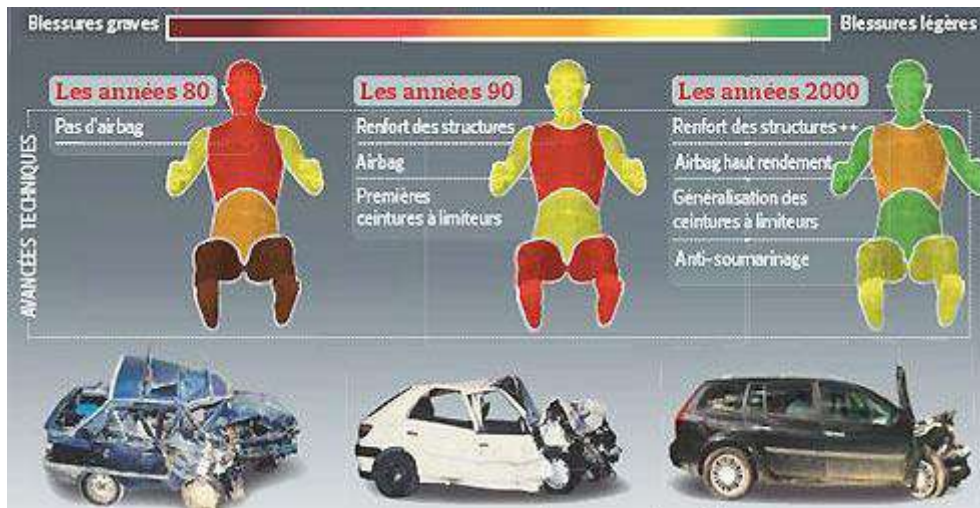
pu être évité [24-26]. Elle est conçue pour protéger les occupants d'un véhicule lors d'un accident.

### **I.3.1. La sécurité active**

Les caractéristiques de sécurité active contribuent à prévenir ou minimiser les accidents de la route. Les caractéristiques de sécurité active et utilisent divers moyens pour contribuer à éviter un accident. Certaines caractéristiques, comme le système anticollision et le système d'avertissement de sortie de voie, déclenchent un dispositif d'avertissement du conducteur en cas de situation potentiellement dangereuse (Fig.I.4). D'autres dispositifs de sécurité, comme le dispositif de contrôle électronique de la stabilité du véhicule et l'assistance au freinage, surveillent les pneus et le système de freinage du véhicule afin d'adapter le freinage en fonction de l'évolution de la situation dans un but d'éviter une collision. D'autres caractéristiques de sécurité fournissent une protection en cas d'erreur du conducteur. Par exemple, le système de priorité des freins intervient pour désactiver la pédale d'accélérateur dans l'éventualité où la pédale de frein et la pédale d'accélérateur seraient enfoncées simultanément.

La sécurité active a pour rôle de surveiller en permanence un ou plusieurs aspects du véhicule afin de détecter les dangers potentiels. Elle agit discrètement en arrière-plan, pour vérifier la vitesse des pneus, la position réelle du véhicule dans sa voie de circulation, ou la position des pédales de frein et d'accélérateur l'une par rapport à l'autre. Lorsqu'un problème est détecté, les caractéristiques de sécurité active interviennent de façon autonome pour corriger la situation en toute sécurité.





**Figure I.4.** Evaluation des lésions graves à mortelles du conducteur ceinturé en choc frontal [27].

Les éléments de sécurité active ont essentiellement pour objectif de donner toutes les aides à la conduite possible pour éviter qu'un accident se produise. Ce sont par exemple, le système antiblocage des roues ABS (Anti Blocking System), le système de contrôle de la trajectoire ESP (Electronic Stability Program), l'assistant de freinage d'urgence BAS ou encore l'anti-patinage. La sécurité active regroupe plusieurs familles de systèmes :

- la sécurité conditionnelle a pour but d'éliminer les éléments pouvant perturber la concentration du conducteur, par exemple les nuisances sonores et vibratoires ;
- la sécurité de perception rassemble les systèmes qui permettent une bonne appréhension de l'environnement et qui améliorent la détection du véhicule par les autres usagers ;
- la sécurité de commande regroupe tout ce qui permet de diminuer la charge de travail du conducteur. Ceci passe par une ergonomie optimisée et par une simplification des tâches physiques et mentales dévolues au conducteur ;
- la sécurité de conduite regroupe toutes les technologies qui permettent d'obtenir le meilleur comportement dynamique possible dans toutes les situations et donc principalement les liaisons au sol et les systèmes de freinage.

### I.3.2. La sécurité passive

Les caractéristiques de sécurité passive aident principalement à protéger les occupants contre les blessures graves en cas de collision. Contrairement aux fonctions de sécurité active qui ont pour but de prévenir les accidents ou d'en atténuer la gravité. La sécurité passive a pour principale raison d'être la protection du conducteur et des passagers contre les diverses forces qui s'exercent lors d'une collision. Les véhicules modernes comportent une zone protégée dite « *espace vital* » qui entoure les occupants et à l'intérieur de laquelle les chances sont maximales de se sortir d'un accident avec un minimum de blessures. Les caractéristiques de sécurité passive maximisent l'efficacité de cette protection et maintiennent les occupants à l'intérieur de la zone pendant toute la durée de la collision : grâce à des systèmes intégrés dans cet espace vital tel que les ceintures de sécurité, les coussins gonflables et les appuie-tête. Ce genre de caractéristiques et d'équipements réduisent le risque de blessures graves et permettent au conducteur et aux passagers de sortir vivants de la collision (Fig.I.5). C'est à l'extérieur de cet espace vital que les blessures les plus graves peuvent être inévitables. Par exemple, si le conducteur ne porte pas sa ceinture de sécurité, il peut se voir projeter hors de la zone de sécurité du véhicule et frapper le pare-brise ou d'autres surfaces dures de l'habitacle. Si la collision est particulièrement violente, il peut même se faire éjecter du véhicule.



**Figure I.5.** Eléments de renfort mis dans la structure d'un véhicule pour l'aider à bien absorber de l'énergie lors d'une collision.

Le bon fonctionnement de ces éléments de sécurité passive est assuré par l'intégration des capteurs qui aident à la mesure d'une décélération très rapide et déclenchent le détonateur de l'airbag et le prétensionneur de la ceinture. Dans cette configuration, les coussins gonflables se déclenchent afin de minimiser les dommages lors d'un choc entre les passagers et l'intérieur du véhicule.

#### **I.4. Les éléments de sécurité dans les véhicules**

Ce sont tous les équipements que possède un véhicule et qui permettent de garantir à la fois une conduite sécurisée et votre propre sécurité au sein du véhicule tels que les airbags, la ceinture de sécurité, les différents systèmes de freinage...

##### **I.4.1. Les airbags**

Il s'agit d'un dispositif de sécurité passive car il s'active après que l'accident a eu lieu.

Les airbags sont principalement utilisés dans les automobiles, pour protéger les passagers lors d'une collision et ainsi leur éviter de percuter violemment certains équipements de la voiture. Ils se déclenchent afin de minimiser les dommages lors d'un choc entre les passagers et l'habitacle intérieur du véhicule. L'airbag sort du volant ou du tableau de bord pour amortir le haut du corps des passagers qui risquent d'être projetés vers l'avant suite à un choc, une collision ou un accident de la route (Fig.I.6). L'airbag limite ainsi les blessures.



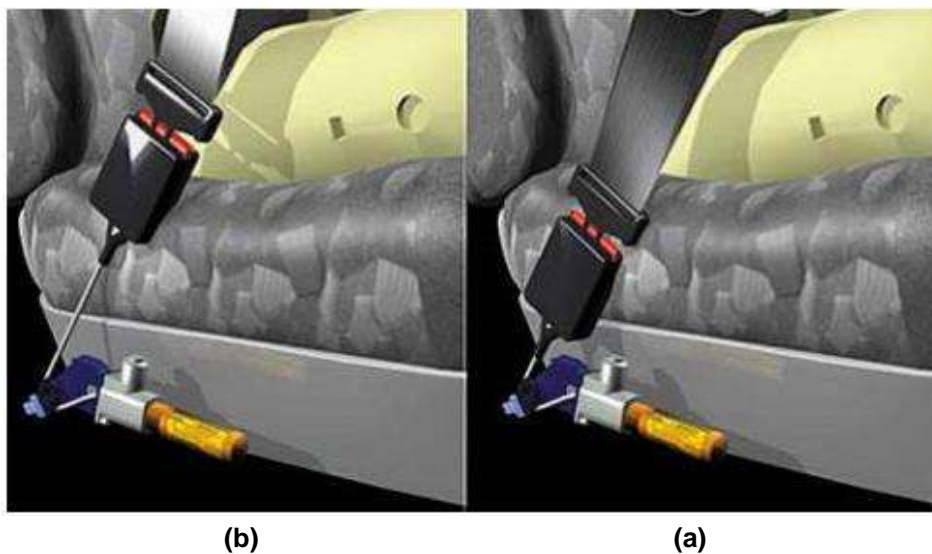
**Figure I.6.** Déploiement des airbags d'un véhicule lors d'une collision.

Cependant, l'éjection du coussin étant violente, il faut absolument avoir également la ceinture de sécurité, sans laquelle la personne projetée pourrait être

blescée au visage. On peut noter que le coussin sert essentiellement, au moment où le véhicule est déjà immobilisé puisque, le choc dure environ 1/10 de seconde, ou du moins a perdu une grande partie de sa vitesse.

#### **I.4.2. Les prétensionneur de ceinture**

Les prétensionneurs de ceinture font aussi partie de la sécurité passive des véhicules. C'est un système qui permet d'assurer au mieux le maintien du corps des passagers, en les maintenant serrés et bien plaqués contre les sièges. Ce système sert essentiellement à réduire la course morte de la ceinture de sécurité, et équipé d'un générateur de gaz avec une mise à feu déclenchée électroniquement (Fig.I.7).

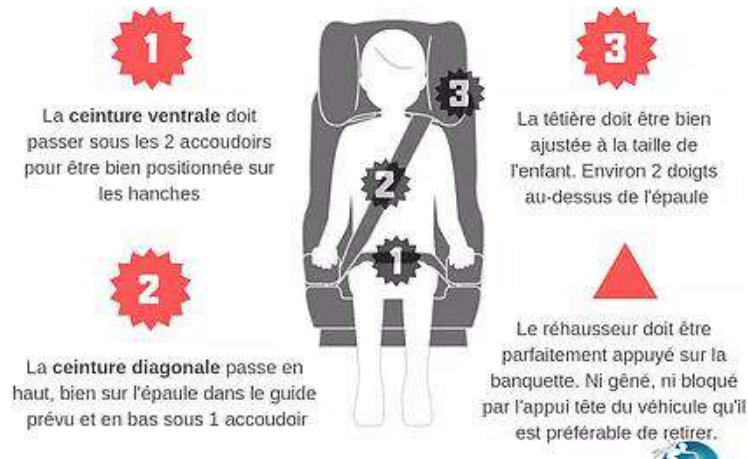


**Figure I.7.** Position du prétensionneur de ceinture de sécurité **(a)** avant le déclenchement des airbags, la ceinture est totalement libre, **(b)** après le déclenchement des airbags, la ceinture est tendue.

#### **I.4.3. La ceinture de sécurité**

La ceinture de sécurité est appelée aussi ceinture trois points, car elle permet de retenir le conducteur ou les passagers en s'appuyant sur trois os du corps : hanche droite, hanche gauche et clavicule (Fig.I.8). La ceinture est un dispositif de sécurité permettant de limiter les mouvements incontrôlables des passagers d'un véhicule, lors d'un choc. Ainsi, les occupants d'un véhicule en mouvement décélérant brutalement lors d'un choc, ne sont pas projetés contre des obstacles, par leur inertie. La ceinture de sécurité doit passer sur l'épaule, et non à la base du cou. La sangle basse doit appuyer sur les os du bassin qui peuvent supporter une pression considérable en cas de choc, contrairement au ventre qui est le centre d'organes vitaux.

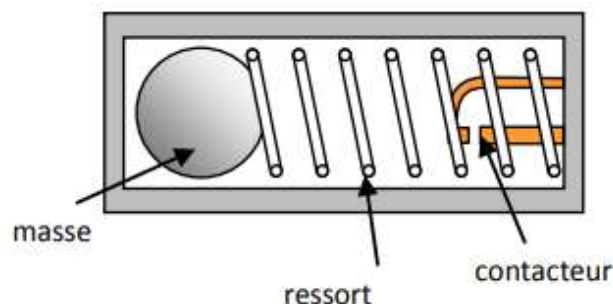
Les nouvelles normes de sécurité ont rendu le port de la ceinture obligatoire pour le conducteur et ses passagers. L'absence de ceinture de sécurité équivaut à une chute du troisième étage d'un immeuble, en cas de collision à une vitesse égale à 50 [km/h].



**Figure I.8.** Mode d'emploi de la ceinture de sécurité [28].

#### I.4.4. Le détecteur de l'impact

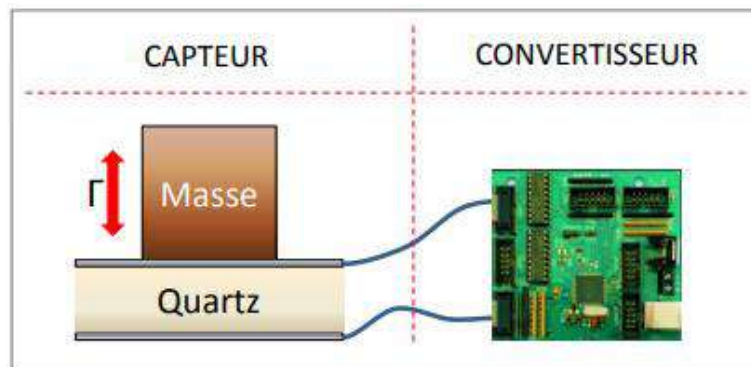
Les détecteurs d'impact sont des capteurs qui mesurent essentiellement le niveau de décélération subi par le véhicule. Ils sont positionnés à différents niveaux du véhicule, et dans plusieurs directions afin de définir au mieux le type d'impact auquel les systèmes de sécurité doivent s'adapter. À l'origine, le capteur électromécanique est constitué par une bille métallique dans un guide parallèle à l'axe de décélération de la voiture. Cette bille est repoussée par un champ magnétique, voire un ressort pour les systèmes les plus anciens (Fig.I.9). Lors d'une collision, la bille se déplace et provoque un contact électrique.



**Figure I.9.** Capteur à bille.

Ce type de capteur est maintenant remplacé par des capteurs électroniques beaucoup plus fiables, tels que les capteurs capacitifs MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System) et des accéléromètres piézoélectriques [30]. Le modèle suivant

est basé sur un quartz qui génère une tension lorsqu'on le comprime. Le convertisseur récupère les signaux électriques. Ils sont alors amplifiés et traités (Fig.I.10).



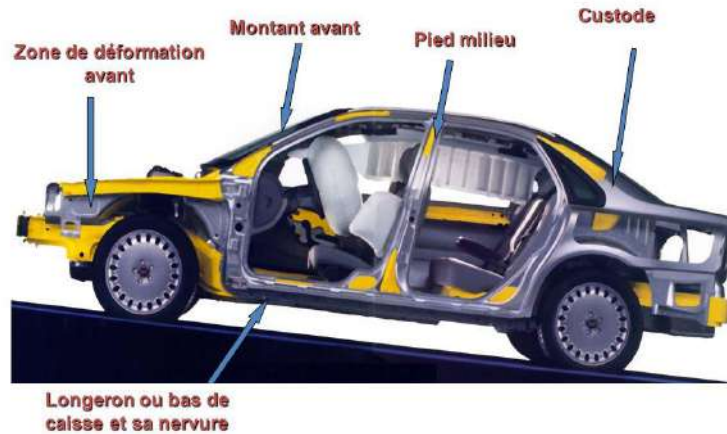
**Figure I.10.** Schéma d'un accéléromètre piézoélectrique [30].

#### **I.4.5. L'assistance au freinage d'urgence**

Ce système permet d'amplifier la force de freinage lors d'un freinage d'urgence en fonction de différents critères, notamment la vitesse d'appui sur la pédale de frein. Cela permet d'une part de gagner du temps et donc de la distance d'arrêt par une montée en pression rapide dans les freins et d'autre part d'assurer un freinage optimal. Certains conducteurs ayant tendance à vouloir relâcher la pression trop tôt lors d'un freinage d'urgence. Ce système est couplé avec le système de freinage ABS pour éviter un blocage des roues et avec les feux de détresse pour avertir du freinage.

#### **I.4.6. La déformation de la structure du véhicule (Fig. I. 11)**

La structure du véhicule est conçue pour absorber un maximum d'énergie lors de l'impact tels, que le pare-chocs, le châssis, la carrosserie, le capot, tout en conservant intact l'habitacle. Lors d'un crash-test de voiture, ce phénomène est bien visible, alors que l'avant de la voiture se déforme complètement, l'habitacle reste relativement préservé pour mieux protéger ses occupants.



**Figure I.11.** Eléments de renforcement dans la structure d'un véhicule [31].

#### **I.4.7. Le pare-brise avant, les vitres et l'appuie-tête**

Les vitres participent à la sécurité durant un choc, en évitant les projections à l'intérieur ou l'éjection des passagers. Ils ne peuvent pas éclater pour ne pas blesser les occupants. L'appuie-tête permet de préserver les passagers du coup du lapin en cas d'accident.

#### **I.4.8. Les barres de protection latérales et la direction**

Les barres de protection permettent d'éviter au véhicule de trop se déformer en cas de choc latéral. Elles sont intégrées aux portières. La direction est constituée en essieu brisé afin d'éviter, en cas de collision frontale, que la colonne unique remonte dans l'habitacle et vienne blesser le conducteur. Elle se plie au niveau des transmissions de ses essieux.

#### **I.4.9. Surveillance de pression des pneus**

Un dispositif de surveillance des pneumatiques est devenu obligatoire pour tous véhicules d'un poids total autorisé en charge inférieur à 4,536 kg depuis le 1<sup>er</sup> septembre 2007. Le système doit principalement contrôler les quatre pneus et alerter le conducteur si la pression de l'un d'entre eux est inférieure de plus de 25% à la valeur préconisée à froid.

## **I.5. Conclusion**

Ce premier chapitre a été consacré à l'étude bibliographique afin de mettre en évidence la richesse de la recherche dédiée à la sécurité routière dans le domaine de l'automobile. Nous avons tout d'abord décrit l'évolution des simulateurs et plus particulièrement les simulateurs automobiles. À l'origine rudimentaires, ces systèmes ont été conçus et n'ont pas cessé d'être perfectionnés au cours des dernières décennies pour atteindre aujourd'hui un niveau de réalisme visuel, particulièrement avancé. Puis, nous avons décrit les différentes formes de sécurité dans l'automobile qui recouvre essentiellement la sécurité active ainsi que la sécurité passive. Enfin, nous avons présentés aussi l'évolution des dispositifs de sécurité dans l'automobile. En effet, la sécurité automobile a été essentiellement conçue pour protéger les passagers d'un véhicule lors d'une collision. Ce chapitre se termine par la description de l'ensemble des éléments de sécurité intégrés dans les véhicules afin d'améliorer les performances des actions de sécurité routière et diminuer la mortalité.



## Références

- [1] F. Bella, Driving simulator for speed research on two-lane rural roads, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 40, No. 3, pp. 1078–1087, 2008.
- [2] J. Beugin, Contribution à l'évaluation de la sécurité des systèmes complexes de transport guidé, Thèse soutenue à l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis 2006.
- [3] A. Ait, K. Baala and A. Caminada, On the Spatiotemporal Traffic Variation in Vehicle Mobility Modeling. s.l. : Vehicular Technology, *IEEE Transactions*, Vol. 64, No 2, pp. 652-667, 2015.
- [4] V. Aguilera, C. Million, S. Allio, Territory analysis using cellphone data. s.l. : Transport Research Arena (TRA) 5th Conference: Transport Solutions from Research to Deployment, 2014.
- [5] G. Abe and J. Richardson. “The influence of alarm timing on braking response and driver trust in low speed driving”. *Safety Science*, Vol. 43, No. 9, pp. 639 – 654, 2005.
- [6] P. Briand, F. Anceaux, J.-M. Auberlet, S. Aubin, M.-P. Pacaux, P. Plainchault, and F. Rosey. “Impact of Perceptual Treatments on Driver’s Behavior: From the Driving Simulator Studies to Field Tests–First Results”. In: *Transportation Research Board 89th Annual Meeting*, 2010
- [7] M. Itoh, M.-P. P. Lemoine, F. ROBACHE, and H. MORVAN. “An analysis of driver’s avoiding maneuver in a highly emergency situation”. *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 8, No. 1, pp. 27–33, 2015
- [8] T. AlMahmoud and P. Barss. “Vehicle occupant restraint systems impact on eye injuries: A review”. *Survey of Ophthalmology*, Vol. 59, No. 3, pp. 334 – 344, 2014.
- [9] J.-M. Auberlet, M.-P. Pacaux, F. Anceaux, P. Plainchault, and F. Rosey. “The impact of perceptual treatments on lateral control: A study using fixed-base and motion-base driving simulators”. *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 42, No. 1, pp. 166–173, 2010
- [10] M. Behr, G. Poumarat, T. Serre, P. Arnoux, L. Thollon, and C. Brunet. “Posture and muscular behaviour in emergency braking: an experimental approach.”. *Accid Anal Prev*, Vol. 42, No. 3, pp. 797–801, 2010
- [11] M. Mazouni, Pour une meilleure approche du management des risques : de la modélisation ontologique du processus accidentel au système interactif d'aide à la décision, Thèse soutenue à l'Institut National Polytechnique de Lorraine 2008.
- [12] J. Slob. “State-of-the-Art driving simulators, a literature survey”. *DCT Report*, Vol. 107, 2008.
- [13] F. Robache, Évaluation sur simulateur de conduite du comportement humain en situation de pré-crash : application à l'amélioration des airbags, Thèse soutenue à l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis 2017.
- [14] R. Reisman., *A Brief Introduction to the Art of Flight Simulation*, Vol. 159 pp. 169, 1990.
- [15] M. Pacaux-Lemoine, H. Morvan, F. Robache, J. Floris, P. Drazetic, Driving simulator use for pre-crash tests. *Proceedings of the Driving Simulation Congress*, Orlando, Florida, USA, novembre 2005.
- [16] T. Perron, M. Kassaagi, and G. Brissart, Active safety experiments with common drivers for the specification of active safety systems, 2001.

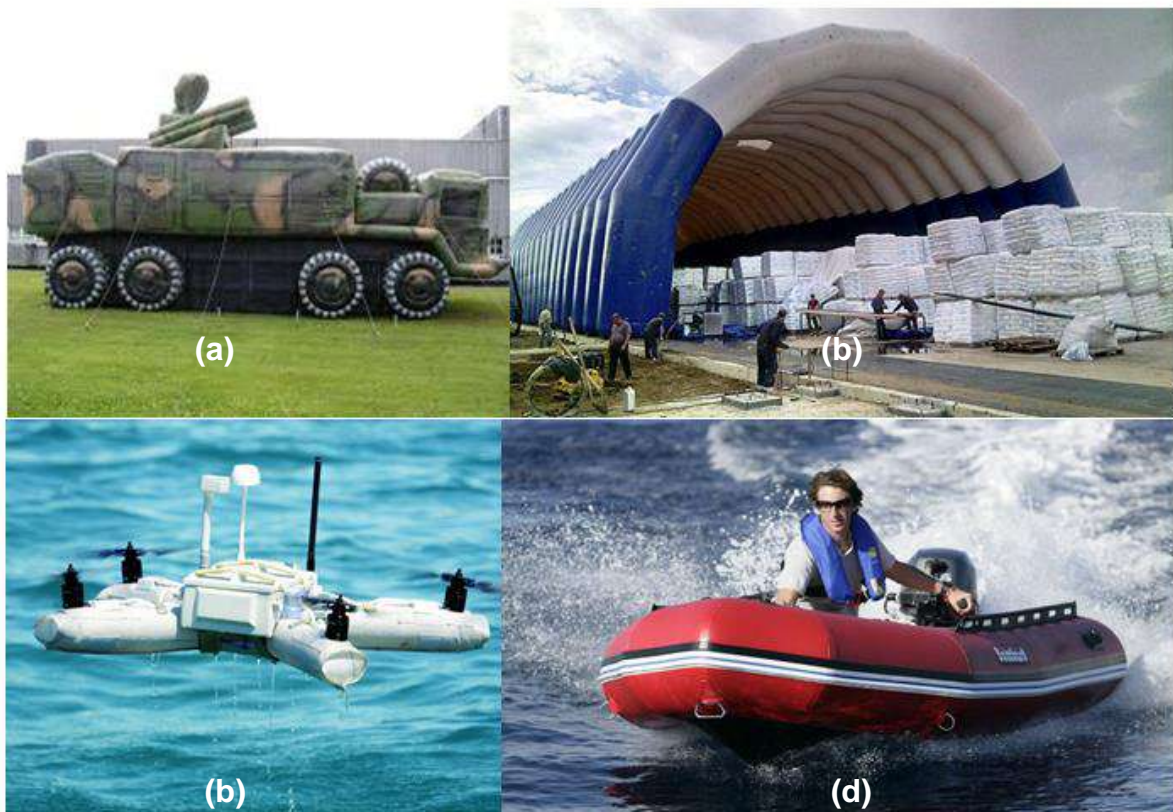
- [17] A. O. Atahan, Vehicle Crash Test Simulation of Roadside Hardware Using LS-DYNA: A Literature Review, *International Journal of heavy vehicle systems* 17(1): 52-75, 2010.
- [18] R. N. Khouzam, S.Al-Mawed, V. Farah, and A.Mizeracki. "Next-Generation Airbags and the Possibility of Negative Outcomes Due to Thoracic Injury". *Canadian Journal of Cardiology*, Vol. 30, No. 4, pp. 396 –404, 2014.
- [19] F. S. Gayzik, D. P. Moreno, N. A. Vavalle, A. C. Rhyne and J. D. Stitzel, Development of a Full Human Body Finite Element Model for Blunt Injury Prediction Utilizing a Multi-Modality Medical Imaging Protocol. the 12th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, USA 2012.
- [20] Y.-D. Seo, S. H. Chung, and J.J. Yoh, Automotive airbag inflator analysis using the measured properties of modern propellants". *Fuel*, Vol. 90, No. 4, pp. 1395 – 1401, 2011
- [21] M. Susan, Final Report of New Car Assessment Program (NCAP): Side Impact MDB Testing of a 2014 Chevrolet Impala 4-Door Sedan. East Liberty, OH, Transportation Research Center Inc 2013.
- [22] W. Smock. "Airbag Related Injuries and Deaths". In: J. A. Siegel, P. J. Saukko, and M. M. Houck, Eds., *Encyclopedia of Forensic Sciences*, pp. 414 – 421, Academic Press, Waltham, 2013.
- [23] M. Pithioux, P.Chavet, N. St-Onge, and C.Nicol. "Influence of muscle preactivation of the lower limb on impact dynamics in the case of frontal collision". *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 10, No. 6, pp. 557–565, 2005
- [24] F. Marco, A.Garcia-Lopez, C. Leon, and L. Lopez-Duran, Bilateral Smith fracture of the radius caused by airbag deployment". *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, Vol. 40, No. 4, pp. 663–664, 1996. 2014
- [25] M. E. Mossey, Y. Xi, S. K. McConomy, J.O. Brooks, P.J. Rosopa, and P.J. Venhovens, Evaluation of four steering wheels to determine driver hand placement in a static environment". *Applied Ergonomics*, Vol. 45, No. 4, pp. 1187 – 1195, 2014.
- [26] J. Schiro, F.Gabrielli, P. Pudlo, M. Djemai, and F. Barbier. "Steering wheel hand position in low-speed maneuvers". *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 21, No. 0, pp. 133 –145, 2013.
- [27] W. Pewinski, K.Ventura, and J. Sadek, A Preliminary Look At Occupant Sensing and Child Restraints, SAE, No. 2001-01-0163, 2001
- [28] S. Schmidt, M. Amereller, M. Franz, R. Kaiser, and A. Schwartz, A literature review on optimum and preferred joint angles in automotive sitting posture, *Applied Ergonomics*, Vol. 45, No. 2, Part B, pp. 247– 260, 2014.
- [29] Y.-J. Mon, Airbag controller designed by adaptive-network-based fuzzy inference system (ANFIS), *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 158, No. 24, pp. 2706–2714, 2007
- [30] C. N. Mock, D. C. Grossman, R. P. Kaufman, C.D. Mack, and F. P. Rivara. "The relationship between body weight and risk of death and serious injury in motor vehicle crashes". *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 34, No. 2, pp. 221 – 228, 2002.
- [31] J. Schiro, F.Gabrielli, P. Pudlo, M. Djemai, and F. Barbier. "Steering wheel hand position in low-speed maneuvers". *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol. 21, No. 0, pp. 133 –145, 2013.

# **Chapitre II : Les airbags**

---

## II.1. Introduction

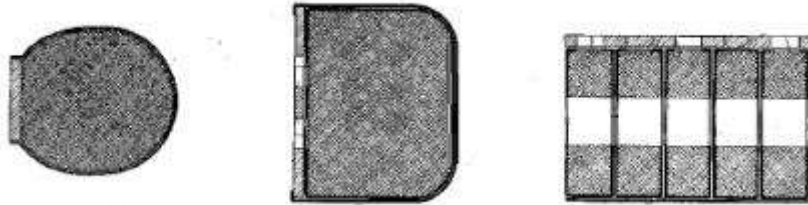
Les structures gonflables sont utilisées dans des domaines variés en raison de leur très bon rapport rigidité/poids ainsi que de leur faible encombrement lorsqu'elles sont dégonflées [1,2]. On les utilise principalement lorsque les ingénieurs ont besoin de structures à la fois rigides et flottantes comme les canots de sauvetage. Ces structures sont utilisées ainsi pour mettre en place rapidement des bâtiments temporaires et légers (Fig.II.1). Les nombreuses études [3,4] réalisées récemment portant sur les structures gonflables se sont majoritairement concentrées sur leur utilisation en aérospatiale. Par ailleurs, le pliage de ces structures a permis aussi de minimiser l'encombrement pour leur stockage, mais a introduit le problème de leur déploiement. Dans certains cas, comme les airbags ou les parachutes, l'ouverture très rapide de l'ordre de quelques millisecondes est vraiment nécessaire pour garantir leur bon fonctionnement (Fig.II.2).



**Figure II.1.** Différentes structures gonflables : (a) Tanks (b) Bâtiment (c) Drones (d) Bateau [5,6].

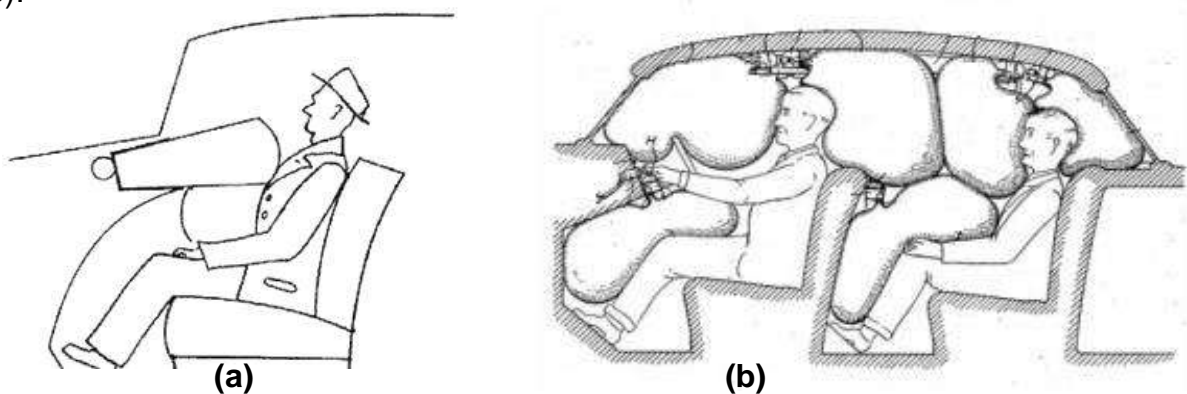
Les premiers brevets de structures gonflables, ont pourtant été déposés en 1920 par les américains Parrott et al .Il s'agit de coussins conçus pour protéger les

passagers des avions en cas de crash. La liste des brevets déposés dès lors augmente très vite, mais aucune des technologies proposées ne semble assez aboutie pour être implantée dans un véhicule [7,8].



**Figure II.2.** Brevet de structure gonflable pour l'aéronautique [7].

Au début des années cinquante, les premiers brevets ont permis de poser les principes de fonctionnement des sacs gonflables adaptées à l'industrie de l'automobile [8-10]. En 1958, Bertrand [9-10] a proposé un système de coussins gonflables dédiés à protéger tous les passagers du véhicule à quatre roues (Fig. II.3).



**Figure II.3.** Brevet d'airbag pour l'industrie automobile : **(a)** Linderer 1953, **(b)** Bertrand 1958 [9,10]

Dans les années soixante, Ford et General Motors ont pu travailler sur le même concept mais s'arrêtent à l'identification des problèmes tels que le remplissage de sac gonflable, ainsi que la toxicité des gaz brûlés. Les premiers designs d'airbags proposés sont peu pratiques, très chers et leur développement présente essentiellement des difficultés techniques qui semblent alors insurmontables. En effet, générer une quantité de gaz bien définie en quelques millisecondes est un challenge technique difficilement réalisable. La détection de l'impact dû à une collision ou un impact en est un autre.

Grâce à la croissance économique qui a entraîné une forte augmentation du nombre de véhicules mise en circulation dans le monde, ceci a conduit malheureusement à une augmentation très nette du nombre de décès [11,12]. Ce constat a conduit à une prise de conscience par les autorités dans différents états à travers le monde. Pour ces raisons, de nouvelles normes de sécurité ont vues le jour avec essentiellement la présence de ceintures de sécurité qui sont devenues obligatoires à l'avant du véhicule. Mais cela n'a pas suffi malheureusement pour baisser le taux de mortalité sur la route, ce qui relance cette fois-ci l'intérêt pour le développement d'airbag [13-16]. C'est en 1975 que les premiers airbags ont été proposés en option par General Motors. Mais à l'époque cette innovation n'était pas très populaire. Il a fallu attendre les années soixante-dix où Mercedes a pu commercialiser des airbags dans ses voitures, développés spécialement pour protéger le conducteur.

A partir des années quatre-vingt, la plupart des constructeurs ont adopté définitivement les airbags puisqu'ils les ont bien installés comme option dans différents endroits dans l'espace vital des véhicules. L'airbag est installé dans le volant pour le conducteur, dans le tableau de bord pour le passager, dans les piliers de portières ou de coffre pour protéger le thorax et sous la colonne de direction pour protéger les genoux (Fig.II.4). Les dernières normes de sécurité ont rendues l'airbag obligatoire, ce qui a contribué à le rendre un équipement de série. En effet, les bienfaits de cette option sur la santé publique ne sont plus à prouver et il va de soi que le nombre des airbags sur le marché de l'automobile ne cesse d'augmenter.

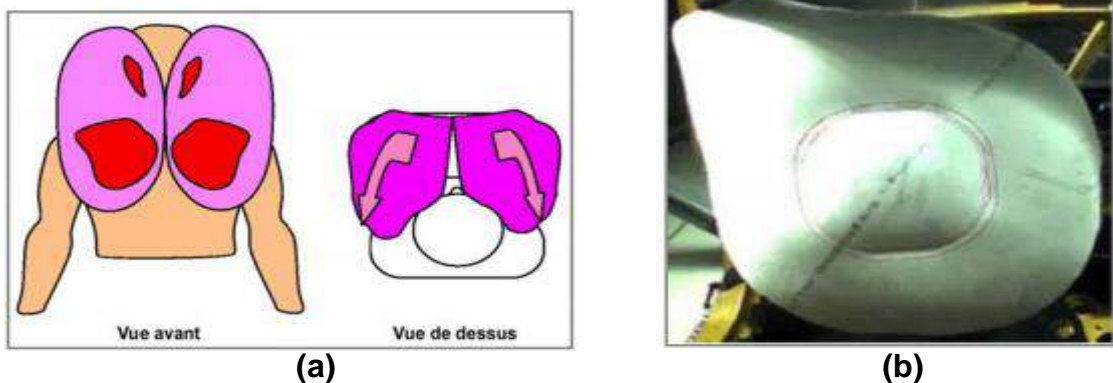
Plusieurs études [17-22] ont montré que lors d'un choc frontal, les airbags frontaux diminuent le nombre de morts de 25% pour les conducteurs ceinturés et de 15% pour les passagers ceinturés.



**Figure II.4.** Illustration des différents types d'airbags dans un habitacle

De nombreuses améliorations sur ces sacs gonflables ont été proposées afin de diminuer principalement les charges appliquées sur les passagers. Hoffman [23] a montré qu'il est possible de diminuer significativement les risques de traumatismes cervicaux en utilisant des airbags « multi-surfaces ». De la même manière, Takata [24] a proposé en 2005 un airbag passager innovant, que ce soit par sa forme, ou bien par ses fonctionnalités (Fig.II.5a). Ce modèle « Twin Bag » équipe aujourd'hui des véhicules de haut de gamme tels que Jaguar et Lexus. Sa forme permet de soulager le plexus ainsi que la nuque et de prendre appui essentiellement sur les épaules [24].

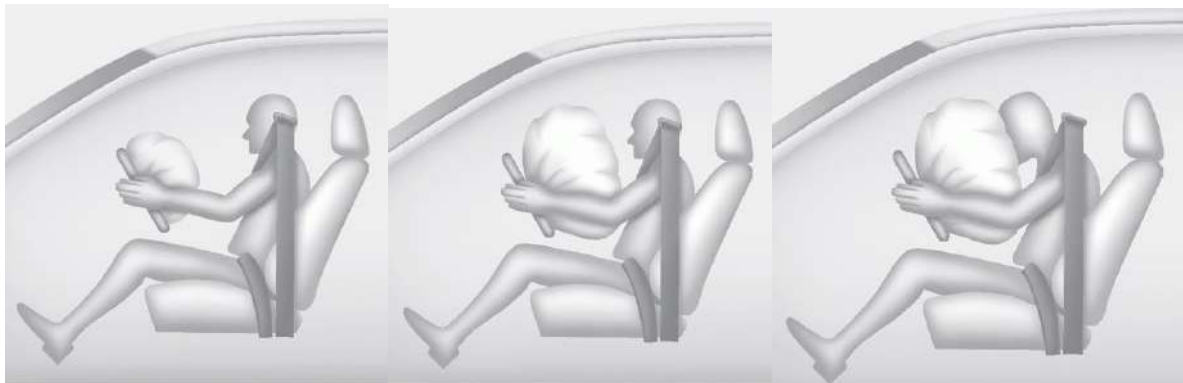
Pour le conducteur, nous voyons aussi apparaître des modèles asymétriques utilisant avantageusement les volants à moyeu fixe [25]. Tra et al. [26] (2005) ont proposé un modèle qui recouvre à la fois le volant et le montant de pare-brise (Fig.II.5b). La même société propose un autre système incluant un événement qui selon cette société, il permet de respecter les critères OOP (**Object-Oriented Programming**) avec un airbag à simple étage.



**Figure II.5.** Structures gonflables : (a) Twin bag proposé par TAKATA [24], (b) Airbag conducteur asymétrique proposé par TRW [26,27]

## II.2. Les airbags de sécurité

L'airbag c'est un mot anglais, d'origine allemande, désignée en français le coussin gonflable. C'est une membrane flexible fabriquée en nylon traitée, dans laquelle de l'air ou un gaz est très rapidement injecté, suite à une réaction chimique. Le déploiement de l'airbag permet ainsi d'amortir un choc (Fig.II.6). Il assure la protection des passagers, lors d'une collision et ainsi leur éviter de percuter violemment certains équipements de la voiture connue le volant, les vitres latérales, l'appuie-tête avant pour un passager arrière, etc.. Son efficacité optimale est obtenue dans son association avec une ceinture de sécurité.



**Figure II.6.** Déploiement d'un coussin gonflable côté conducteur [28].

Le déploiement d'un airbag se fait principalement en cinq étapes distinctes :

- la détection d'un choc,
- le déclenchement de système de sécurité,
- le déploiement de l'airbag,
- l'amortissement,
- le dégonflage du sac gonflable.

Les airbags sont systématiquement associés aux prétensionneurs de sécurité. Ces derniers tendent les ceintures de sécurité afin de plaquer les passagers du siège contre les dossiers. L'action ne se déroule qu'en 100 millisecondes maximum.

En cas de choc, un capteur mesure la décélération et transmet l'information à un boîtier électronique. En fonction de la mesure effectuée, un signal électrique est envoyé vers les différents airbags. Ce signal est transmis au générateur de gaz qui gonfle rapidement l'airbag par explosion et puis, le sac se dégonfle afin d'éviter un



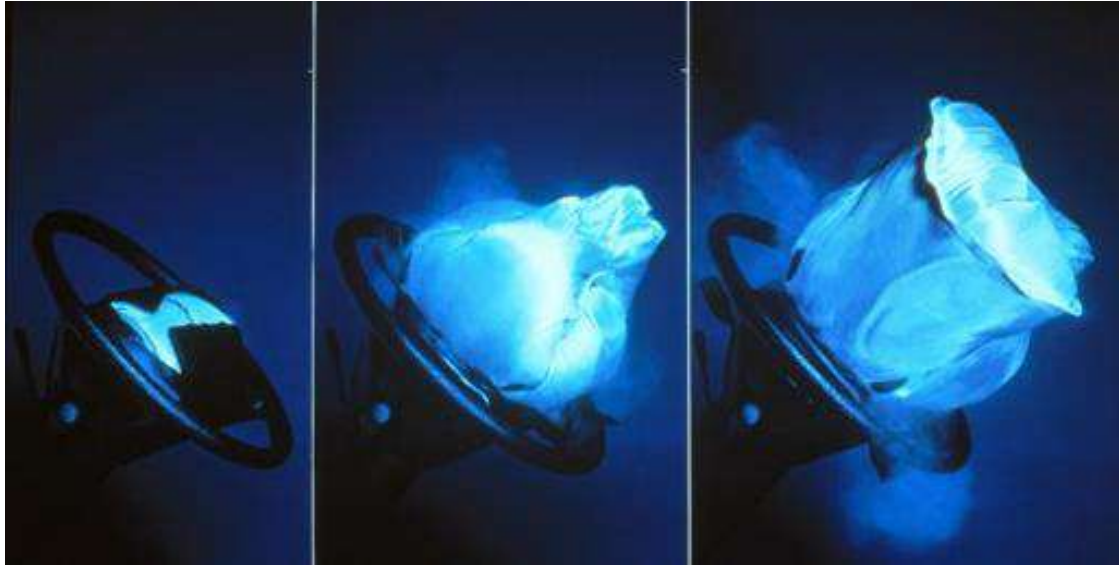
effet de rebond et faciliter les mouvements dans l'habitacle, notamment l'accès des secours.

Le temps de déploiement des airbags dans un véhicule, est différent suivant leurs formes et leur localisation dans un véhicule. Le temps est variable car les airbags sont réalisés pour un type de véhicule pour une utilisation donnée et leur dimensionnement suivant les véhicules (Fig.II.4). A titre indicatif, le temps de déploiement de l'airbag frontal côté conducteur varie entre 50 à 70 millisecondes, alors que pour les airbags latéraux placés dans le toit, sur les sièges et dans le haut de la portière, ce temps est de l'ordre de 20 à 50 millisecondes. La vitesse d'impact minimale pour déclencher un airbag est de l'ordre de 15 à 30 [km/h] pour une collision frontale et de 15 à 25 [km/h] pour une collision latérale. Enfin, les airbags ne servent qu'une seule fois, lorsqu'ils ont été déclenchés, ils doivent impérativement être remplacés (Fig.II.7).



**Figure II.7.** Illustration d'un airbag ayant explosé suite à une collision frontale [29].

En plus, lorsqu'un airbag éclate, plusieurs événements se produisent dans l'habitacle et permettent d'aider à déterminer la position des occupants au moment du choc. Premièrement, un nuage de particules, constitué de différentes substances, principalement d'amidon est propulsé dans l'ensemble du véhicule et sur les occupants. Ce dernier se dépose sur les cheveux et les habits des passagers (Fig. II.8).



**Figure II.8.** Déploiement d'un airbag suivi d'un nuage de particules [30].

Ces particules permettent de vérifier si des personnes étaient présentes dans un véhicule au moment où un airbag a explosé [30]. L'étude réalisée par Aline Girod à l'Institut de Police Scientifique de Lausanne démontre que la répartition de particules d'amidon n'est pas homogène au sein de l'habitacle et sur les habits d'un passager.

### **II.3. Les différents types d'airbags**

Depuis plus de 35 ans, les airbags n'ont cessés de coloniser les habitacles de nos voitures. Et si c'est un gage de sécurité pour les automobilistes, leur intégration est bien souvent un véritable casse-tête pour les ingénieurs. En effet, il faut faire en sorte d'intégrer au mieux ces dispositifs de sécurité lors d'un choc, tout en restant le mieux dissimulé en temps normal (Fig.II.9).



**Figure II.9.** Vulnérables des membres supérieurs d'un conducteur ceinturé en cas de crash [31].

Un airbag de sécurité est composé essentiellement d'une enveloppe flexible en polymère dans laquelle un gaz est très rapidement injecté par explosion, afin de la gonfler et ainsi protéger le plus rapidement possible la tête et le buste des passagers lors d'un choc. Dans les voitures récentes, les airbags peuvent être présents un peu partout dans l'habitacle. Ces coussins gonflables existent aujourd'hui sous différentes formes pour différentes fonctions de protection (Fig.II.4) :

- les airbags frontaux, qui protègent le visage et le thorax des passagers avant, d'un contact avec le volant ou le tableau de bord ;
- les airbags latéraux qui protègent le buste des chocs latéraux ;
- les airbags rideaux qui se déploient le long des vitres arrière et avant afin de protéger la tête des passagers ;
- les airbags de genoux et les airbags anti-glissement ;
- ...

### **II.3.1. Les airbags frontaux**

Les airbags frontaux sont conçus pour se gonfler en cas de collision frontale ou quasi frontale, afin d'aider à réduire le risque de blessures graves, principalement à la tête et au thorax des passagers d'un véhicule (Fig.II.10). Ces airbags peuvent se gonfler à différentes vitesses de collision selon que le véhicule heurte un objet en ligne droite ou en diagonale et selon que l'objet est fixe ou mobile, rigide ou déformable, étroit ou large. Ils ne sont pas conçus pour se déployer lors des tonneaux, des collisions arrière et dans de nombreux cas de collisions latérales.

Après leur gonflement les airbags frontaux, ceux-ci se dégonflent rapidement, si aussi rapidement que certaines personnes ne peuvent même pas réaliser que les airbags se sont déployés.



**Figure II.10.** Déploiement des airbags frontaux pour le conducteur et le passager avant [31].

La mise en action des airbags est commandée par un accéléromètre qui envoie un signal au calculateur pour déclencher la charge pyrotechnique provoquant ainsi le gonflage des airbags. Ce système de sécurité est disposé dans le volant et dans la planche de bord, face au passager avant (Fig.II.10). Leur fonctionnement prend aussi en compte la puissance de l'impact, l'occupation des sièges, le poids des occupants, l'inclinaison des sièges et même l'oubli éventuel du bouclage de la ceinture. L'analyse de tous ces paramètres permet ainsi d'optimiser le déclenchement de ces airbags dits coussins adaptatifs. Certains véhicules disposent d'un interrupteur de désactivation de l'airbag passager afin d'installer, par exemple, un siège bébé de type « *Dos à la route* ».

### **II.3.2. Les airbags latéraux**

Contrairement aux airbags frontaux qui protègent des chocs avant, les airbags latéraux sont destinés à amortir la violence d'un choc survenant sur le côté du véhicule. Pour les occupants d'un véhicule que ce soit le conducteur et le passager avant, ces airbags sont généralement situés dans les dossiers des sièges ou sur le montant, une zone structurelle située entre les portes avant et arrière (Fig.II.11 (a)). Tandis qu'à l'arrière du véhicule, les airbags latéraux sont souvent logés dans les panneaux de portière. Ils sont conçus pour se déployer dans des collisions modérées ou sévères en fonction de l'emplacement de l'impact. Ces coussins ne sont pas conçus principalement pour se déployer en cas de collisions frontales ou quasi frontales, dans des tonneaux ou pour des collisions arrières.

Un airbag latéral intégré au siège est conçu principalement pour se déployer du côté où le véhicule est heurté. Le déclenchement pour ce type d'airbag est commandé aussi par un capteur de type accéléromètre qui envoie ainsi un signal à un ordinateur en cas de collision. Le système identifie donc quels airbags latéraux doivent être déployés, puis déclenche par explosion, un gonfleur à gaz à l'aide d'une charge pyrotechnique. Le gaz pousse ainsi l'airbag hors de son support, tout en y restant fermement rattaché afin de se gonfler rapidement. Enfin, le gaz injecté se dissipe presque immédiatement pour dégonfler le coussin gonflable. L'ensemble du processus dure entre 10 et 30 millisecondes.



**Figure II.11.** (a) Airbag latéral côté passager avant. (b) Airbag genoux côté conducteur.

Un airbag latéral est conçu principalement pour protéger le bassin, l'abdomen et parfois la tête. Il peut réduire de 20% le risque de blessure grave en cas de collision par le côté. La difficulté technique de ce type d'airbag est la faible distance entre l'impact et le passager.

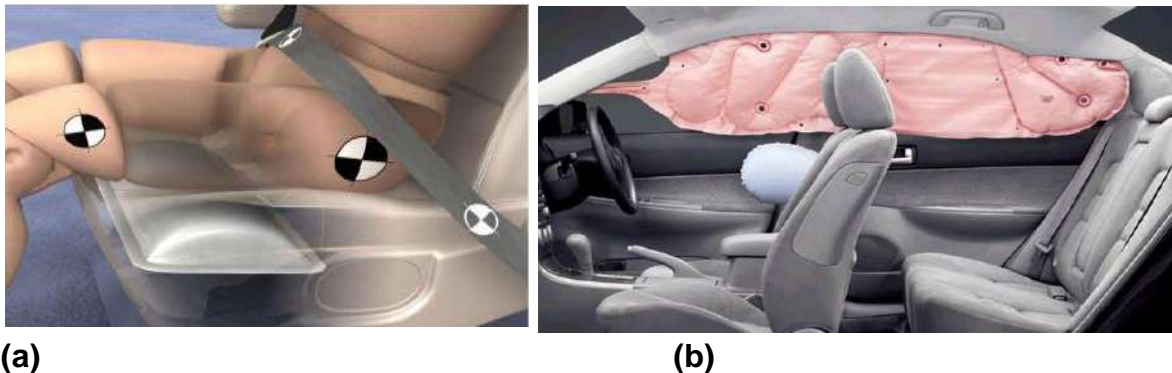
### **II.3.3 Les airbags de genoux**

C'est un système de protection dédié pour protéger les passagers avant d'un véhicule. Ils sont situés au niveau de la colonne de direction pour le conducteur et sous la boîte à gants pour le passager. L'airbag de genoux est composé aussi d'une enveloppe flexible dans laquelle un gaz est très rapidement injecté par explosion, afin de le gonfler en seulement 20 millisecondes et ainsi protéger les jambes des deux passagers avant lors d'un choc frontal. Puis, l'airbag se dégonfle immédiatement, ce qui amortit le choc, sans blesser les passagers. Sa mise en action est commandée aussi par un accéléromètre, qui envoie un signal au

calculateur pour déclencher la charge pyrotechnique provoquant aussi le gonflage des coussins d'air (Fig.II.11(b)).

#### II.3.4. Airbag anti-glisserment

Ils sont destinés pour éviter le glissement sous la ceinture et à limiter essentiellement les risques de lésions aux membres inférieurs. En réalité, rien qu'un simple glissement d'un passager pourrait effectivement lui entraîner des blessures graves, parfois mortelles en cas de collision. Ces coussins gonflables ont été conçus spécialement pour limiter la rotation du bassin en cas de choc. L'airbag est située dans les sièges avant, qui en cas de choc se gonfle et empêche ainsi tout mouvement de sous marinage c-à-d un glissement sous la sangle ventrale de la ceinture (Fig.II.12 (a)). Ce système permet aussi d'empêcher les jambes de heurter la planche de bord. Avec l'utilisation de ce nouvel airbag, les industriels veulent en réalité renforcer de plus en plus leur position sur le plan de la sécurité routière. Dans la plupart des cas, les genoux des passagers avant peuvent subir des chocs allant de 800 kg à 1 tonne en cas de sous-marinage.



**Figure II.12. (a)** Airbag anti-glissant côté passager avant. **(b)** Déploiement de l'airbag rideau.

Contrairement aux autres types d'airbags, l'airbag anti-glissement ne se met jamais en contact direct avec l'occupant. Peu répandu, ces airbags ont été mis en place pour la première fois, sur la Renault Mégane Coupé en 2002 [32].

#### II.3.5. Les airbags rideaux

Aussi appelé airbags de toit ou de tête, ils offrent une protection supplémentaire de la tête des passagers, sauf le passager arrière central. Ils permettent de limiter les risques de traumatisme au niveau de la tête. Chaque airbag rideau est intégré dans

les montants et la partie supérieure de l'habitacle. Ils se déclenchent simultanément avec les airbags latéraux correspondants en cas de choc latéral violent.

Ces coussins se remplissent de gaz propulseur et recouvrent rapidement les glaces latérales ainsi que les montants de porte (Fig.II.12(b)). En effet, ces airbags s'interposent entre les occupants du véhicule et les vitres. Ils servent aussi à protéger les passagers avant ou arrière des projections de verre en cas de choc latéral ou retournement du véhicule. Ces airbags permettent donc de diminuer le risque de blessure crânienne de 50% et est particulièrement efficace lors des tonneaux. Le temps de déploiement est de l'ordre de 40 à 50 millisecondes.

### II.3.6. Les airbags piétons

Les airbags piétons sont destinés à protéger tout individu extérieur au véhicule en cas de choc frontal. Le dispositif a été conçu pour protéger les piétons dans certaines situations, comme un choc avec le capot, le pare brise ou ses montants latéraux. Il a deux fonctions principales : celle de soulever le capot pour éloigner le piéton de la partie mécanique, et aussi celle d'amortir l'impact sur le pare-brise.



**Figure II.13.** Déploiement des airbags piétons pour protéger la tête [33].

Le système est activé à une vitesse comprise entre 20 [km/h] et 50 [km/h], suite à un choc frontal détecté grâce à des capteurs équipant l'avant de la voiture (des capteurs, chargés de détecter tout contact avec un objet). Suite à cela, un signal est alors envoyé à une centrale qui va le décrypter. S'il l'interprète comme étant une jambe humaine, il déploie le coussin gonflable installé en bas du pare-brise (Fig.II.13). L'airbag en forme de U se gonfle en quelques centièmes de secondes jusqu'à recouvrir les montants et le pare-brise.

### II.3.7. Les airbags de ceinture

Il s'agit d'une ceinture équipée d'un airbag qui se gonfle très rapidement dès l'impact et est ainsi activé avant que le passager ceinturé ne soit projeté. En se gonflant, le coussin augmente d'environ cinq fois la surface de retenue de la ceinture, qui passe donc d'une bande étroite d'environ cinq centimètres à une bande beaucoup plus large pour mieux répartir les forces de décélération sur le corps ( Fig.II.14).

Un des défauts de ce dispositif de sécurité, est la violence avec laquelle l'airbag retient les corps des passagers et particulièrement ceux ou celles dont la morphologie n'est pas la plus adaptée à la taille de la ceinture, comme le cas des enfants ou les personnes âgées (Fig.II.14).



Figure II.14. Ceinture de sécurité active avec airbag gonflable [34].

### II.3.8. Les airbags extérieurs latéraux

Ces dispositifs sont destinés à la sécurité du conducteur et tous les passagers de la voiture. Ces airbags ont vu le jour en novembre 2018 sur certaines gammes de voitures. Les premiers véhicules équipés d'airbags externes en série pourraient être commercialisés dans les deux ans. Ils ont été conçus principalement pour protéger les côtés de la voiture en cas de collision latérale. Les airbags extérieurs latéraux sont positionnés à l'extérieur entre les deux essieux et se déploient sur le flanc du véhicule (Fig.II.15), d'une part pour absorber une grande partie de l'énergie de l'impact en cas d'accident, et d'autre part, pour augmenter la distance séparant les occupants du véhicule percuté de la carrosserie du second véhicule. Grâce à des



capteurs placés à l'extérieur de l'auto et qui scruteraient l'environnement extérieur, l'airbag pourrait se déployer en 80 millisecondes.

Cette solution pourrait être de fait s'avérer très efficace pour réduire la mortalité routière, puisque près d'un tiers des accidents mortels font suite à des chocs latéraux [35,36]. En effet, ce dispositif a pu réduire de 40% la gravité des blessures des passagers lors d'une collision latérale, tout en abaissant d'environ 30% la pénétration d'un véhicule dans l'habitacle.



**Figure II.15.** Déploiement d'un airbag extérieur latéral [37].

#### **II.4. Principe de déploiement des airbags**

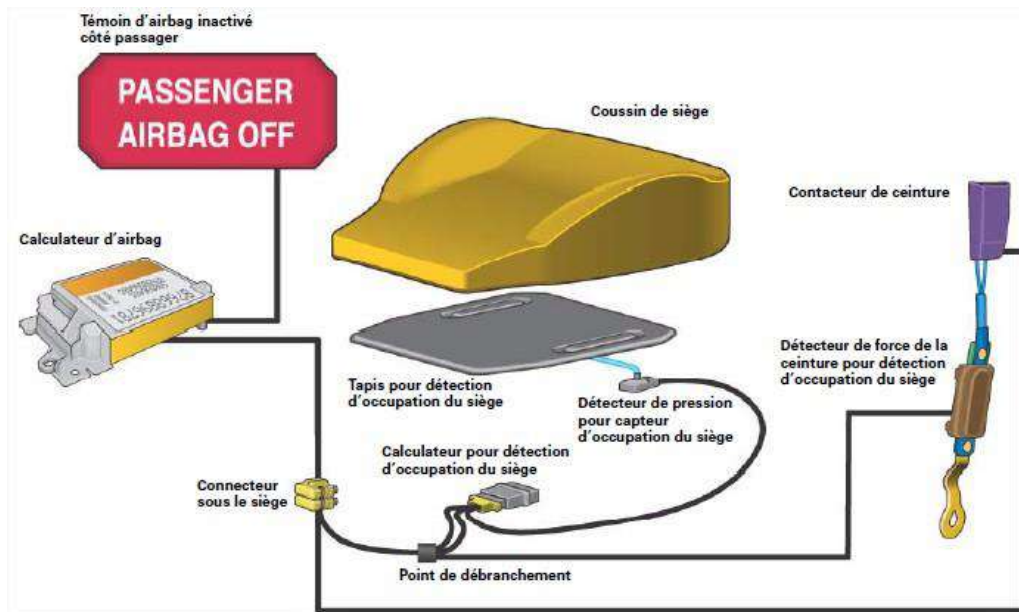
Un airbag se compose principalement d'un sac d'air gonflable d'un volume d'environ 67 litres, d'un support pour le sac, d'un générateur et d'un cache. Le sac d'air est fabriqué essentiellement à partir d'un tissu à base de polyamide caractérisé par une très bonne solidité, et une bonne résistance au vieillissement. Son faible coefficient de frottement lui assure un déploiement aisé et un contact doux avec la peau. Pour le protéger et l'empêcher de coller, le sac d'air est saupoudré de talc reconnaissable à un nuage blanc lors du déclenchement (Fig.II.9). L'intérieur du sac comporte des bandes qui maintiennent la forme voulue lors du gonflage. Des ouvertures d'échappement du gaz figurent à l'arrière. En cas d'accident, le calculateur amorce le générateur et un courant d'allumage chauffe un fin fil

métallique qui amorce la pastille explosive. Il se produit alors soit une explosion ou bien une combustion de la charge pyrotechnique. Cette dernière se compose principalement d'azoture de sodium qui produit grâce à la combustion avec l'oxydant une détente qui libère de l'oxyde de cuivre ou de fer en formant de l'azote presque pur pour gonfler l'airbag.

En raison de la toxicité de l'azoture de sodium, d'autres combustibles solides sans azoture ont également vu le jour pour être utilisés comme charge pyrotechnique. Ceux-ci ne réagissent pas qu'à l'azote, mais également au dioxyde de carbone (environ 20 %) et à la vapeur d'eau (environ 25 %). L'agent propulseur se présente généralement sous la forme d'une pastille dans un emballage étanche à l'air dans la chambre de combustion. Le type et la quantité de l'agent propulseur utilisés dans les airbags dépendent essentiellement de la taille du sac gonflable et aussi de la vitesse d'ouverture requise. Le gaz produit traverse un tamis-filtre sous une pression d'environ 120 bars puis refroidi à une température inférieure à 80 °C afin d'exclure une mise en danger des passagers du véhicule. Le bruit généré est comparable à celui d'un coup de fusil.

## **II.5. Les éléments de sécurité dédiés aux airbags**

Un système d'airbag est constitué principalement d'un calculateur, d'un générateur de gaz muni d'un dispositif de déclenchement, et d'un coussin gonflable (Fig.II.16). Il est aussi composé d'un condensateur avec une autonomie suffisante de quelques centaines de millisecondes pour transmettre rapidement une impulsion durant une collision. L'impulsion électrique émise par le calculateur sert principalement pour déclencher une réaction chimique (Fig.II.16). Grâce à ce système, l'airbag se gonfle suffisamment rapidement et se déploie complètement à une vitesse de 150 à 200 [km/h] afin d'amortir rapidement le choc de la tête et du thorax.



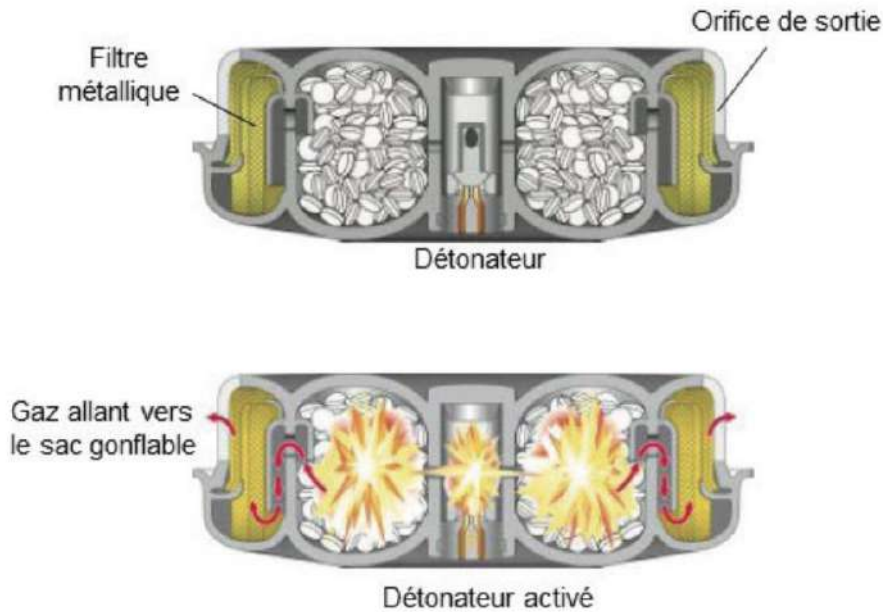
**Figure II.16.** Système de sécurité routière pour véhicule quatre roues [38].

### II.5.1. Les générateurs de gaz

Différentes technologies de générateurs sont employées, en fonction du type d'airbag à gonfler, c'est-à-dire de son positionnement dans l'habitacle et de son volume à remplir. Les générateurs de gaz peuvent être pyrotechniques, à gaz chaud, hybrides ou encore à gaz froid.

#### II.5.1.1. Générateur pyrotechnique

Ces générateurs utilisent principalement des matériaux pyrotechniques qui sont généralement employés pour des airbags frontaux. La production de gaz est totalement assurée par la combustion d'un propergol. C'est une impulsion électrique transmise au détonateur qui va permettre d'enflammer le propergol. Puis, un condensateur ayant une autonomie suffisante de quelques centaines de ms est donc utilisé pour transmettre cette impulsion même dans le cas où la batterie de la voiture serait coupée dans un choc (Fig.II.17).



**Figure II.17.** Vue en coupe d'un générateur pyrotechnique avec un système de cartouche expansive contenant des pastilles ou de la poudre solide [39].

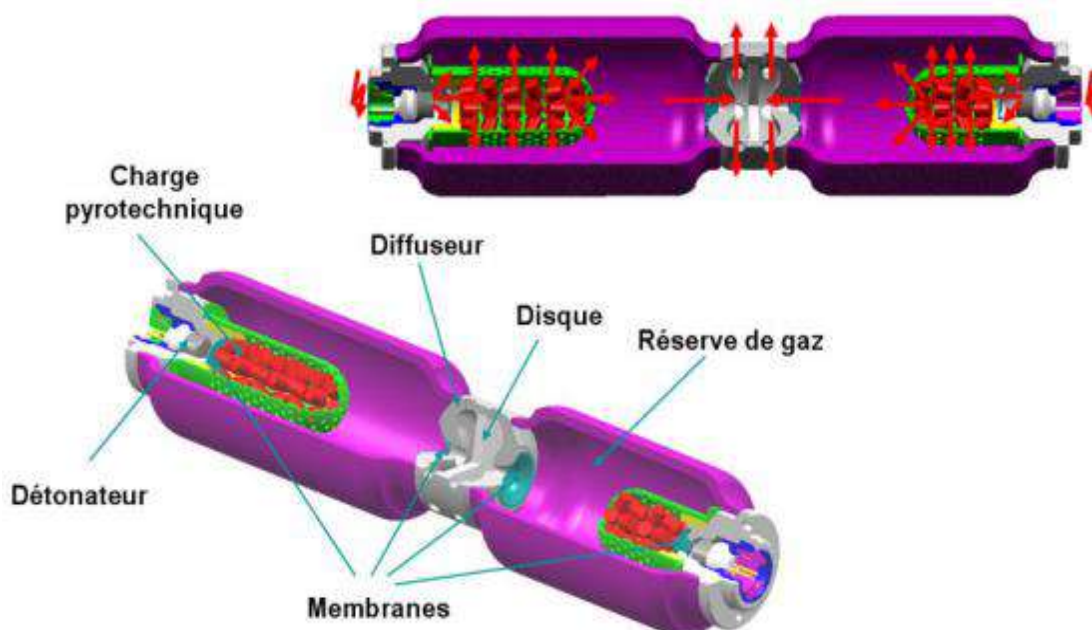
Différentes familles de propergols peuvent être employées pour les générateurs de gaz [40,41] :

- a) Propergol à base d'azoture de sodium utilisé dans les premiers générateurs de gaz pour différents airbags de sécurité principalement pour leur capacité à brûler le combustible à des températures faibles et produire des gaz contenant 99 % d'azote. Malheureusement, l'azoture de sodium est très toxique d'environ 30 fois plus que l'arsenic. Cette nocivité a stoppé son développement et aujourd'hui, ce type de propergol n'est plus utilisé ;
- b) Propergol sans résidu à base de nitrocellulose employé dans la deuxième génération de générateurs à gaz pour assurer le déploiement des airbags de faible capacité ainsi que pour les airbags latéraux ;
- c) Enfin, des nouveaux propergols viennent en substitution des deux familles décrites ci-dessus, ils doivent éviter leurs inconvénients respectifs, à savoir d'une part la toxicité des matières premières utilisées, et le recyclage pour les propergols à l'azoture et d'autre part ; la toxicité des gaz de combustion ainsi que la tenue en température pour les propergols à base de nitrocellulose. Parmi ces nouveaux propergols, on peut citer des propergols composites extrudés, des propergols à

base d'aminotétrazole ou de nitrate de guanidine. Le propergol solide contenu dans les générateurs se trouve sous forme de pastilles, ou encore d'un solide extrudé dont la géométrie est conçue pour optimiser et contrôler la vitesse de génération des gaz (Fig.II.17).

### II.5.1.2. Les générateurs à gaz chaud

Ces générateurs utilisent un mélange d'hydrogène et d'air. La combustion directe de ce mélange génère un gaz chaud capable de déployer le coussin (Fig.II.18). Elles ne peuvent donc être employées que lorsque la pression dans le sac est maintenue.

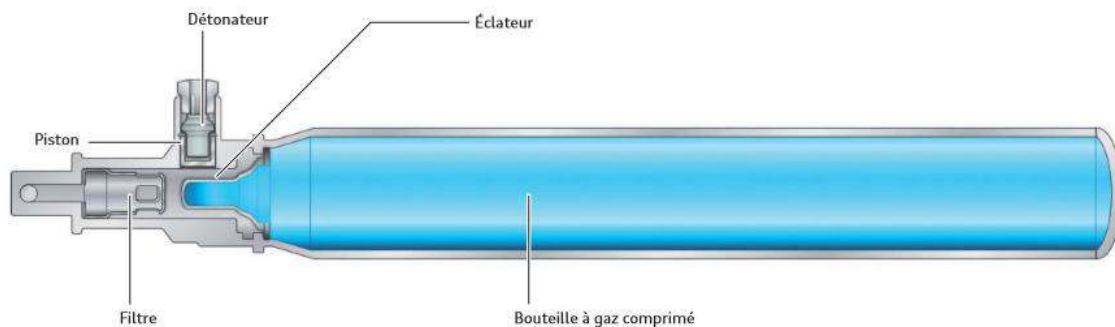


**Figure II.18.** Vue en coupe d'un générateur à gaz chaud [42].

### II.5.1.3. Les générateurs à gaz froids

Les générateurs à gaz froid, contenant généralement de l'hélium à haute pression ont fait ensuite leur apparition. Dans ce système, un gaz comprimé se trouve dans la bouteille de gaz sous pression (Fig.II.19). La pression générée dans le détonateur va repousser un piston, qui cisaille à son tour l'éclateur. Le gaz peut alors être refoulé dans l'airbag pour assurer son déploiement. Dans le cas de ce type de générateurs de gaz, ce sont les détonateurs pyrotechniques qui ont pour tâche d'ouvrir la bouteille à gaz comprimé.

Les générateurs à gaz froids sont principalement employés pour des airbags devant rester plus longtemps gonflés, comme l'airbag rideau.



**Figure II.19.** Vue en coupe d'un générateur à gaz froid [43].

#### II.5.1.4. Les générateurs multi-étagés

C'est une nouvelle génération de générateurs avec de charges multiples qui permet d'assurer un déploiement de l'airbag de 70 à 100 % de son volume. Ce générateur s'adapte avec l'évolution volumique des airbags en fonction de différents paramètres telles que l'intensité du choc ou la position du siège (Fig.II.20).



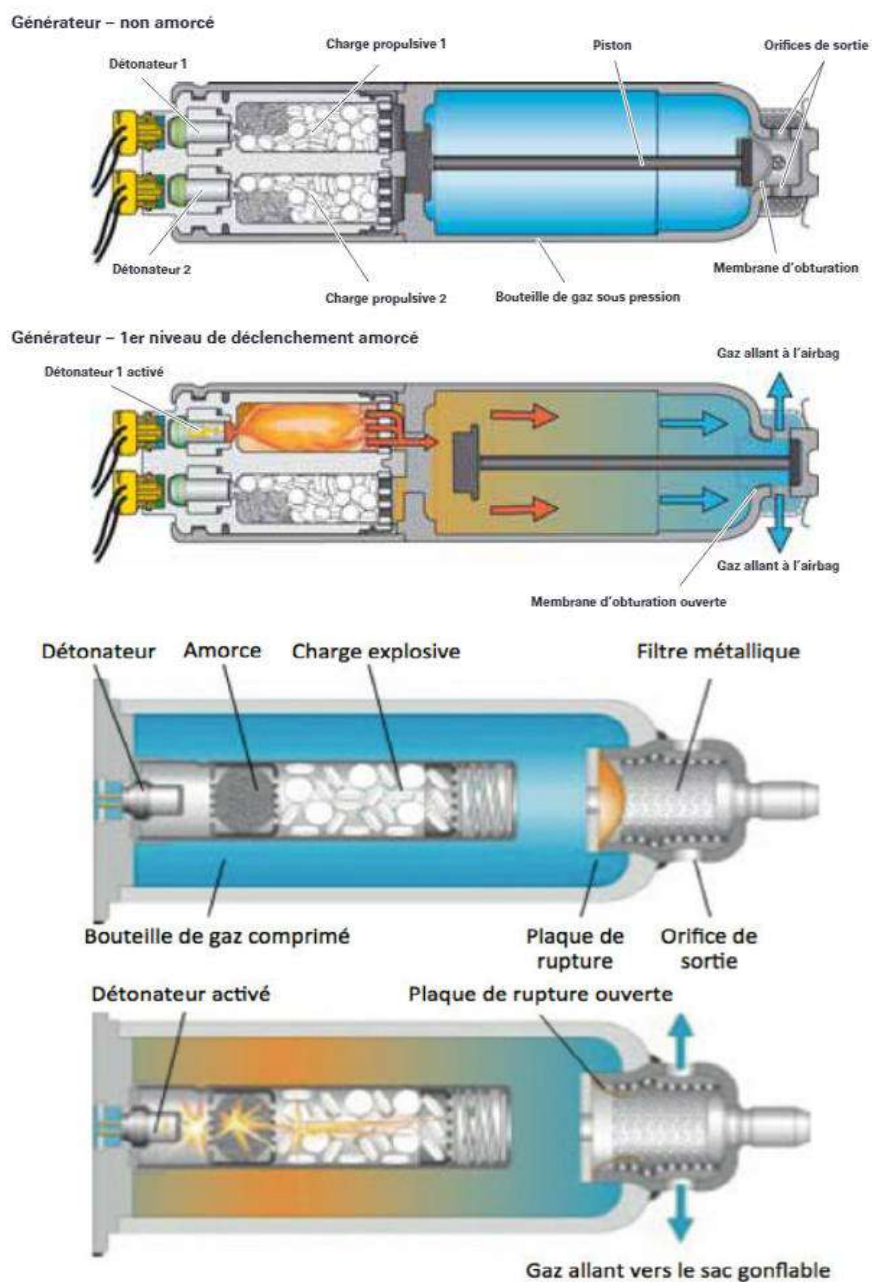
**Figure II.20.** Générateur à double étages [44,45].

#### II.5.1.2. Les générateurs hybrides

Ces dernières années, de nouveaux générateurs, dits adaptatifs, sont apparus afin de limiter les risques d'accidents corporels occasionnés par le déploiement du coussin de protection. Pour cela, ces différents générateurs, couplés à des systèmes de détection appropriés, permettent de moduler le débit et/ou le volume de gaz en fonction de certains paramètres comme, par exemple, la morphologie et le

positionnement du passager, la température ambiante, la nature et l'intensité du choc (Fig.II.21). Ces générateurs sont dans tous les cas prévus pour fonctionner dans une période de temps de l'ordre de cinquante millisecondes.

Le propergol dans cette technologie a deux fonctions principales : d'ouvrir le réservoir de gaz comprimé, pour assurer l'éclatement d'un opercule calibré, puis réchauffer les gaz détendus, provenant du réservoir, durant toute la durée de la vidange.

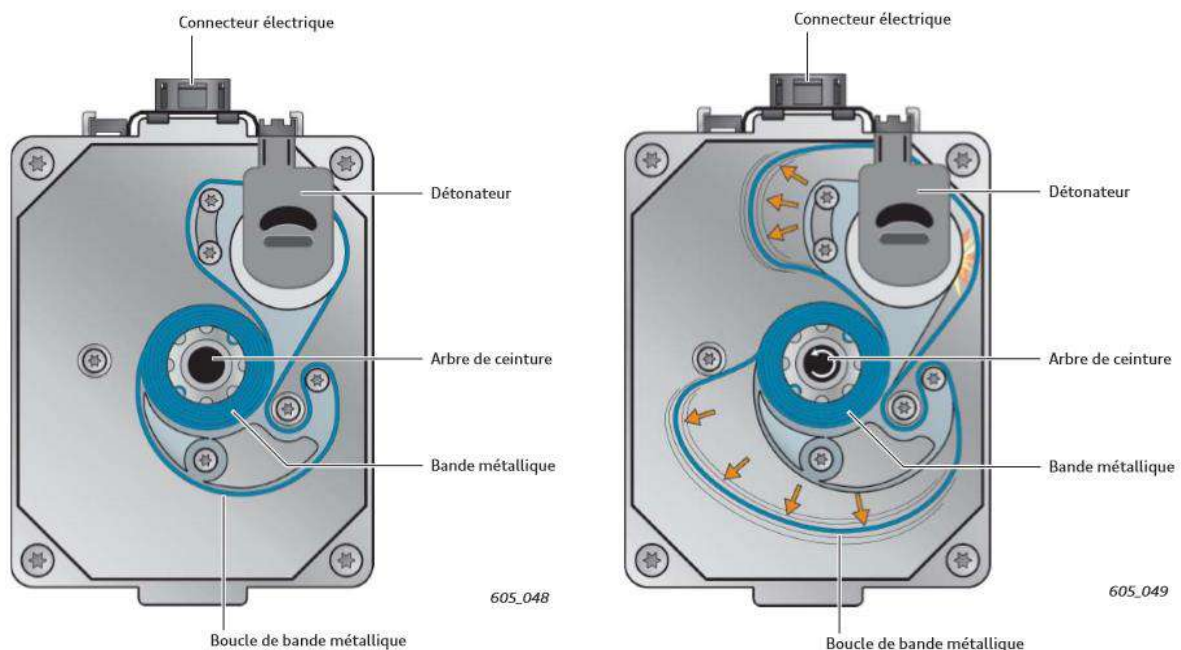


**Figure II.21.** Vue en coupe d'un générateur hybride : **(a)** côté conducteur, **(b)** côté passagers [46].

## II.5.2. Prétensionneur de ceinture

C'est un dispositif de sécurité associé à la ceinture composé d'une bande métallique enroulée autour de l'arbre de la ceinture (Fig.II.22). Lorsque le détonateur est activé, par le calculateur d'airbag, la pression générée agrandit la boucle de la bande métallique, pour tirer sur l'arbre de la ceinture. Ce dernier tourne alors, et rétracte ainsi la ceinture de sécurité. Elle cesse de se déplacer, lorsque la force agissant sur la ceinture dépasse la force du rétracteur de ceinture.

En cas de collision, il y d'abord amorçage des rétracteurs à bande afin d'enrouler la ceinture de sécurité. Ensuite, l'enrouleur bloque l'arbre de ceinture et empêche ainsi le déroulement de la ceinture de sécurité, qui aurait lieu au moment du déplacement vers l'avant du passager. Lorsque le passager continue d'être propulsé vers l'avant sous l'effet des décélérations, la limitation d'effort de ceinture autorise, à partir d'une force donnée, un enroulement ciblé de la ceinture de sécurité.



**Figure II.22.** Principe de fonctionnement d'un enrouleur de ceinture [47].

## II.5.3. Capteurs et calculateurs pour le déploiement des airbags

### II.5.3.1. Capteurs pour airbags

La première génération de capteurs était de type électromécanique constituée par une bille métallique dans un guide parallèle à l'axe de décélération de la voiture. Cette bille est repoussée par un champ magnétique afin de provoquer un contact

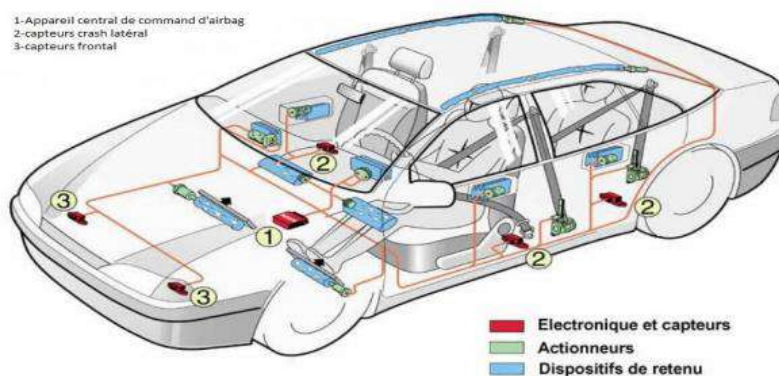


électrique. Ce type de capteur est maintenant remplacé par des capteurs électroniques, beaucoup plus fiables appelés « accéléromètres » (Fig.II.23).

Le système est basé sur un quartz, dont la propriété principale est de générer une tension électrique suite à une compression du capteur. Le convertisseur récupère ensuite les signaux électriques amplifiés et traités afin de détecter le choc.

### II.5.3.2. Calculateurs pour airbags

Le calculateur a principalement pour rôle d'assurer les conditions de déclenchement des airbags. Il permet essentiellement de ne pas déclencher les airbags de manière intempestive. Ces calculateurs permettent de mesurer une décélération de l'ordre de 15 à 25 [km/h] suite à un choc contre un mur afin de déclencher les airbags correspondants au choc soit les airbags frontaux ou bien les airbags latéraux.



**Figure II.23.** Emplacement des actionneurs et des capteurs dans l'habitacle d'un véhicule [48].

Le calculateur d'airbag est installé au centre du véhicule, c'est le cœur du système de sécurité. Il se situe généralement au niveau de la planche de bord, sur le tunnel central. Les fonctions principales des capteurs sont les suivantes :

- détection en temps utile des signaux fournis par les capteurs ;
- alimentation en énergie des circuits d'allumage par un condensateur ; indépendamment de la batterie du véhicule ;
- autodiagnostic de l'ensemble du système ;
- détection des accidents ;
- déclenchement en temps utile des circuits d'allumage concernés ;
- allumage du voyant d'airbag en cas de panne du système.

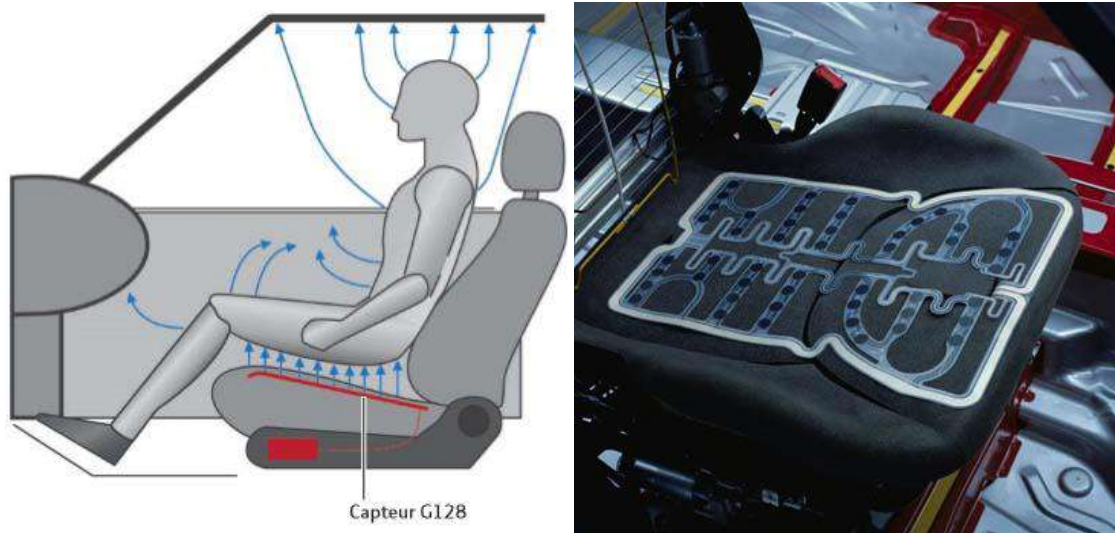
Les calculateurs modernes ont dans leur mémoire des informations obtenues au cours de divers crash-tests. Elles permettent de classifier un accident en fonction de la « *gravité du choc* ». Nous distinguons ainsi :

- **gravité du choc 0** = accident léger, aucun airbag n'est déclenché ;
- **gravité du choc 1** = accident moyen, il est possible que des airbags soient déclenchés au premier niveau ;
- **gravité du choc 2** = accident grave, des airbags sont déclenchés au premier niveau ;
- **gravité du choc 3** = accident très grave, des airbags sont déclenchés au premier et au deuxième niveau.

En plus de la « *gravité du choc* », le calculateur tient également compte, pour la stratégie de déclenchement des airbags, des informations comme la direction de l'accident, le type d'accident, le port de la ceinture par les passagers...

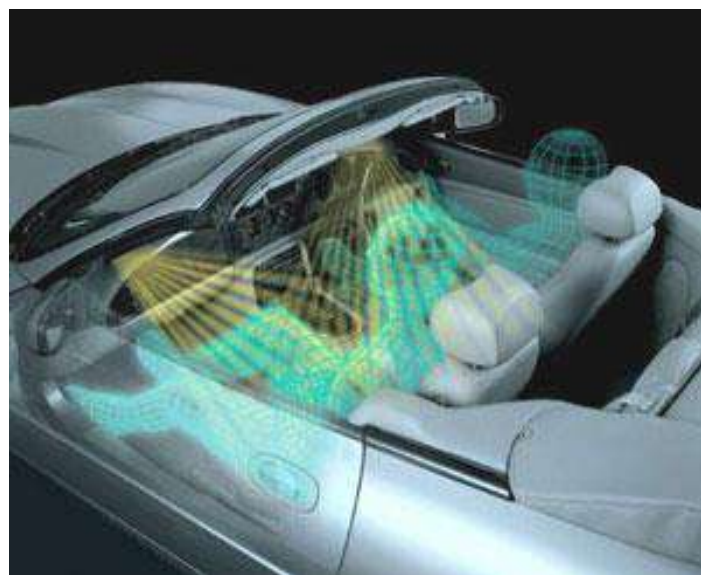
#### **II.5.4. Capteurs pour sièges auto**

Pour pouvoir contrôler plus précisément le fonctionnement des airbags et éviter un déclenchement inutile, une détection d'occupation de siège est utilisée. L'occupation d'un siège peut être détectée de différentes façons. Des tapis capteurs composés de capteurs de pression assistés par une électronique pour analyser la variation du poids. Ces tapis peuvent être intégrés dans le siège conducteur, le siège du passager avant et aussi les sièges arrières (Fig.II.24). Ils permettent de déterminer essentiellement, le poids total de la personne assise, mais font aussi l'estimation de sa taille en mesurant la distance entre les os fessiers. Un traitement des mesures détermine ensuite le niveau de déploiement du sac. Par exemple, Mercedes a déterminé quatre catégories de poids (1 à 30 [kg], 31 à 50 [kg], 51 à 70 [kg] et au-delà de 70 [kg]) avec plusieurs autres critères de déclenchement d'airbag. Ainsi, dans le cas d'une faible collision, le deuxième niveau de déploiement d'airbag peut, tout de même, être déclenché si le poids du passager est élevé pour lui assurer une meilleure protection.



**Figure II.24.** Système de détection d'une présence dans un habitacle de voiture [49].

Par ailleurs, l'utilisation de capteurs à infrarouges et à ultrasons a également été mise au point par les industriels. Ils sont montés au niveau de l'éclairage intérieur/du rétroviseur et surveillent à la fois l'occupation du siège et la position assise du passager (Fig.II.25). Une position incorrecte dite out-of-position peut être également détectée. Les informations obtenues à l'aide de ces dispositifs ont une influence directe sur le déclenchement de l'airbag, le déclenchement des prétensionneurs de ceinture et pour certains cas, des appuie-têtes actifs. Si certaines places ne sont pas occupées, le système d'airbag le détecte et les systèmes de protection correspondants ne sont pas automatiquement activés, en cas d'accident.



**Figure II.25.** Capteurs à infrarouge en étude pour Jaguar [50].

D'autres technologies de mesure de la morphologie du passager sont en développement. Elles utilisent un système de caméras stéréo qui permet la comparaison des images de chaque caméra ; et estime les positions exactes des passagers ou la présence de siège enfant. Dans ce dernier cas, l'airbag sera automatiquement déconnecté.

### II.5.5. Fonctionnement des airbags de sécurité

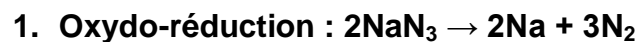
Les airbags sont pliés de façon très spécifique, pour permettre un déploiement optimal (Fig.II.26). La taille des airbags varie de 35 à 70 litres pour le côté conducteur et de 60 à 160 litres pour le côté passager avant ou arrières. Dans les deux cas, pour assurer un remplissage complet de l'airbag, un volume de gaz à injecter est toujours supérieur à la capacité de remplissage de ces sacs gonflables. Actuellement, le gaz utilise, pour le déploiement de ces airbags, est non-toxique et est composé de 90% d'azote.



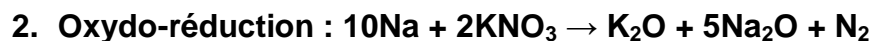
**Figure II.26.** Système de pliage de l'airbag conducteur [51].

En cas de choc, un microsystème électromécanique (MEMS) commande quasi instantanément le déploiement de l'airbag. La vitesse de déploiement peut atteindre localement 300 [km/h]. Le couvercle en plastique qui cache le coussin gonflable s'ouvre automatiquement, sous la pression exercée, lors du déploiement de l'airbag, une charnière le retenant en place. L'airbag est complètement gonflé en moins de 50 ms, soit 0,05 secondes, ce qui est équivalent à la moitié de la durée d'un clignement d'œil. Puis, l'airbag se dégonfle très rapidement en deux dixièmes de secondes.

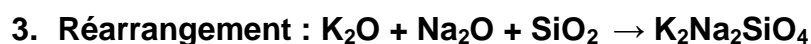
Pour assurer le gonflement de ces airbags, des combustibles solides auxquels s'ajoutent parfois du gaz comprimé sont utilisés. La réaction chimique est déterminée par la présence d'un réducteur, tel que l'azoture de sodium, un gaz explosif ( $\text{NaN}_3$ ) et de deux oxydants, le nitrate de potassium ( $\text{KNO}_3$ ) et le dioxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ). C'est une impulsion électrique transmise au détonateur qui va permettre d'enflammer les pastilles d'azoture de sodium et d'oxydants. C'est un composé ionique constitué de sodium Na et de l'azoture  $\text{N}_3$ . Sa structure moléculaire est caractérisée par un système d'électrons délocalisés. Les trois réactions chimiques qui ont lieu dans un airbag sont :



L'inflammation du  $\text{NaN}_3$  se traduit par une déflagration qui libère un volume pré-calculé de gaz  $\text{N}_2$  qui gonfle l'airbag. Le problème de cette réaction est qu'elle forme du sodium solide Na, qui s'enflamme de manière très violente, en présence d'eau, et qu'il faut le neutraliser. C'est là qu'intervient la deuxième réaction chimique.



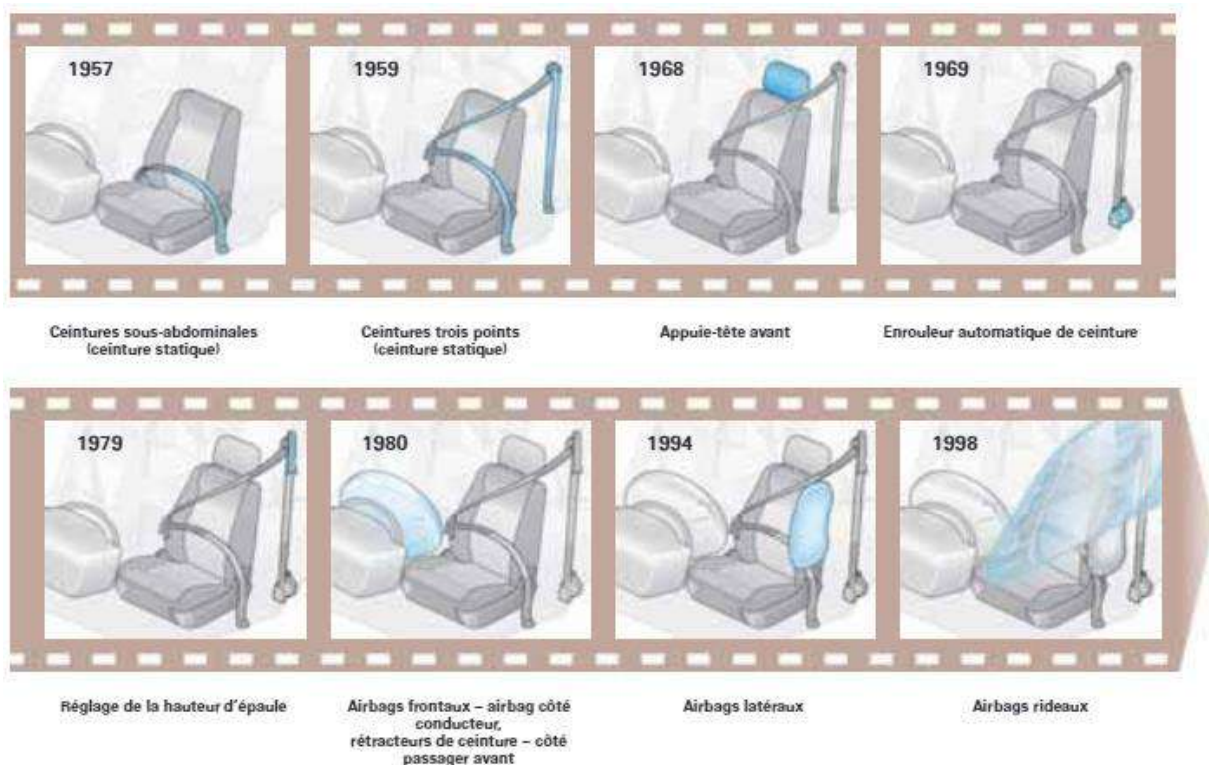
Le sodium Na va ainsi réagir avec le nitrate de potassium  $\text{KNO}_3$  pour donner du  $\text{Na}_2\text{O}$ . On peut remarquer que cette réaction produit également un volume supplémentaire d'azote  $\text{N}_2$ . Puis, le  $\text{K}_2\text{O}$  et le  $\text{Na}_2\text{O}$  réagissent sur de la silice  $\text{SiO}_2$  pour former enfin un sel de sodium et de potassium  $\text{K}_2\text{Na}_2\text{SiO}_4$ , qui est un silicate alcalin, autrement dit, une poudre de verre, un produit inoffensif, inerte, et non inflammable.



Par ailleurs, l'airbag possède sur ses flancs des trous, appelés événements pour assurer un bon amortissement des corps des passagers. La taille de ces événements est calibrée pour ne pas gêner le gonflage et respecter aussi, la durée de dégonflage nécessaire. Ceci permet un meilleur contrôle de la décélération du passager, lors d'un choc. Leur position des événements est soigneusement étudiée, pour ne pas brûler les mains des passagers, lors de l'évacuation des gaz chauds.

## II.6. Les airbags et les risques d'une mauvaise utilisation

Le développement des premiers airbags, pour l'automobile, remonte aux années soixante. Ces systèmes de sécurité ont été intégrés à la liste d'option dans certains véhicules, pour la première fois, dans les années soixante-dix, et sont devenus des équipements en série et incontournables dans les années quatre-vingt (Fig.II.27). Au fil des dernières décennies, ils se sont ensuite multipliés, dans chaque voiture si bien qu'un véhicule récemment acheté, dispose certainement d'airbags frontaux, latéraux et peut-être ; même des airbags de genoux voire aussi des airbags de rideaux. En cas d'accident, ces airbags permettent évidemment, de diminuer le risque de blessure grave, en amortissant les chocs, pour le conducteur et ses passagers. Ces coussins gonflables se déploient en quelques millisecondes, en cas d'accident, permettent effectivement de sauver des vies humaines. A titre indicatif, combiné à la ceinture de sécurité, avec un airbag frontal, permet seul de réduire le risque de blessure grave à mortelle à la tête de près de 75 %.



En principe, un airbag est conçu pour sauver la vie des passagers, si un accident grave survient. Encore faut-il bien veiller à ne pas en faire, au contraire, un facteur d'aggravation. Pour se déployer, un airbag se gonfle par explosion. Ce n'est pas

donc un équipement anodin, car la force de son explosion, peut causer de graves séquelles ; si ok le conducteur et les passagers du véhicule n'observent pas de strictes règles de sécurité. Sans ceinture, le choc contre un airbag peut facilement aggraver les lésions, dans le cadre d'un accident à faible vitesse. Pire, cette mauvaise habitude, qu'on a parfois de laisser traîner ses pieds sur le tableau de bord, lorsqu'on est installé au siège passager avant, sur un long trajet. En cas de déclenchement de l'airbag, les jambes se retrouvent, malheureusement, projetées vers le pare-brise et les genoux, vers le visage. De quoi, là aussi, aggraver sensiblement les lésions en cas d'accident, suite au déclenchement des airbags.

Aussi, conduire bras nus, peut aussi entraîner des conséquences inattendues. En effet, le déploiement des airbags se fait à des vitesses supérieures à 250 km/h, ce qui peut conduire, parfois à des cas de décollement de la peau de mains et des avants bras. Et même lorsque ces règles de sécurité sont respectées, le déclenchement des airbags est une expérience très désagréable, pour l'ensemble des passagers. L'opération de déploiement de l'airbag, peut sonner facilement le conducteur et les passagers ; qui risquent de prendre une très grosse baffe, allant jusqu'à les laisser inconscients, pendant quelques secondes.

Récemment, des études ont montré, que l'utilisation des airbags, pouvait poser problème avec des personnes de très petite taille (moins de 1 mètre 49), surtout s'il s'agit du conducteur, où cela peut devenir dangereux ; à cause de sa position trop proche du volant [63,64]. D'ailleurs, les adultes de petite taille, souvent des femmes, ont tendance à conduire le nez sur le tableau de bord, une position idéale pour prendre l'ouverture de l'airbag en pleine tête. Les statistiques mondiales montrent ainsi, que sur les adultes morts, des suites de blessures ; infligées par les airbags, 84% étaient des femmes, la plupart de petites tailles [65-66]. Dans ce cas, il vaut même mieux désactiver l'airbag frontal du volant. Aussi, par mesure de sécurité, le conducteur ne doit surtout pas être situé à moins de 25 centimètres du volant, et le passager à moins de 30 centimètres du tableau de bord. Le non respect de ces distances peut, malheureusement, occasionner des brûlures voire des fractures, des blessures aux vertèbres verticales, si l'airbag explose. Les traumatismes les plus souvent constatés sont des lésions temporaires, voire plus rarement permanentes de l'ouïe. Pour résoudre ce dernier problème, les industriels étudient d'ailleurs, des

sièges conducteurs et passagers ; munis de capteurs dans les glissières d'avancement des sièges. Lorsque l'assise est trop proche du volant, le sac gonflable serait automatiquement désactivé.

D'autres études récemment publiées [53-58], ont mis en lumière un risque pour l'audition des occupants de la voiture ; à cause du bang du déclenchement des airbags. L'explosion peut provoquer des lésions du tympan. La déflagration est tellement très bruyante, peut occasionner des lésions temporaires ou permanentes vu la puissance sonore, qui peut aller jusqu'à 160 dB, un seuil très élevé et un niveau très douloureux pour les oreilles. L'exposition à un bruit de 140 dB, pendant plus de 5 ms, peut amener une perte d'audition et qu'à 165 dB, même pour un temps plus bref, des dégâts irréversibles peuvent apparaître au niveau de la cochlée.

Enfin, il reste aussi le problème de déclenchement de l'airbag, lorsque au cas, où un caillou heurte le pare-chocs, ou lorsque le conducteur frappe son volant d'un geste rageur. Le dispositif de sécurité risque de devenir dangereux ; car un airbag doit se déployer uniquement lorsque ceci est nécessaire. Pour éviter ces risques, des capteurs de choc disposés, à différents endroits sur le véhicule, recueillent en permanence des informations centralisées ; par un ordinateur de bord. Puis, un processeur y analyse en temps réel, la sévérité des chocs, détectés et décide de déclencher ou non l'airbag, en fonction des spécifications transmises par le constructeur. Ce dernier aura préalablement déterminé, grâce à de nombreuses simulations informatiques ; et des crashes tests, les seuils les plus pertinents de déclenchement.

Pour autant, il faut se garder de tout catastrophisme, les airbags sauvent aussi beaucoup de vies. Pour conclure, un airbag reste un progrès dans la réduction des blessures des occupants d'un véhicule en cas d'accident grave. Plusieurs études estiment que les airbags font baisser de 25% le risque de mourir, pour un conducteur ceinturé. Mais ses dangers restent réels, que ce soit, en cas d'un dysfonctionnement ou même du simple fait de son déploiement, en cas de choc.



## **II.7. Conclusion**

Ce deuxième chapitre a permis de présenter les différents types d'airbags de sécurité, intégrés dans un habitacle de voitures touristiques et leurs principes de déploiement. En général et, de manière plus détaillée, les éléments de sécurité dédiés au bon fonctionnement des airbags sont le calculateur, le générateur de gaz, le système de déclenchement, et le coussin gonflable. Par ailleurs, nous avons présenté les plus utilisés, nous avons ensuite décrit leurs principes de fonctionnement et nous avons évoqué leurs avantages et leurs inconvénients. De plus, nous avons présenté les risques d'une mauvaise utilisation. D'autre part, la réalisation des airbags nécessitait une très bonne connaissance des matériaux les constituant mais également les paramètres qui commandent leurs déploiements, en quelques milliers de seconde.

## Références

- [1] A. D'Elia, S. Newstead, J. Scully, Evaluation of vehicle side airbag effectiveness in Victoria, Australia, *Accid. Anal. Prev.*, Vol., pp. 67-72, 2013.
- [2] M.M. Ahmed, R. Franke, K. Ksaibati, D.S. Shinstine, Effects of truck traffic on crash injury severity on rural highways in Wyoming using Bayesian binary logit models, *Accid. Anal. Prev.*, Vol. 117, pp. 106-113, 2018.
- [3] D. Cadogan, C. Sandy, M. Grahne, Development and evaluation of the mars pathfinder inflatable airbag landing system, [Acta Astronautica](#), Vol. 50, pp. 633-640, 2002.
- [4] E.J. Barbero, E.M. Sosa, X. Martinez, J.M. Gutierrez Reliability design methodology for confined high-pressure inflatable structures, *Eng. Struct.*, Vol. 51, pp. 1-9, 2013.
- [5] D.C. Viano, C.S. Parenteau, Difference in dummy responses in matched side impact tests of vehicles with and without side airbags, *Traffic Inj. Prev.*, Vol. 17, pp. 524-529, 2016.
- [6] J. Anderson, S. Hernandez, Roadway classifications and the accident injury severities of heavy-vehicle drivers, *Anal. Methods Accid. Res.*, Vol. 15, pp. 17-28, 2017.
- [7] H. Yu, R. Yuan, Z. Li, G. Zhang, D. T. Ma, Identifying heterogeneous factors for driver injury severity variations in snow-related rural single-vehicle crashes, [Accident Analysis & Prevention](#), Vol. 144, pp. 105587, 2020.
- [8] D. Gierczycka, D. S. Cronin, Occupant thorax response variations due to arm position and restraint systems in side impact crash scenarios, [Accident Analysis & Prevention](#), Vol. 106, pp. 173-180, 2017.
- [9] D. Gierczycka, B. Watson, D. Cronin, Investigation of occupant arm position and door properties on thorax kinematics in side impact crash scenarios-comparison of ATD and human models, *Int. J. Crashworthiness*, Vol. 20, pp. 242-269, 2015.
- [10] S. Potula, K.N. Solanki, D.L. Oglesby, M.A. Tschopp, M.A. Bhattia, Investigating occupant injuries and safety through simulating the interaction between side curtain airbag deployment and an out-of-position occupant, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 49, pp. 392-403, 2012.
- [11] B.M. Campbell, D.S. Cronin, Coupled human body and side impact model to predict thoracic response *Int. J. Crashworthiness*, Vol. 19, pp. 394-413, 2014.
- [12] A. de Lima and R. J. Marczak, Simulating occupant injury in rollover crashes. Part 1: A numerical comparison of design procedures for vehicle roof strength assessment, *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 20, pp. 78-94, 2014.
- [13] B. Han and J. H. Seo, "Analysis of vehicle rollover using multibody dynamics, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 30, pp. 797-802, 2016.
- [14] W. N. Newberry, S. Imler, M. Carhart, A. Dibb, K. Balavich, and J. Croteau, Belted occupant kinematics and head excursion during the airborne phase of vehicle rollover: evaluation of the effects of rollover-deployed curtain airbags, *SAE Technical Papers*, Vol. 1, pp. 211-214, 2014.
- [15] G. Shaw, D.J. Lessley, J.L. Ash, M.R. Sochor, J.R. Crandall, J. Luzon-Narro, C. Arregui-Dalmases Side impact PMHS thoracic response with large-volume air bag, *Traffic Inj. Prev.*, Vol. 15, pp. 40-47, 2014.

- [16] A.M.A. Van der Heijden, A.J. Buijk, P.H.L. Groenen-boom, Numerical simulation of airbag behavior Proceedings of the First International Conference on Structures under Shock and Impact, Cambridge, MA, 1989.
- [17] C. Amira, Étude et simulation du déploiement des airbags d'un véhicule suite à une collision, Master 2 soutenu à l'Université de Badji Mokhtar-Annaba, 2017.
- [18] F. Robache, Évaluation sur simulateur de conduite du comportement humain en situation de pré-crash: application à l'amélioration des airbags, Thèse soutenue à l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2017.
- [19] J.M. Auberlet, M.P. Pacaux, F. Anceaux, P. Plainchault, and F. Rosey, The impact of perceptual treatments on lateral control: A study using fixed-base and motion-base driving simulators, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 42, pp. 166-173, 2010.
- [20] S. Eucker, K. Mutter, D. Bose, E. Wu, and M. Sochor, 254 Role of Airbag Use on Head Injury Outcomes in Side versus Frontal Impact Car Crashes, *Annals of Emergency Medicine*, Vol. 60 pp. 92, 2012.
- [21] M. Jernigan and S. M. Duma, The effects of airbag deployment on severe upper extremity injuries in frontal automobile crashes, *The American Journal of Emergency Medicine*, Vol. 21, pp. 100-105, 2003.
- [22] P. A. MacLennan, W. S. Ashwander, R. Griffin, G. M. Jr., and L. W. R. III, Injury risks between first- and second-generation airbags in frontal motor vehicle collisions, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 40, pp. 1371-1374, 2008.
- [23] J. Hoffmann, M. Sakamoto, M. Freisinger, and I. Shiga, Potential passenger restraint system improvement by the application of a multi-surface airbag, *Airbag*, 2006.
- [24] A. Zodiac, Airbag Passager Takata: Twin Bag ou « la tête dans le sac, 2009.
- [25] Autoliv. "Fixed-Hub Steering Wheel with Optimized Airbag, 2009. <http://www.autoliv.com/wps/wcm/connect/autoliv/Home/What+We+Do/Steering+Wheels/Fixed+Hub/Fixed-Hub+Steering+Wheel+with+Optimized+Airbag>.
- [26] Trw, Driver Side Airbag with Self Adaptive Venting (SAVe), 2009.
- [27] Trw, Fixed Airbag Asymmetric Airbag, 2009.
- [28] Y.-D. Seo, S. H. Chung, and J. J. Yoh, Automotive airbag inflator analysis using the measured properties of modern propellants, *Fuel*, Vol. 90, pp. 1395-1401, 2011.
- [29] X. Deng, S. Potula, H. Grewal, K. N. Solanki, M.A. Taschopp, M. F. Horstemeyer, Finite element analysis of occupant head injuries: Parametric effects of the side curtain airbag deployment interaction with a dummy head in a side impact crash, [Accident Analysis & Prevention](#), Vol. 55, pp. 232-241, 2013.
- [30] S.R. Potula, K.N. Solankia, D.L. Oglesby, M.A. Tschopp, M.A. Bhatia, Investigating occupant safety through simulating the interaction between side curtain airbag deployment and an out-of-position occupant, *Accid. Anal. Prev.*, Vol. 49, pp. 392-403, 2012.
- [31] F.A. Bankdak, P.C. Chan, Z. Lu, An experimental airbag test system for the study of airbag deployment loads, *International Journal of Crashworthiness*, Vol.7, pp. 129-161, 2002.
- [32] M. Bedard, G.H. Guyatt, M.J. Stones, J.P. Hirdes, The independent contribution of driver, crash and vehicle characteristics to driver fatalities, *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 34, pp. 717-727, 2002.

- [33] M. Christy, H. Margaret, A.L. Hines, A.S. Roge, rAssessment of forearm injury due to a deploying driver-side airbag, Proceedings of 16<sup>th</sup> International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, N°. 98-S5-O-09 (1998), pp. 1044-1054, 1998.
- [34] C.M. Farmer, E.R. Braver, E.L. Mitter, Two-vehicle side impact crashes: the relationship of vehicle and crash characteristics to injury severity, Accident Analysis and Prevention, Vol. 29, pp. 399-406, 1997.
- [35] M. Iwamoto, K. Miki, K.H. Yang, Development of a finite element model of the human shoulder to investigate the mechanical responses and injuries in side impact, JSME International Journal Series C-Mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing, Vol. 44, pp. 1072-1081, 2001.
- [36] T. Iyota, The effect of occupant protection by controlling airbag and seatbelt, 18th International Technical Conference on Enhanced Safety of Vehicles, Vol. 4, pp. 2518-2525, 2003.
- [37] J.H. Jason, Y. Narayan, A.P. Frank, Door velocity and occupant distance affect lateral thoracic injury mitigation with side airbag, Accident Analysis and Prevention, Vol. 43, pp. 829-839, 2011.
- [38] <https://www.google.fr/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.forum-audi.com%2Ftopic-153-audi-a3-sportback-8p-securite-protection-des-occupants.html&psig=AOvVaw2tFDo2A-IUZSq72IIWxt56&ust=1597910596307000&source=images&cd=vfe&ved=2ahUKewiG2ln95qbrAhUGbRoKHb6PCDEQr4kDegUIARCSAQ>
- [39] <https://techautoalgerie.wordpress.com/tag/generateur-pyrotechnique/>
- [40] A. Chabbi, Étude et simulation du déploiement des airbags d'un véhicule suite à une collision, Master 2 soutenu à l'Université Badji Mokhtar – Annaba 2016.
- [41] <https://techautoalgerie.wordpress.com/category/syst-de-protection/>
- [42] <http://darkounet06.free.fr/technique6.html>
- [43] <http://www.forum-audi.com/topic-125-audi-a5-protection-des-occupants-systemes-de-securite.html>
- [44] [http://www.crdp-montpellier.fr/ressources/examens/sujets/18/320/2500700/E4/U42\\_SUJET-Option%20A.pdf](http://www.crdp-montpellier.fr/ressources/examens/sujets/18/320/2500700/E4/U42_SUJET-Option%20A.pdf)
- [45] <https://docplayer.fr/79087947-Service-training-protection-des-occupants-audi-systemes-passifs-programme-autodidactique-410.html>
- [46] <https://patents.google.com/patent/EP0803700A1/fr>
- [47] [https://www.wikiwand.com/fr/Ceinture\\_de\\_s%C3%A9curit%C3%A9](https://www.wikiwand.com/fr/Ceinture_de_s%C3%A9curit%C3%A9)
- [48] [https://doc.rero.ch/record/323722/files/Les\\_syst\\_mes\\_embarqu\\_s\\_dans\\_l\\_automobile\\_-\\_Travail\\_de\\_Bachelor.pdf](https://doc.rero.ch/record/323722/files/Les_syst_mes_embarqu_s_dans_l_automobile_-_Travail_de_Bachelor.pdf)
- [49] <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/0981002.pdf>
- [50] <https://www.numerama.com/tech/266006-comment-fonctionne-le-systeme-de-detection-de-pietons-de-la-golf.html>
- [51] <https://www.ornikar.com/code/cours/securite/dispositif/airbags>
- [52] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Ceinture\\_de\\_s%C3%A9curit%C3%A9](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ceinture_de_s%C3%A9curit%C3%A9)

# **Chapitre III : Caractérisation expérimentale et modélisation du comportement mécanique**

---

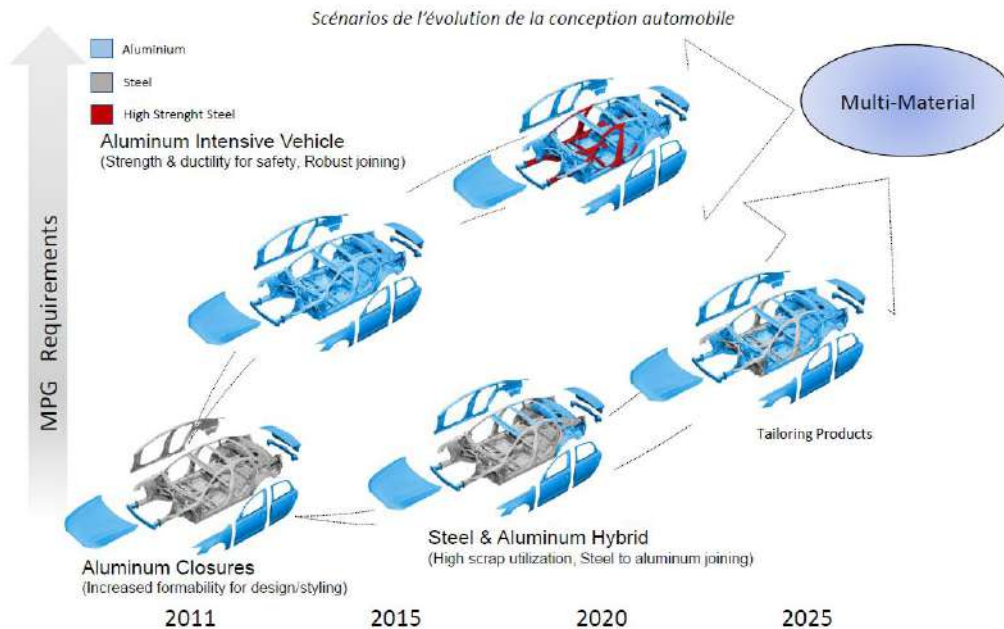
### III.1. Introduction

Ces dernières années, l'allègement des véhicules est devenu un enjeu majeur pour la croissance verte de l'industrie automobile [1-3]. Ceci en vue de réduire essentiellement la consommation en carburant et les émissions de CO<sub>2</sub> [4]. Traditionnellement, les matériaux les plus utilisés dans l'industrie automobile sont les aciers. Ils permettent une mise en forme aisée tout en garantissant les caractéristiques nécessaires, requises par le cahier de charge à savoir une contrainte élastique relativement faible, une bonne résistance à la fatigue, une résistance à la corrosion...etc [5-8]. Récemment, les chercheurs ont mis en place de nouveaux types d'acier tels les aciers micro-alliés, les aciers TRIP (Transformation Induced Plasticity), les aciers à haut manganèse baptisés TWIP (Twinning Induced Plasticity) et les aciers DP (Dual Phase) qui présentent des propriétés physiques et mécaniques nettement améliorées [9,10]. Cette nouvelle génération de matériaux permet ainsi aux industriels de l'automobile de diminuer le poids des carrosseries sans avoir à changer les chaînes de fabrication et de montage. Ces aciers sont peu coûteux, facilement disponibles et leurs méthodes de mise en œuvre sont très bien connues [11]. Récemment, l'aluminium s'est progressivement imposé dans la fabrication de certaines pièces d'automobiles pour sa rigidité et sa masse. Toutefois, l'utilisation des aciers demeure plus importante que jamais pour leur faible coût de production, ainsi que les propriétés de résistance supérieures à celles des autres matériaux [12-14].

Dans la fabrication des carrosseries d'automobiles, les ingénieurs font appel à trois grandes classes de matériaux à savoir : l'acier, les polymères thermoplastiques et les alliages d'aluminium (Fig.III.1). À l'heure actuelle, les véhicules automobiles de série restent majoritairement constitués de matériaux métalliques (soit près de 75 % de la masse totale d'une voiture). Toutefois, l'emploi des différents matériaux pour l'industrie de l'automobile doit tenir compte de leurs caractéristiques physiques. Il s'avère donc important de développer des modélisations permettant de mieux appréhender leur comportement mécanique, et d'éclairer les changements qu'apportent ces matériaux sur le comportement final provenant d'une multitude de sources externes [15-19].

Dans cette optique, notre travail consiste à contribuer à l'étude de la modélisation numérique d'une collision frontale d'un passager ceinturé en position assise. Dans ce contexte, il est donc très important de déterminer expérimentalement les propriétés

mécaniques associées aux matériaux retenus dans cette étude et d'identifier leur comportement mécanique afin de s'approcher des conditions réelles d'une collision frontale.



**Figure III.1.** Evolution de la structure de carrosserie d'une automobile [20].

Dans ce chapitre, des essais de traction uni-axiale sont présentés et discutés. Le but principal de ce travail est de construire une base de données pour développer des modèles de comportements mécaniques des différents matériaux utilisés. La première partie est consacrée essentiellement à la description du protocole expérimental mis en place pour la caractérisation du comportement mécanique jusqu'à l'endommagement. Ensuite, nous présentons le bilan des résultats expérimentaux en termes de propriétés mécaniques des cinq matériaux retenus dans notre étude. Enfin, la dernière partie se focalise sur la modélisation du comportement mécanique et la construction des modèles macroscopiques validés sur la base des données expérimentales puis implémentées dans un code de calcul de structures LsDyna® pour simuler les essais de traction.

### III.2. Description des matériaux de l'étude

Pour la fabrication de la carrosserie d'une automobile, en général, les ingénieurs utilisent plusieurs matériaux spécifiques tels que les tôles d'acier galvanisées, les tôles d'aluminium, mais aussi des matériaux composites. Dans notre étude, nous nous

intéressons essentiellement à cinq nuances de matériaux très présentes dans la fabrication de carrosserie de voitures afin de reproduire voire de simuler correctement une collision frontale. La composition chimique de certains de ces matériaux sont données dans le tableau III.1.

**Tableau III.1.** Composition chimique de l'alliage d'aluminium AA5052 et de l'acier galvanisé.

Alliage d'aluminium AA5052									
Eléments	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Zn	Autres
Quantité	95.7-97.7	0.15-0.35	<0.1	<0.4	2.2-2.8	<0.1	<0.25	<0.1	<0.15
Acier laminé à froid									
Eléments	C	Mn	Cr	Mo	-	-	-	-	-
Quantité	0.08-0.18	1.6-2.4	0.4	-					

Avant de rentrer dans le cœur du chapitre, il est préalablement nécessaire d'introduire les matériaux étudiés dans le cadre de ce travail.

### III.2.1. L'alliage d'aluminium AA5052

L'aluminium est un métal brillant, blanc-argent, caractérisé par sa faible densité, ses hautes conductibilités électrique et thermique et sa résistance aux agents chimiques. L'aluminium est un métal ductile et très malléable, ce qui permet un usinage facile. Ses propriétés mécaniques peuvent être modifiées avec l'addition d'autres métaux, notamment le cuivre, le magnésium, le manganèse, le silicium, le lithium et le zinc, formant ainsi des alliages. Dans l'industrie de l'automobile, il est apprécié grâce à sa légèreté qui permet de réduire la consommation et les émissions de carburant. De plus l'aluminium ne rouillant pas comme l'acier, la longévité d'une pièce en aluminium est triplée par rapport à ce dernier. A titre d'exemple, l'aluminium de type AA5052 est très utilisé pour fabriquer par presse à froid, le pavillon et le capot-moteur, par extrusion, le châssis tubulaire, et par moulage sous pression, les pièces coulées. Les caractéristiques mécaniques de l'alliage AA5052 sont illustrées dans le tableau III.2.



### **III.2.2. Les tôles d'acier Dual Phase**

Les carrosseries de voiture sont aussi fabriquées avec des pièces embouties en tôle d'acier de type Dual Phase (DP) caractérisé par une résistance élevée et une limite d'élasticité pouvant atteindre 400 [N/mm<sup>2</sup>]. Les tôles d'aciers de type DP utilisées dans l'industrie d'automobile contiennent en moyenne 15% d'ultra high strength steel (UHSS) et 35% de high strength steel (HSS). La microstructure de ces aciers est constituée d'une phase martensitique dure dispersée dans une matrice ferritique ductile. L'acier DP est caractérisé par une tenue à la fatigue et une capacité d'absorption d'énergie qui le prédisposent à des pièces de structure et de carrosserie. L'ensemble des propriétés physiques de l'acier du type Dual Phase sont rapportés au tableau III.3.

### **III.2.3. Le verre feuilleté**

Les verres feuilletés sont devenus récemment comme le seul type de verre à être utilisé dans l'industrie automobile pour fabriquer des pare-brises. Récemment, ces verres ont vu leur champ d'application s'élargir pour être utilisés dans la fabrication de toits ouvrants, ainsi que sur certaines vitres latérales des véhicules de luxe. Avec les nouvelles normes de sécurité, l'utilisation des verres feuilletés va devenir de plus en plus généralisée pour l'ensemble des vitres des véhicules de séries. Le verre feuilleté se compose de deux plaques de verre soudées à chaud grâce à une feuille de plastique de type Polyvinyle de Butyral (PVB). L'ensemble est assemblé sous vide, en un seul élément par l'application de la pression de l'ordre de 12 bars et à une température de l'ordre de 140 °C. Ce type d'assemblage empêche principalement la pénétration éventuelle d'un projectile à l'intérieur de l'habitacle. Les éclats de verre ne sont donc plus un problème, en cas d'accident ou de tentative de vol. Le tableau III.3 illustre essentiellement les caractéristiques mécaniques des verres les plus utilisées.

### **III.2.4. Polyester stratifié 1000D**

Les polyesters appartiennent à la famille des fibres synthétiques. Ils servent surtout à fabriquer des fibres textiles dont les plus connues sont le Tergal et le Dacron. Le polyester possède une bonne élasticité et une très haute résistance à la traction. Sous forme de stratifié, il est très utilisé actuellement pour fabriquer des sangles pour l'industrie de l'automobile, de l'aéronautique, du ferroviaire, du naval. Son champ d'application s'est élargi ces dernières années pour être utilisé aussi dans le

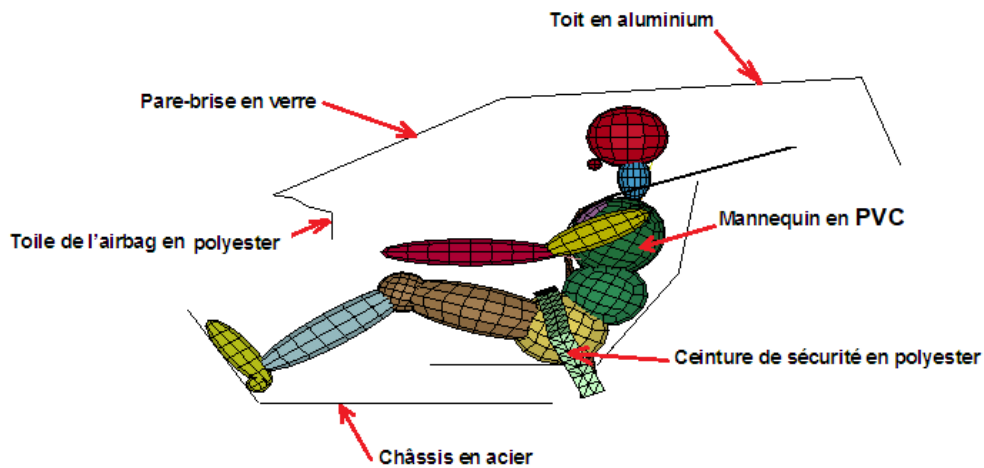
développement et la fabrication des airbags de nouvelle génération. Grâce à un faible coefficient de frottement, le polyester peut assurer un déploiement aisé des airbags et un contact doux avec la peau. En effet, les airbags sont élaborés à partir de filament en mail 3D de polyester de type 1000D afin d'assurer d'une part, une excellente circulation d'air à l'intérieur du coussin gonflable et d'autre part, un contact confortable au déploiement. Par ailleurs, le polyester stratifié est aussi adopté par les ingénieurs pour la fabrication des ceintures de sécurité. Cette dernière participe également à la protection des passagers d'un véhicule en cas de choc ou de freinage brusque. Les propriétés du filament de polyester sont présentées dans le tableau III.2.

### **III.2.5. Poly (chlorure de vinyle)**

Le poly chlorure de vinyle connu aussi commercialement par le PVC, est un polymère thermoplastique de grande consommation. Aujourd'hui, le PVC est l'une des matières plastiques les plus utilisées dans plusieurs secteurs tels que le bâtiment et les travaux publics, l'emballage, l'automobile...etc. Ces dernières années, les ingénieurs d'automobile ont commencé à l'utiliser aussi, pour fabriquer des mannequins en taille et en poids réalistes. Ces mannequins sont adaptés pour simuler différents scénarios de collisions, que ce soit pour les chocs latéraux ou pour les chocs frontaux, en milieu aquatique statique ou dans d'extraction de véhicules ou de décombres. Les mannequins en PVC sont utilisés essentiellement pour prédire les blessures en cas de chocs. Et ainsi aider les constructeurs d'automobile, à trouver une réponse en termes de sécurité afin de concevoir et de développer leurs systèmes de protection passifs tels que les airbags, les systèmes de retenue, les systèmes d'absorption d'énergie. Leurs propriétés mécaniques les plus importants sont relatées dans le tableau III.2.

**Tableau II.2.** Caractéristiques mécaniques des matériaux choisis [21-23].

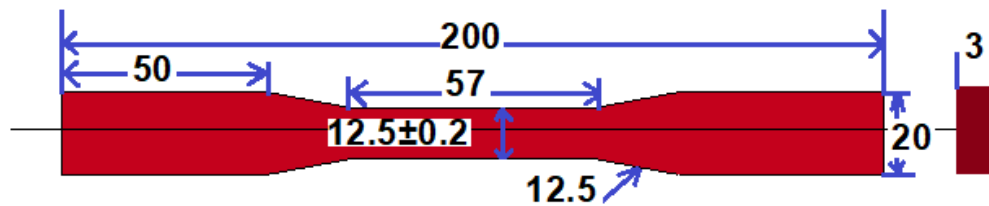
Matériaux	Densité [kg/m <sup>3</sup> ]	Module de Young [GPa]	Limite élastique [MPa]	Coefficient de Poisson	Allongement à la rupture [%]
Acier	7800	210	350	0.29	5-25
Aluminium	2700	70	320	0.34	2-20
Verre	2230	69	80	0.30	3
PVC	1400	4	25-70	0.40	5-80
Polyester	1200	11	83	0.38	2.5



**Figure III.2.** Modèle éléments finis utilisé dans la simulation numérique d'une collision frontale.

### III.3. Epreuve de traction

Des essais de traction uni-axiale sur des éprouvettes plates ont été mis en place préalablement au dispositif expérimental décrit dans ce chapitre. Ces essais ont été réalisés à l'ENP (**Ecole Nationale Polytechnique**) de Constantine sur une machine électrique MTS dans des conditions de sollicitation quasi-statique, avec une vitesse de déplacement pour les éprouvettes haltères (métalliques ou en PVC) de l'ordre de 1mm/min et 0.5mm/min utilisée pour les éprouvettes rectangulaires issus des airbags et/ou les ceintures de sécurité. Six éprouvettes de tractions ont été prélevées pour chaque type de matériau métallique ou thermoplastique testés. Les dimensions de ces échantillons en forme d'haltères sont basées sur la norme ASTM B557M. Celles-ci sont présentées à la figure III.3. Il est important de rappeler que tous ces échantillons avaient une épaisseur de 3 [mm].



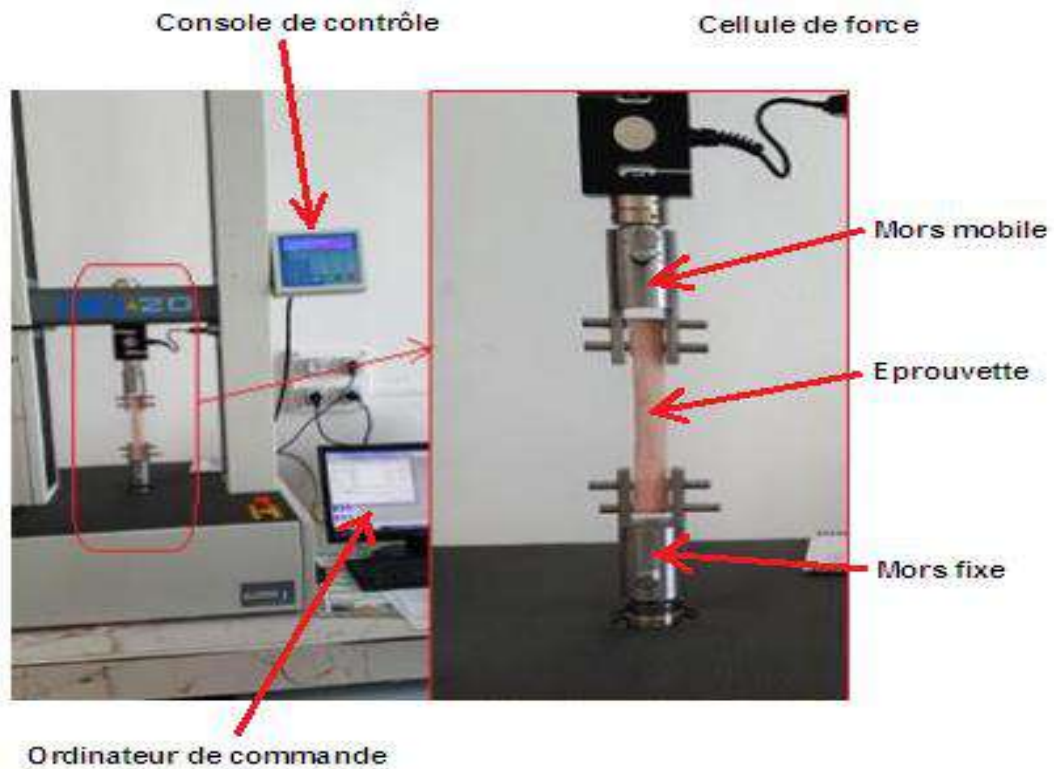
**Figure III.3.** Dimensions des éprouvettes de traction.

Afin de comparer aussi le comportement mécanique des tissus issus des airbags dans trois directions de sollicitation différentes, trois éprouvettes de dimensions  $200 \times 40 \text{ mm}^2$  ont été prélevées dans chaque direction ; à savoir dans le sens de chaîne (à  $0^\circ$ ), dans le sens de trame (à  $90^\circ$ ) ou hors axes (à  $45^\circ$ ). Vu la contrainte de la largeur des ceintures de sécurité, nous nous sommes contentés de les caractériser que dans la direction longitudinale. Dans cette étude, les essais de caractérisation en traction ont été réalisés à partir des tissus issus de trois différents constructeurs (Renault, Peugeot et Volkswagen).

#### III.4. Dispositif expérimental

La machine d'essai Lloyd EZ20 est une presse uni-axiale électrique asservie de traction-compression alternée, de marque M.T.S. (Fig.III.4). Ses capacités maximales sont de 20 [kN] en force axiale avec un déplacement axial maximal de 870 [mm].

Les éprouvettes en forme d'haltères sont maintenues entre deux mors, un fixe et l'autre mobile pour être sollicité en traction uniforme. Pour les éprouvettes extraites des tissus issues des airbags ou des ceintures de sécurité sont fixées à la machine par pincement à l'aide de deux attaches articulées (Fig.III.4). Ce dispositif spécifique aux matériaux tissés nous a permis de réaliser nos essais de traction dans les sens chaîne et trame voire même hors axes.

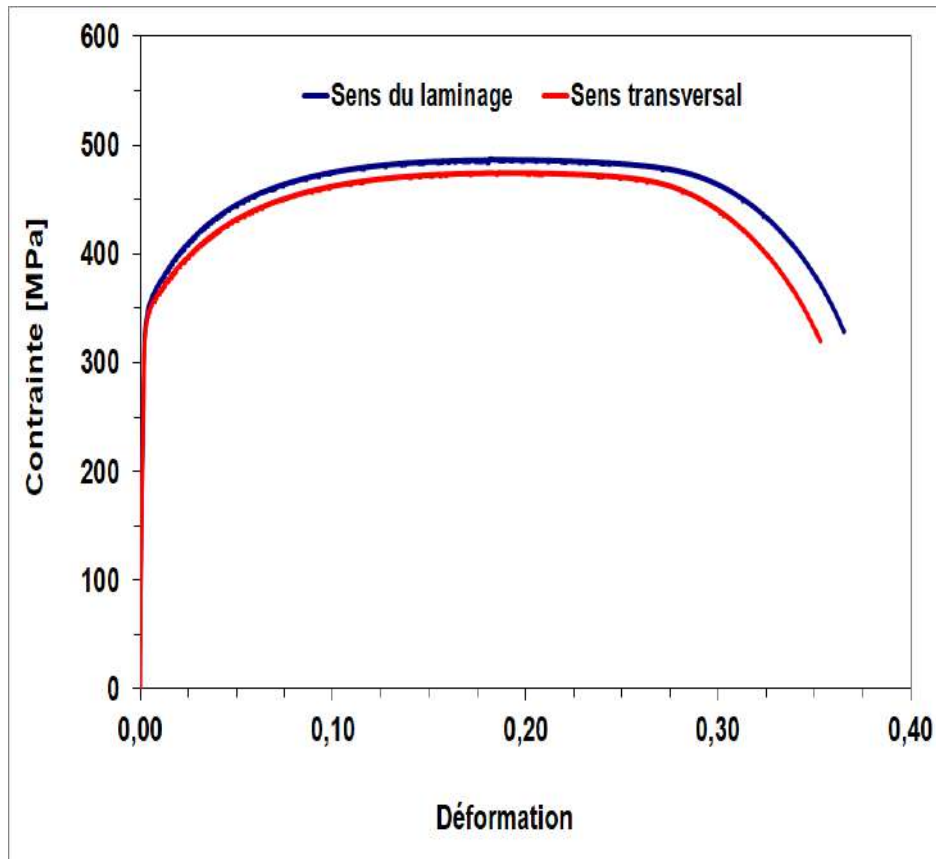


**Figure III.4.** Machine d'essai électrique MTS de traction-compression [24,25].

### III.5. Résultats expérimentaux et discussion

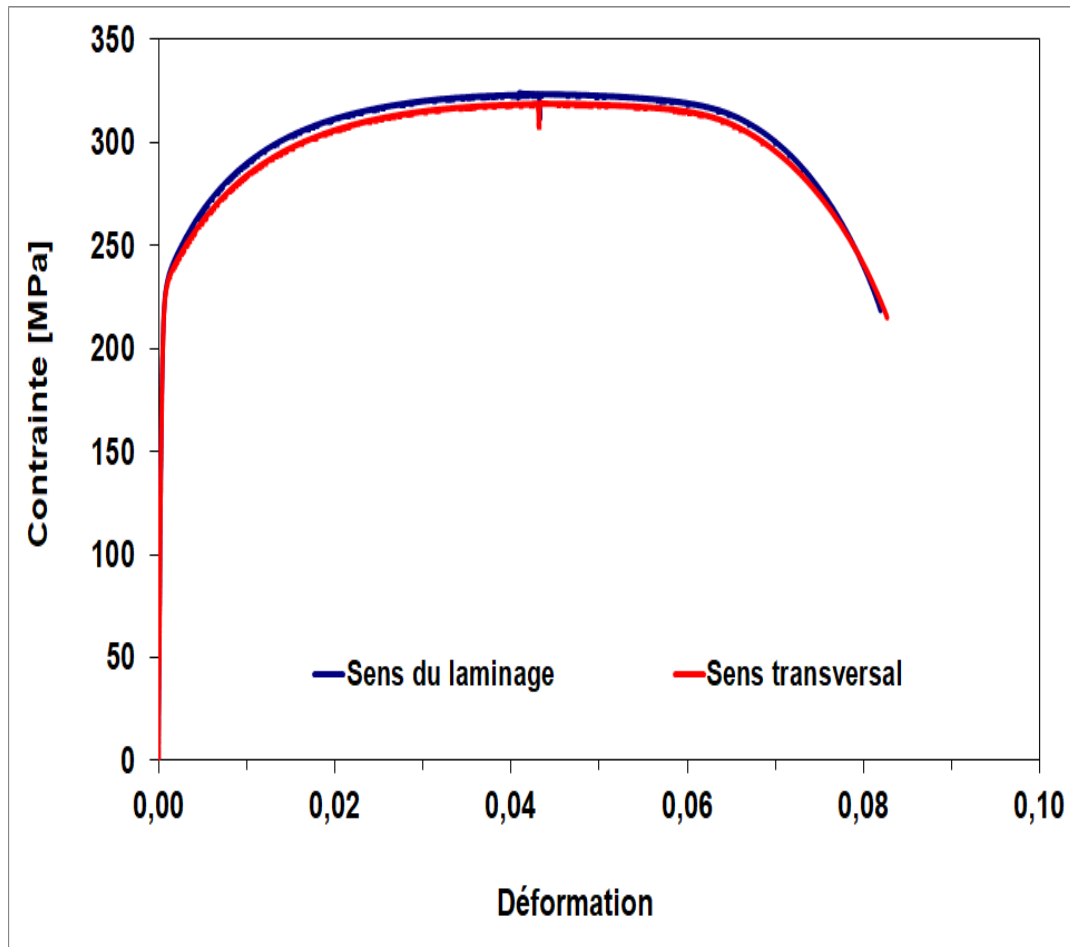
#### III.5.1. Comportement en traction des tôles métalliques

Les figures III.5 et III.6 représentent l'évolution de la contrainte de traction en fonction de la déformation jusqu'à rupture des éprouvettes en acier (DP) ou en alliage d'aluminium (AA5052) obtenu à une vitesse de déplacement imposée égale à 1 [mm/min]. Ces courbes sont tracées pour deux différents sens de sollicitations de la tôle, dans le sens de laminage, et aussi dans le sens transversal.



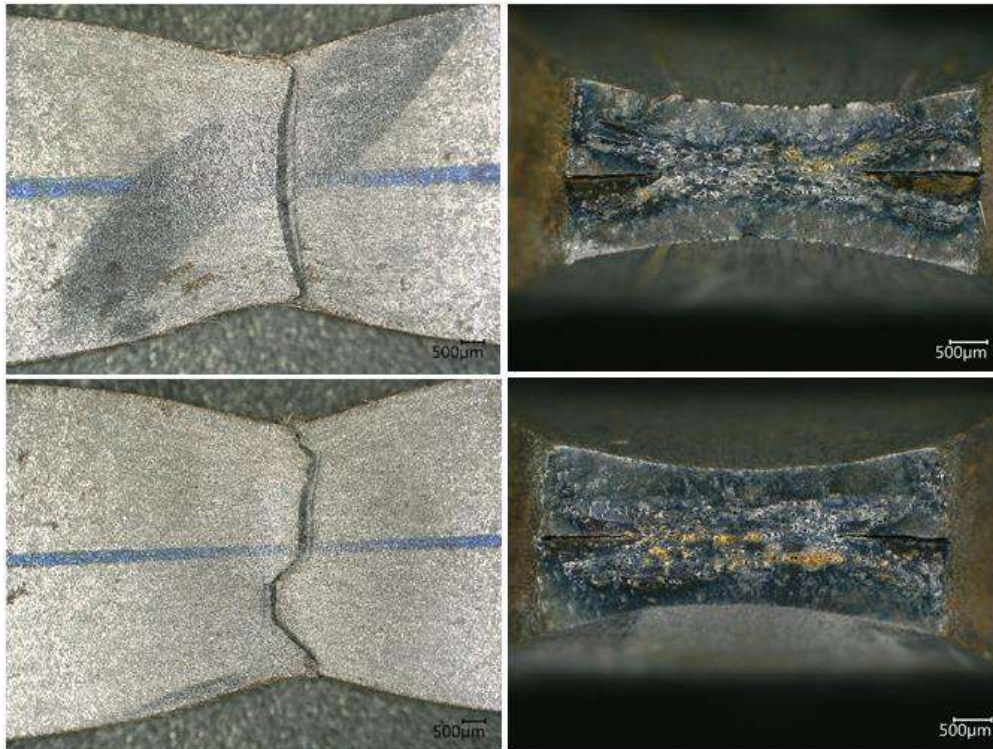
**Figure III.5.** Evolution de la contrainte de traction en fonction de la déformation obtenue sur des éprouvettes extraites de tôle d'acier DP.

Dans les deux cas, nous observons un comportement élastique linéaire avec une déformation homogène ; tant que la contrainte est inférieure à la limite élastique. Au-delà, la déformation plastique se localise, et on assiste à un écoulement plastique non linéaire observé avec l'augmentation de la déformation. L'éprouvette se plastifie puis se rompt progressivement, c'est le phénomène de striction. Il est essentiel de rappeler que, les essais de traction ont été facilement reproductibles avec des courbes bien superposables. Par ailleurs, on peut imaginer qu'il y a une faible influence du sens de laminage sur le niveau des efforts appliqués pendant les phases de mise en forme pour la fabrication des châssis de voitures.



**Figure III.6.** Evolution de la contrainte de traction en fonction de la déformation obtenue sur des éprouvettes extraites de tôle en aluminium AA5052.

L'observation des faciès est aussi importante pour déterminer l'origine de la rupture. Elle peut se révéler très utile lors d'expertises de pièces ayant rompes. La figure III.7 illustre, à titre indicatif, l'aspect macroscopique des faciès de rupture des éprouvettes testées et qui correspondant au mode ductile dans le cas d'un acier DP. La striction apparaît à environ 4,6% de la déformation totale à la rupture. Cette trajectoire de rupture est perpendiculaire aux directions de chargement avec une forme irrégulière (Fig.III.7). Nous distinguons clairement une surface rugueuse, terne et chaotique (Fig.III.7). Les éprouvettes ont toutes été cassées, au milieu de la zone utile où la contrainte est la plus élevée. L'endommagement dans ces matériaux est diffus et relativement important.



**Figure III.7.** Rupture ductile des éprouvettes de traction en acier DP.

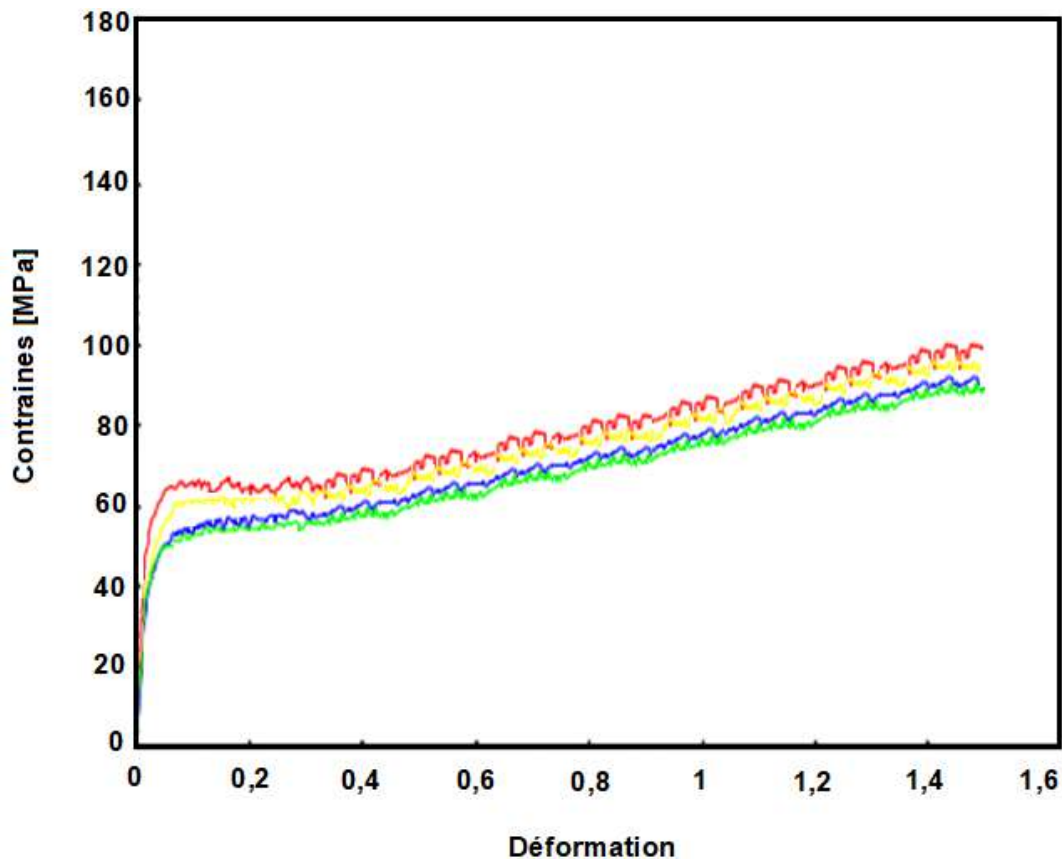
L'observation au microscope optique a fait l'objet de nombreuses études, en vue de mieux comprendre les mécanismes de déformation et d'endommagement [26-28]. L'analyse des faciès de rupture réalisées dans cette étude a bien fourni des renseignements, en ce qui concerne les mécanismes qui ont amené à la rupture catastrophique de nos éprouvettes. En effet, la rupture est transgranulaire, elle se produit dans un plan perpendiculaire à l'axe de chargement de l'éprouvette, et caractérisée par la présence d'une zone déformée plastiquement. La surface observée est très rugueuse, mate pourvue de nombreuses cupules et éventuellement d'inclusions (Fig.III.7).

### **III.5.2. Comportement en traction des éprouvettes thermoplastiques**

Le comportement mécanique du polymère PVC, comme tous les polymères thermoplastiques est très sensible aux conditions d'essai et plus particulièrement à la température et à la vitesse de déformation. Dans notre travail, nous nous intéressons essentiellement à déterminer le comportement global de notre matériau et notamment le module d'Young, la limite élastique et le seuil de plasticité. L'analyse par des essais de traction uni-axiale sur des éprouvettes thermoplastiques en PVC, obtenues par usinage, à partir de plaques de dimension 400X200mm<sup>2</sup> a été faite les dimensions de



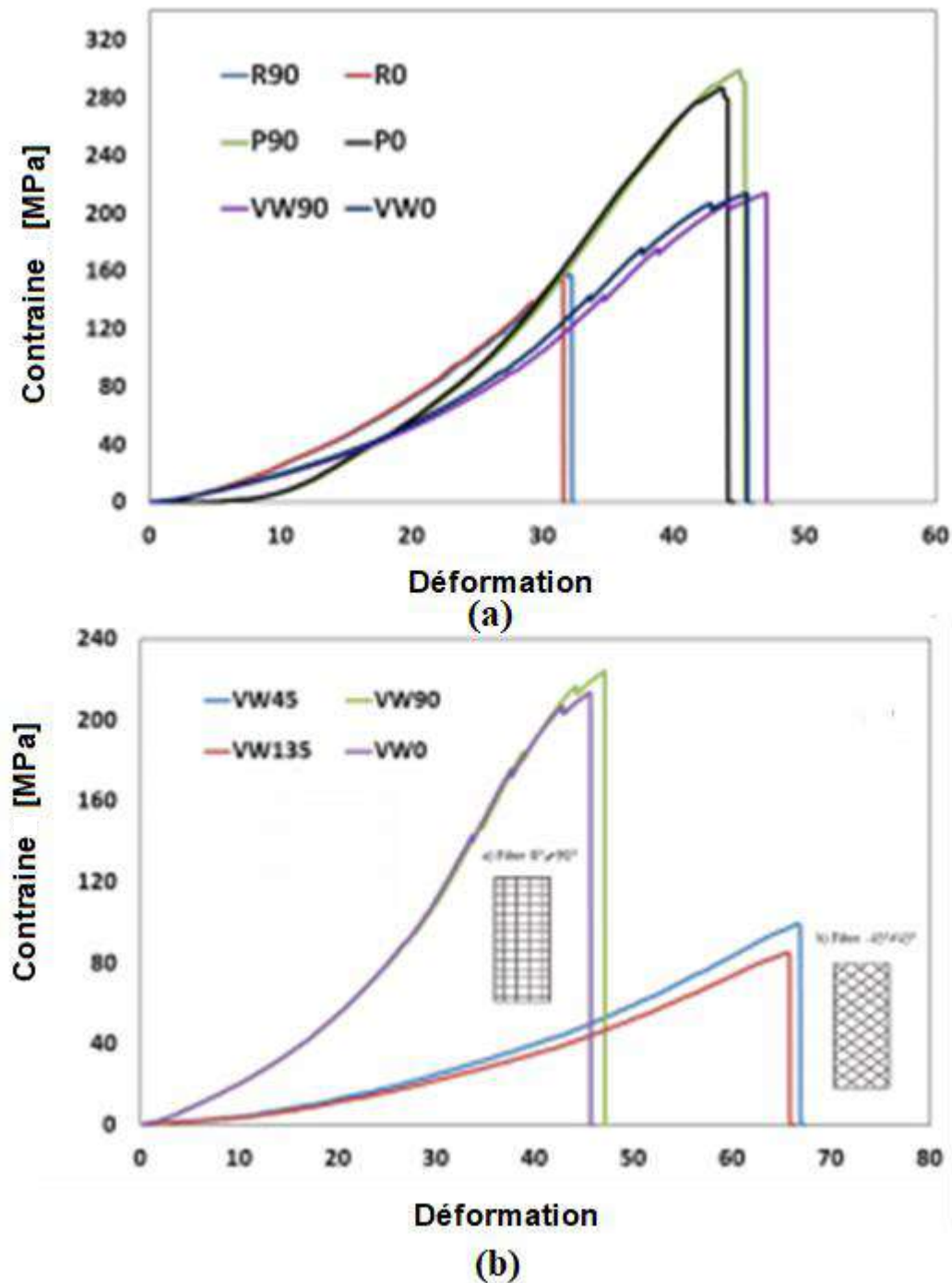
ces éprouvettes sont données par la Figure III.3. Ces essais ont été répétés (six fois) pour s'assurer de la répétitivité des résultats. La réponse mécanique montre bien un comportement quasi linéaire à l'origine. Puis, une nette augmentation de contrainte apparaît lorsque la déformation plastique est amorcée et qui se propage à travers l'échantillon. Enfin, nous assistons à ce stade à une striction entièrement propagée suivi de la rupture finale de l'éprouvette (Fig.III.8).



**Figure III.8.** Evolution de la contrainte en fonction de la déformation d'une éprouvette PVC en traction uni-axiale.

### III.5.3. Comportement en traction des matériaux tissés

Afin de déterminer le comportement mécanique des airbags et des ceintures de sécurité, des essais de traction uni-axiale jusqu'à la rupture ont été réalisés sur des échantillons extraits de ces tissus. Ces tests ont été effectués avec un capteur de force de 1 [kN] et une vitesse de déplacement de 0.5 [mm/min]. Chaque essai a été répété six fois. La figure III.9 présente les tracés de la contrainte en fonction de la déformation pour des éprouvettes issues des airbags découpés à partir de tissus des trois différents constructeurs (Renault, Peugeot, Volkswagen).

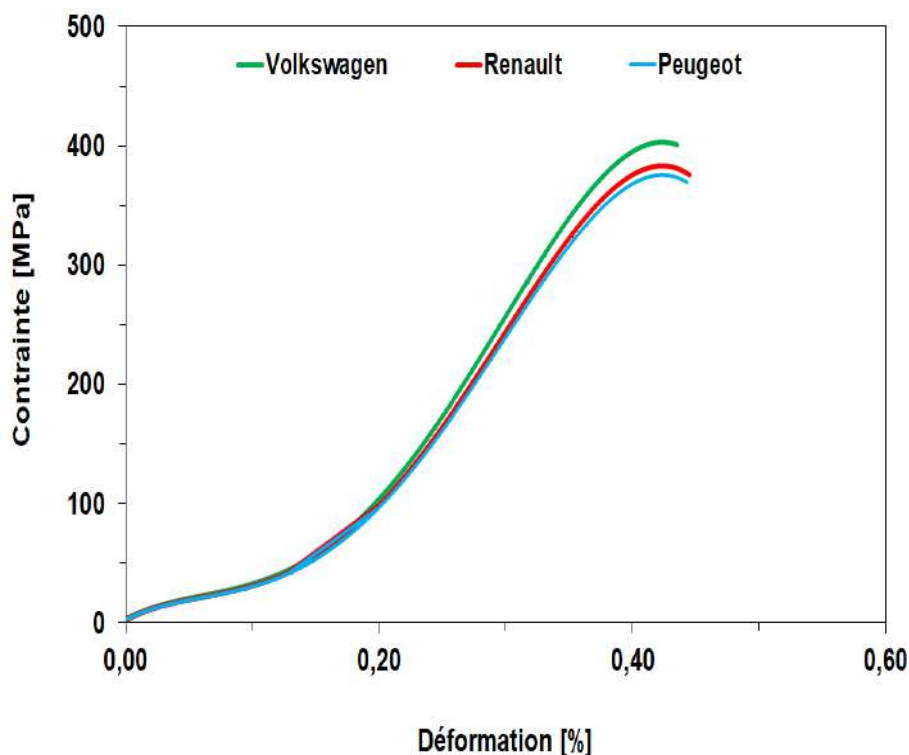


**Figure III.9.** Evolution de la contrainte de traction en fonction de la déformation des tissus issus des airbags de trois constructeurs de véhicules.

L'ensemble des éprouvettes testées présentent un comportement hyper-élastique non-linéaire presque semblable jusqu'à la rupture totale de l'échantillon. Les valeurs de déformation à la rupture finale des matériaux ont été estimées à 0,322 ; 0,441 et 0,472 pour les différents tissus, issus des trois constructeurs (R/P/VW), (Fig.III.9 (a)). Il a été aussi constaté que les éprouvettes à 45° ou à 135° affichent une hyper-

élasticité et respectivement plus marqué. La résistance à la traction et l'allongement à la rupture sont respectivement 43% et 71%. Les valeurs sont moins élevées que pour les sens longitudinaux et transversale. L'anisotropie des matériaux se manifeste dans la raideur qui varie en fonction de l'orientation (Fig.III.9 (b)). Les éprouvettes issues des airbags fabriqués par le constructeur Renault présentent un comportement plus raide que celles issues des airbags des deux autres constructeurs Peugeot et/ou Volkswagen.

La Figure III.10 montre la superposition des courbes de la contrainte de traction en fonction de la déformation, pour des éprouvettes issues des ceintures de sécurité des trois constructeurs (Peugeot, Renault et Volkswagen). Elle présente un comportement hyper-élastique non-linéaire presque semblable dans la direction du chargement jusqu'à la rupture totale.



**Figure III.10.** Evolution de la contrainte de traction en fonction de la déformation des tissus des ceintures de sécurité de trois constructeurs différents.

#### III.5.4. Bilan des essais de traction dans le plan du matériau

Les essais réalisés ont permis de caractériser les principales propriétés mécaniques de quatre matériaux possédant des comportements macroscopiques différents. Ces

résultats servent, essentiellement comme base de données pour construire nos modèles permettant de réaliser des calculs de structures pour le crash test. Concernant le comportement mécanique des verres feuilletés, nous nous sommes contentés, dans cette étude, par les résultats relatés dans la littérature [29-31]. Son comportement a été défini dans nos simulations par deux paramètres ( $E$ ,  $\nu$ ). Le tableau III.3 récapitule les principales propriétés que nous pouvons déduire des résultats d'essais de traction dans le plan pour l'ensemble des matériaux retenus dans cette étude (pour le verre, c'est les valeurs données dans la littérature).

**Tableau III.3.** Les principales caractéristiques physiques des différents types de matériaux.

Matériaux	Module d'Young [GPa]	Limite élastique [MPa]	Limite à la rupture [MPa]
AA5052	69±2	230±2	325±2
DP	208±2	348±2	485±2
PVC	3.6±2	28±2	-
Verre	68	50	-
Polyester	10.6±2	-	160-284±2

La prochaine partie présente l'identification et l'implémentation de lois de comportement macroscopique spécifique aux matériaux retenus pour simuler initialement une traction uni-axiale présentée dans ce chapitre puis, une collision frontale qui fera l'objet du chapitre V.

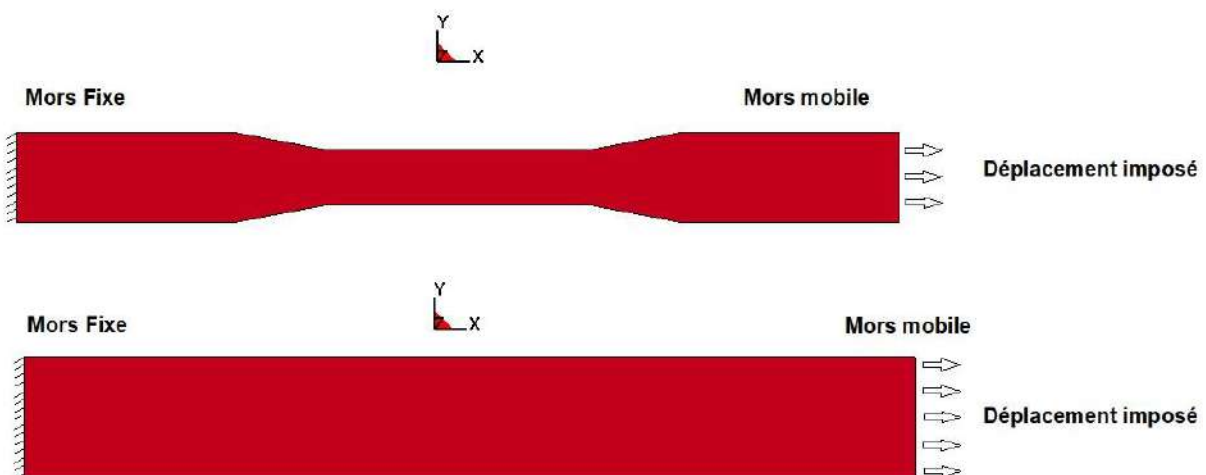
### III.6. Simulation numérique du comportement monotone en traction

#### III.6.1. Conditions aux limites

Après avoir effectué des essais de traction sur différentes éprouvettes et déterminer les caractéristiques mécaniques des matériaux retenus dans cette étude, nous nous intéressons, cette fois-ci, à la modélisation de leurs comportements mécaniques sous sollicitations simples. Pour cela, nous avons réalisé des simulations numériques de la traction uni-axiale avec le logiciel LsDyna® d'une part sur des éprouvettes de forme haltère et d'autre part sur les tissus d'airbags et des ceintures de sécurité, de dimensions 200x50 [mm<sup>2</sup>]. Les calculs sont effectués en explicite. Ces exemples permettent de valider nos résultats numériques avec ceux obtenus expérimentalement

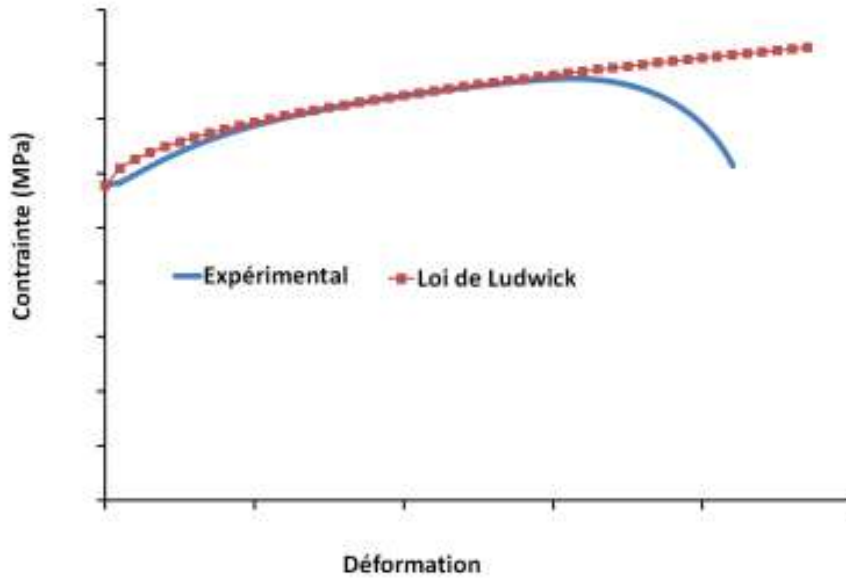
par des essais de traction uni-axiale. Dans ce chapitre, nous nous contentons de présenter et valider deux cas qui concerne le comportement mécanique des aciers DP dans le sens laminage et les ceintures de sécurité.

Dans cette étude, nous faisons l'hypothèse que les éprouvettes sont encastées dans les mors de manière rigide c'est à dire encasté. Les degrés de liberté de l'autre extrémité sont tous bloqués sauf, le déplacement le long de l'axe longitudinal. Les géométries, ainsi que les conditions aux limites du problème, sont représentées sur la figure III.11. Par ailleurs, le comportement mécanique de certains matériaux (DP et AA5055) a été identifié expérimentalement avec une loi de comportement qui comporte, d'une part, deux inconnues :  $E$  et  $\nu$  et d'autre part, les constantes de plasticité ( $n, k$ ) qui définissent la loi d'écrouissage de type Ludwick. Les paramètres d'écrouissage de la loi sont obtenus par un lissage jusqu'au point de striction de la courbe des contraintes en fonction des déformations ; issues de nos essais de traction. La Figure III.12 montre la comparaison de la courbe rationnelle de traction avec la prédiction de la loi de Ludwick.



**Figure III.11.** Configuration des deux éprouvettes utilisées lors du test de traction – Conditions aux limites.

Concernant le PVC, les airbags et les ceintures de sécurité, l'ensemble des points des courbes de traction contraintes/déformations respectives a été implémenté dans leurs intégralités ; dans le code du calcul LsDyna®, pour reproduire leurs comportements mécaniques. Les éprouvettes ont été maillées avec 1088 éléments solides 3D à huit nœuds avec une intégration réduite (type C3D8R).



**Figure III.12.** Prédiction de l'écrouissage par la loi de Ludwick.

### III.6.2. Résultats numériques et discussion

Les paramètres rhéologiques correspondant au comportement mécanique des matériaux, retenus dans cette étude, ont été déterminés à partir des résultats expérimentaux, de nos essais de traction. Ils ont été ensuite implémentés dans le logiciel LsDyna<sup>®</sup> pour simuler les essais de traction.

Le premier exemple, présenté dans cette section, concerne les simulations numériques d'un essai de traction sur des éprouvettes en acier DP. Les isovaleurs de contraintes de V.M pour un acier DP sont reportés sur la figure III.13. Les résultats obtenus permettent, de voir clairement, une bonne reproductibilité des différentes étapes de déformation de l'éprouvette ; avec des concentrations de contrainte ; observées aux bords puis du raccordement du rayon puis dans la zone centrale. C'est à cet endroit que l'éprouvette casse, lors d'un essai mécanique. Les résultats de la simulation sont bien conformes, en ce qui concerne l'évolution géométrique de l'éprouvette durant son chargement uni-axiale (Figs.III.13 et 14).

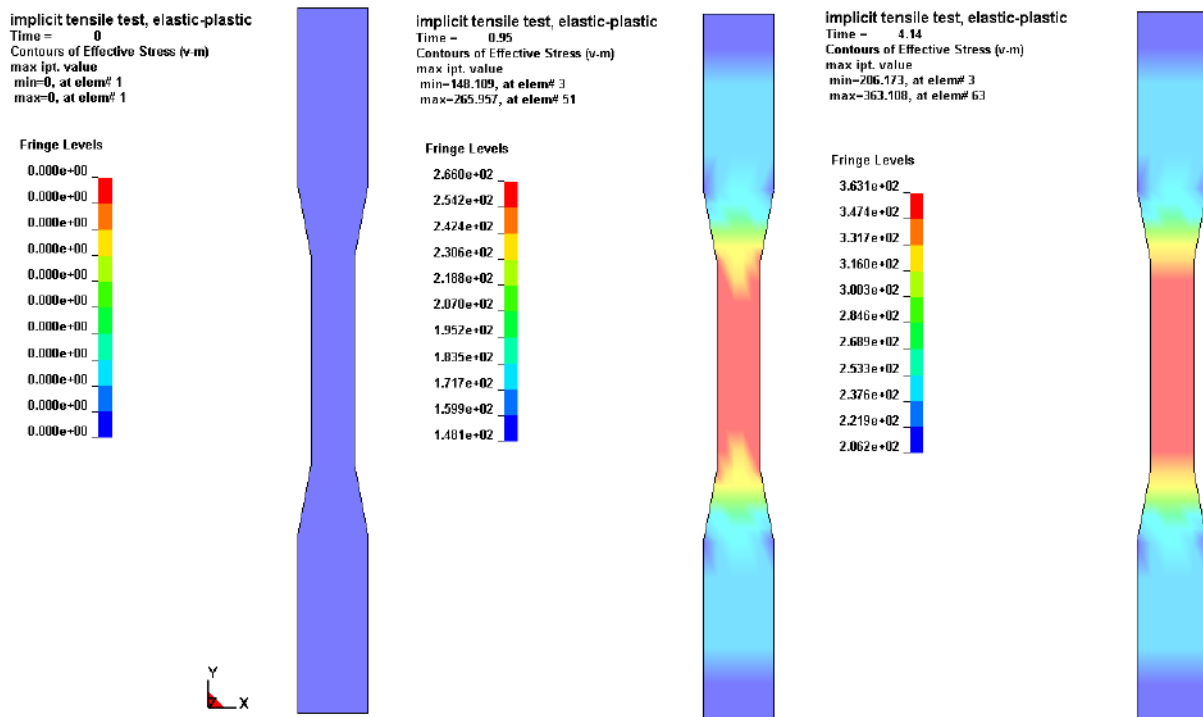


Figure III.13. Isovaleurs de contraintes de Von Mises dans une éprouvette en acier.

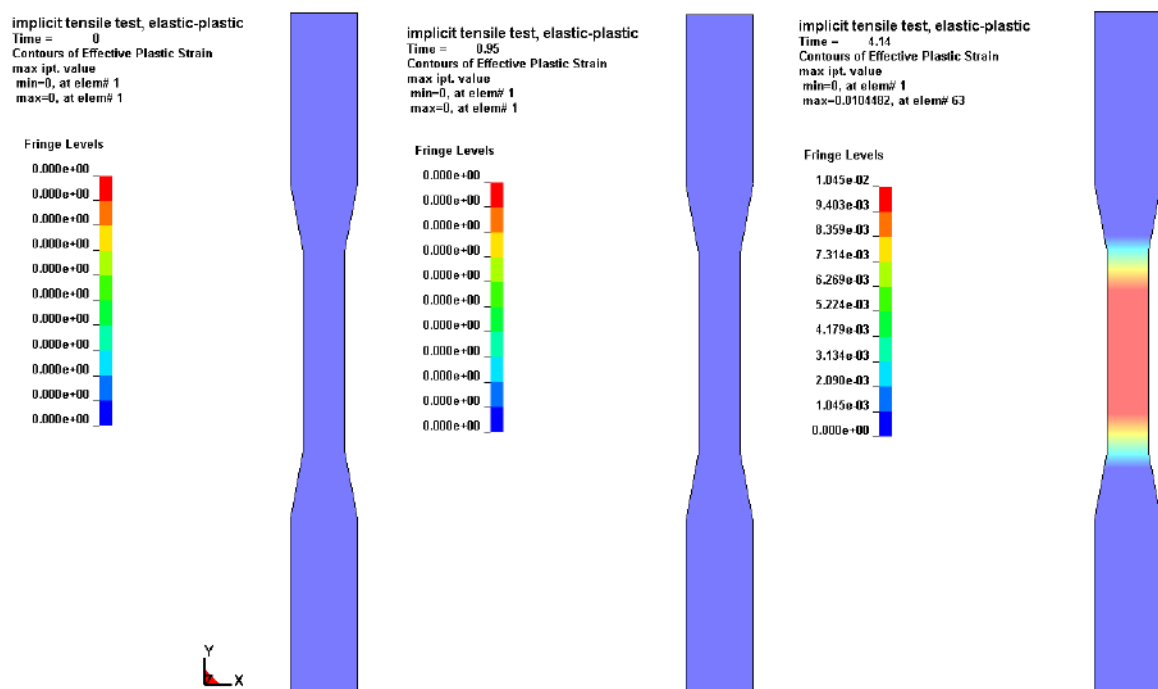
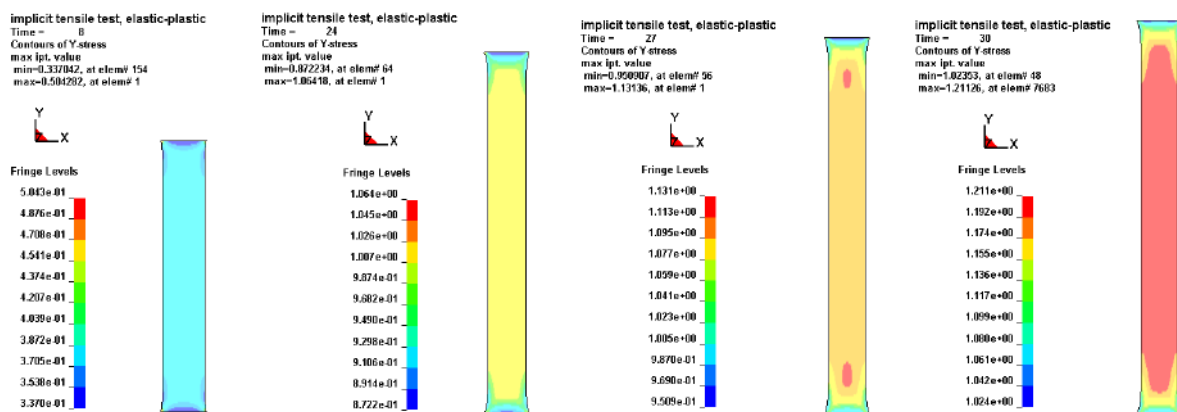


Figure III.14. Isovaleurs de déformation plastique dans une éprouvette en acier DP.

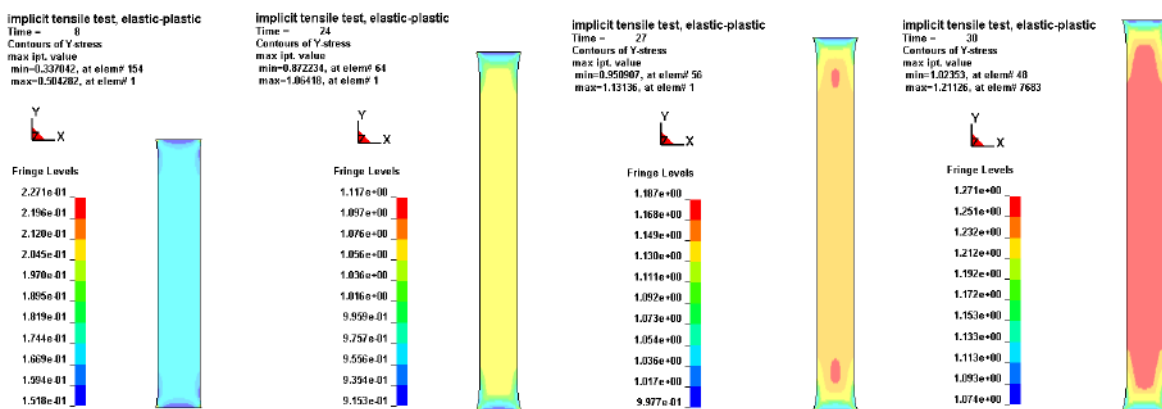
Le deuxième exemple traité, dans cette partie, concerne la simulation numérique des essais de traction uni-axiale sur des éprouvettes rectangulaires issues des différents tissus de trois constructeurs d'automobile différents. Les champs de contrainte de traction suivant la direction du chargement sont présentés sur

les Figures III.15 à III.17. La contrainte de traction rencontrée au centre est sûrement une sollicitation sévère avec peu de sur-contraintes sur les bords. Une rupture dans la zone utile peut être facilement attendue. Il a été constaté que les tissus d'airbag issus des constructeurs (P,VW) sont moins raides que celui du constructeur Renault. Ceci peut être expliqué par la différence de densité des mailles retenues dans les deux directions (chaîne et trame), la torsion effectuée, la grosseur du fil et sa matière utilisée.

Les éprouvettes diagonales, issues des airbags du constructeur Volkswagen, présentent un comportement hyper-élastique très important et moins résistant. Il est complètement différent de ceux obtenus dans le sens des chaînes et trames, afin de donner plus de souplesse au déploiement de l'airbag.



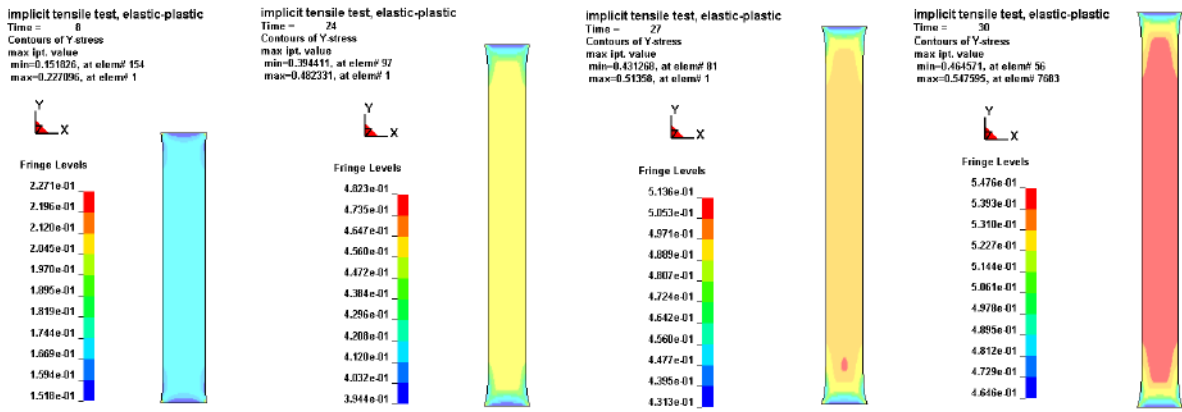
(a)



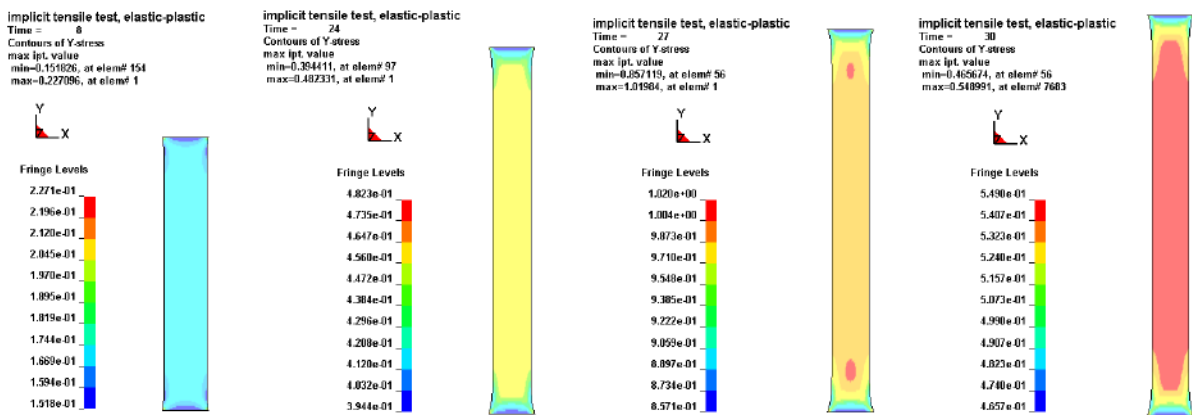
(b)

**Figure III.15. Isovaleurs de contrainte de traction : (a) longitudinale et (b) transversale (Renault).**



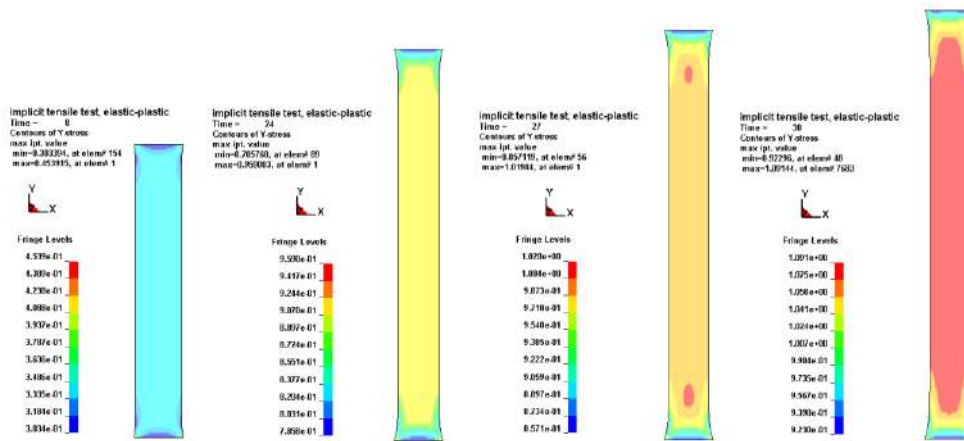


(a)

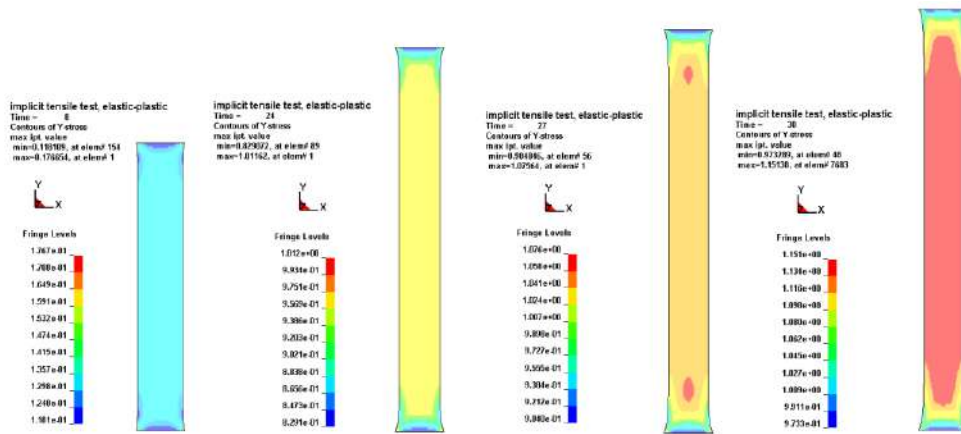


(b)

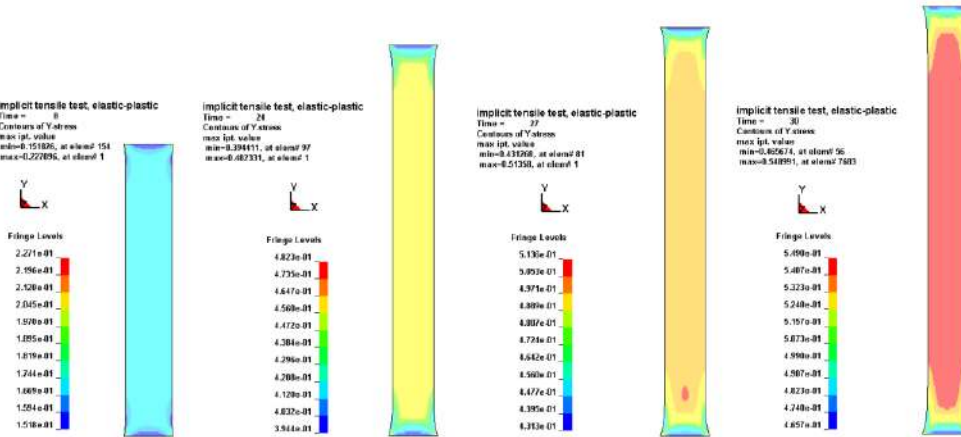
Figure III.16. Isovaleurs de contrainte de traction : (a) longitudinale et (b) transversale(Peugeot).



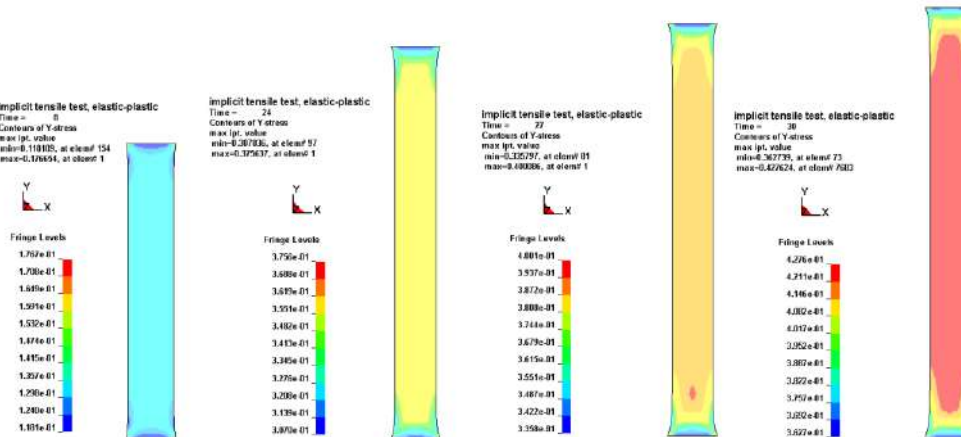
(a)



(b)



(c)



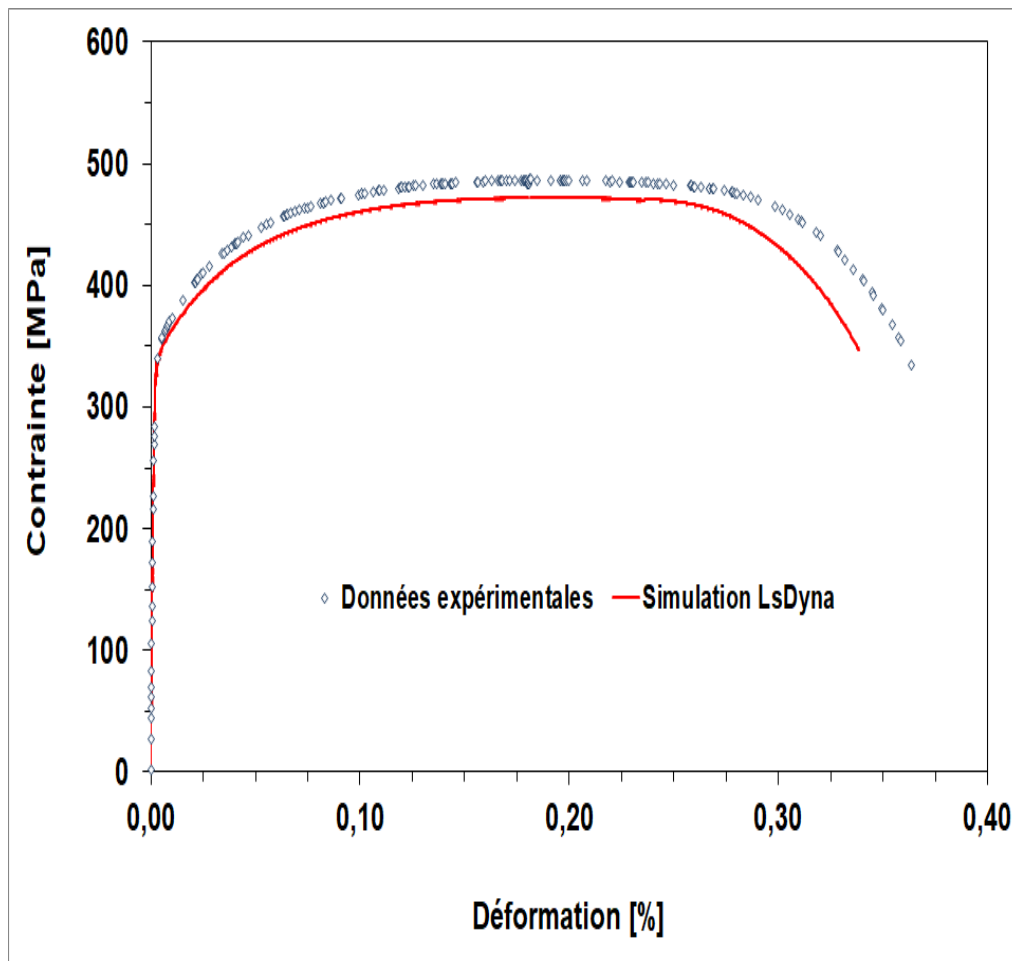
(d)

**Figure III.17.** Isovaleurs de contrainte  $\sigma_{yy}$  : (a) longitudinale, (b) transversale, (c) et (d) à 45° et 135°.

### III.6.3. Validations expérimentales

Nous nous proposons de valider les résultats de la simulation numérique dans les deux cas, présentés précédemment, en les confrontant aux résultats expérimentaux.

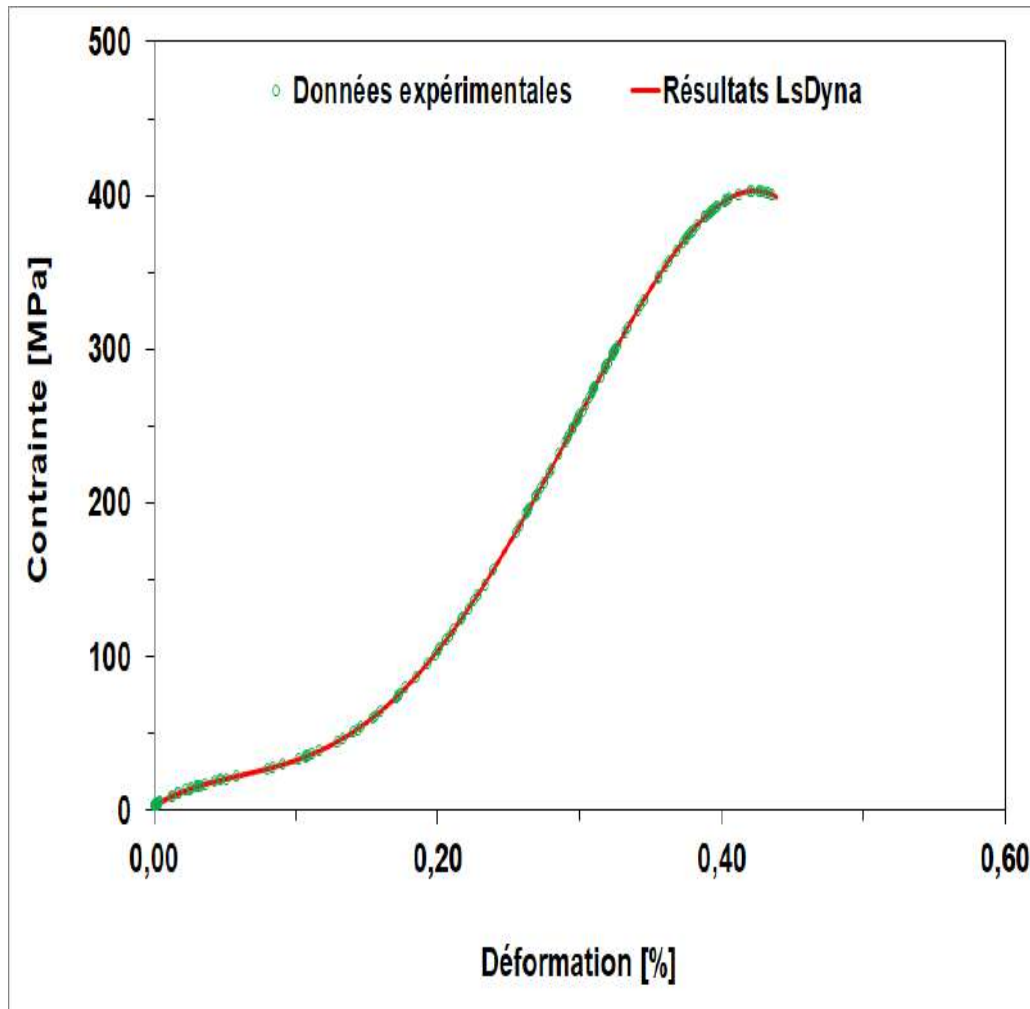
La courbe marquée de points représente les résultats expérimentaux tandis que la courbe continue reproduit les résultats obtenus par simulation (Fig.III.18 et III.19). La simulation des essais de traction montre que la loi de comportement élasto-plastique permet de reproduire correctement la réponse mécanique, obtenue sur des éprouvettes en acier DP (Fig.III.18). Nous pouvons donc admettre que ces résultats sont valides.



**Figure III.18.** Comparaison expérience/simulation pour un essai de traction dans le sens du laminage d'une éprouvette en acier DP.

De même, nous avons simulé le comportement mécanique d'une bandelette rectangulaire d'une ceinture de sécurité caractérisée par un comportement hyper-élastique. Les résultats numériques ont été comparés à nos données expérimentales. La comparaison en termes d'évolution de la contrainte en fonction de la déformation est satisfaisante avec un bon accord avec l'expérience. Cependant, ce constat a permis de confirmer que les effets de bords n'affectent pas la réponse contrainte-

déformation obtenue, et que la loi de comportement implantée est valide, pour nos essais de traction. La méthode de recalage utilisée pour ce matériau n'est donc pas envisageable.



**Figure III.19.** Comparaison expérience/simulation pour un essai de traction dans le sens trame d'une éprouvette issue d'une ceinture de sécurité du constructeur Volkswagen.

Ces différentes simulations ont donc permis de démontrer que les lois de comportement utilisées sont capables de bien simuler diverses sollicitations. Nous pouvons donc l'utiliser avec confiance pour prédire le comportement global d'un essai de crash test.

## II.6. Conclusion

Nous avons détaillé, dans ce chapitre, les différents matériaux retenus dans cette étude et le protocole expérimental utilisé dans les essais de traction en chargement uni-axial. Des éprouvettes en forme d'haltères ainsi que des éprouvettes parallélépipédiques, réalisées par usinage ou par découpage de tissus, ont été testées sur une machine de traction. Les essais mécaniques et les observations microstructurales associées ont permis de déterminer les propriétés mécaniques et d'analyser le comportement des matériaux étudiés. Sur la base de ces essais, des paramètres de lois de comportement de nos modèles ont été mis en place dans un code de calcul de structure LsDyna®. Ils nous ont permis de décrire le comportement hyper-élastique ou élasto-plastique des matériaux métalliques, thermoplastique ou des structures tissées. Enfin, une comparaison des résultats de la simulation et des essais de traction afin de valider l'implantation a été effectuée avec succès.

Ces modèles seront utilisés, essentiellement, pour simuler le déploiement des airbags et le crash test dans le chapitre IV, afin d'aider leur compréhension. Un scénario de collision frontale, avec des passagers ceinturés ou pas couplé au déploiement des airbags sera aussi étudié.

## Références

1. V. Astarita, V. P. Giofré, From traffic conflict simulation to traffic crash simulation: Introducing traffic safety indicators based on the explicit simulation of potential driver errors, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 94, pp. 215-236, 2019
2. D. Bruski, S. Burzyński, J. Chróścielewski, K. Jamroz, K. Wilde, Experimental and numerical analysis of the modified TB32 crash tests of the cable barrier system, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 104, pp. 227-246, 2019
3. M. Budzyński, A. Gobis, K. Jamroz, Ł. Jeliński, K. Ostrowski, Road restraint systems as a basis for roadside safety improvement, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 471, pp. 1-10, 2019
4. M. Jaśkiewicz, D. Frej, B. Šarkan, Construction of the Knee Joint of the Dummy Designed for Crash Tests, *Transportation Research Procedia*, Vol. 44, pp. 121-128, 2020
5. S. Temel, M. C. Vuran, M. M. R. Lunar, Z. Zhao, C. Stolle, Vehicle-to-barrier communication during real-world vehicle crash tests, *Computer Communications*, Vol. 127, pp. 172-186, 2018
6. A. Schiffl, I. Schiffl, M. Hartmann, S. Brötz, W. Kühlein, Analysis of Impact Factors on Crash Performance of High Strength 6082 Alloys Consider Extrudability and Small Modifications of the Profile Geometry, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 10, pp. 193-200, 2018
7. S. Li, X. Guo, Q. Lic, G. Sun, On lateral crashworthiness of aluminum/composite hybrid structures, *Composite Structures*, Vol. 245, pp. 112334, 2020
8. L. Alonso, F. Martínez-Herguet, D. Garcia-Gonzalez, C. Navarro, S. K. García-Castillo, F. Teixeira-Dias, A finite element approach to model high-velocity impact on thin woven GFRP plates, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 142, pp. 103593, 2020
9. J-K. Hwang, Fracture behavior of twinning-induced plasticity steel during wire drawing, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 9, pp. 4527-4537, 2020
10. S. Loffredo, C. Paternoster, N. Giguère, G. Barucca, D. Mantovani, The addition of silver affects the deformation mechanism of a twinning-induced plasticity steel: Potential for thinner degradable stents, *Acta Biomaterialia*, Vol. 98, pp. 103-113, 2019
11. H. Eskandari Sabzi, A. Zarei-Hanzaki, A. Kaijalainen, A. Kisko, The valuation of microstructural evolution in a thermo-mechanically processed transformation-twinning induced plasticity steel during strain hardening, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 754, pp. 799-810, 2019
12. X. Fu, X. Wu, Q. Yu, Dislocation plasticity reigns in a traditional twinning-induced plasticity steel by in situ observation, *Materials Today Nano*, Vol. 3, pp. 48-53, 2018
13. M. S. Pham, B. Dovygytė, P. A. Hooper, Twinning induced plasticity in austenitic stainless steel 316L made by additive manufacturing, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 704, pp. 102-111, 2017

14. H. Eskandari Sabzi, A. Zarei-Hanzaki, H. R. Abedi, A. Mateo, J. J. Roa, The sequential twinning-transformation induced plasticity effects in a thermomechanically processed high Mn austenitic steel, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 725, pp. 242-249, 2018
15. T. Renault. Les matériaux composites dans l'automobile. *Mécanique & Industries*, Vol. 2, pp. 211 – 218, 2001
16. B. A. Newcomb. Processing, structure, and properties of carbon fibers. *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing*, Vol. 91, pp. 262-282, 2016
17. F. Praud, G. Chatzigeorgiou, J. Bikard et F. Meraghni, Phenomenological multi-mechanisms constitutive modelling for thermoplastic polymers, implicit implementation and experimental validation, *Mechanics of Materials*, Vol. 114, pp. 9-29, 2017
18. M. Arif, N. Saintier, F. Meraghni, J. Fitoussi, Y. Chemisky et G. Robert, Multiscale fatigue damage characterization in short glass fiber reinforced polyamide-66, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 61, pp. 55-65, 2014
19. B. Bonnet, Comportement au choc des matériaux composites pour application automobile, Thèse soutenue à l'école des Mines de Paris, 2005
20. J. Pompeigne, L'organisation de la production automobile dans un contexte international : une approche par les fonctions frontières de cout, Thèse soutenue à l'Université de Bourgogne, 2003
21. Fournisseur de Matériaux pour la Recherche et le Développement - Goodfellow
22. J-S. Dupuy, Identification des propriétés mécaniques de matériaux composites par analyse vibratoire, Thèse soutenue à l'Université de Montpellier II, 2008
23. J. Dupuy, S. Corn, P. Ienny et L. Daridon, Comparaison de méthodes dynamiques d'analyse du comportement mécanique de matériaux. 18<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 2007
24. D. Bendjaballah, A. Bouchoucha, M. L. Sahli, J.-C. Gelin, Numerical modelling and experimental analysis of the passenger side airbag deployment in out-of-position, *International Journal of Crashworthiness*, pp. 1-14, 2017
25. D. Bendjaballah, A. Bouchoucha, M. L. Sahli, J.-C. Gelin, Numerical analysis of side airbags deployment in out-of-position situations, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, Vol. 12, pp. 1-12, 2017
26. H. Laribou, Mécanismes d'endommagement et de traitement des surfaces métalliques par un jet d'azote à basse température, Thèse soutenue à l'Université Paul Verlaine-Metz, 2011
27. L. Bourgeon, Etude et modélisation des mécanismes d'endommagement en forge à froid, Thèse soutenue à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008
28. N. Despringre, Analyse et modélisation des mécanismes d'endommagement et de déformation en fatigue multiaxiale de matériaux composites : polyamide renforcé

par des fibres courtes, Thèse soutenue à l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2015

29. R. Decourcelle, Comportement mécanique des vitrages feuilletés sous chargements statiques et dynamiques, Thèse soutenue à l'Université européenne de Bretagne, 2011

30. A. Noura, Influence de l'état de surface des pare-brises sur la visibilité des conducteurs, Thèse soutenue à l'Université Ferhat Abbès, Sétif, 2015

31. J. Barton, C. Guillemet, Le verre Science et technologie, EDP Sciences, France, pp. 440, 2005.



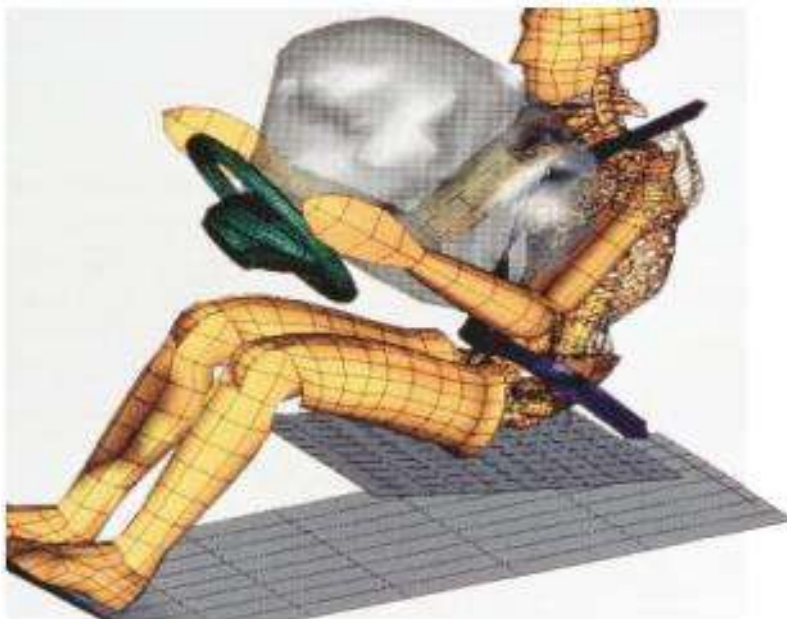
# **Chapitre IV : Simulation numérique du déploiement d'un airbag**

---

## IV.1. Introduction

La sécurité routière est devenue de plus en plus une exigence fondamentale pour les industriels et un argument commercial très marquant pour la vente des véhicules. Cette sécurité repose essentiellement sur des tests de mesure des accélérations et efforts subis par des mannequins instrumentés, dans des conditions de crash très réaliste [1-3]. Ils sont réalisés à grande échelle ; pour tester la fiabilité des éléments de sécurité à l'intérieur d'un véhicule. Ces essais sont aussi devenus très rapidement comme une nouvelle prestation commerciale des constructeurs de véhicules automobiles [4,5]. Ce qui pousse, entre autres, ces industriels à réfléchir et à mettre en place des solutions réalistes ; afin de réduire au maximum les traumatismes et les blessures des passagers d'un véhicule, lors d'une collision.

Une des solutions proposées est l'intégration de plusieurs types de coussins gonflables, mises entre les occupants et le véhicule [6]. Pour que les airbags soient efficaces, ils doivent être complètement déployés dans un très court laps de temps. En effet, le déploiement trop long des airbags peut provoquer des blessures, souvent mortelles à certaines catégories de passagers, s'ils sont en contact direct avec ces airbags. Par conséquent, les airbags doivent avoir obligatoirement un système de contrôle, qui permet de reconnaître et identifier un choc, afin de les déclencher au bon moment, pour que ces airbags se déploient en toute sécurité [7,8].



**Figure IV.1.** Discrétisation numérique pour simuler le déploiement d'un airbag devant un mannequin adulte [9,10].

Dans ce chapitre, nous avons développé un modèle numérique permettant de simuler les différentes étapes de gonflement d'un airbag, pour un déploiement optimisé lors d'un supposé choc frontal. L'objectif final de ce chapitre, est de comprendre le déroulement des différentes étapes d'un déploiement optimal des airbags, en cas de choc routier frontal. Ces informations permettront d'évaluer le comportement mécanique de ces systèmes de sécurité et d'identifier les priorités immédiates, pour améliorer la sécurité des passagers au sein de l'habitacle. La meilleure manière de caractériser le comportement mécanique de l'airbag et sa fiabilité est de simuler deux types d'essais : l'essai de gonflement et de déploiement des airbags ; puis l'essai d'écrasement à l'aide d'un impacteur. Les caractéristiques mécaniques sont celles issues d'une campagne d'essai de traction, présentée dans le chapitre précédent.

## **IV.2. Simulation par éléments finis**

Nous abordons dans cette section les aspects numériques de notre travail, qui porte d'une part, sur l'étude du déploiement des sacs gonflables et d'autre part, sur l'analyse du comportement mécanique des airbags ; durant un essai d'écrasement à l'aide de plusieurs airbags fabriqués par les trois constructeurs.

### **IV.2.1. Contexte théorique**

Un airbag est un moyen de sécurité routière mise en œuvre pour assurer la sécurité des passagers lors d'une collision. Il est constitué d'un sac gonflable en tissu flexible, dans lequel un gaz est très rapidement injecté ; suite à une réaction chimique de type explosive (Fig.IV.2). La contenance volumique des airbags varie entre 35 et 70 litres, pour le cas d'un airbag conducteur, et de 60 à 160 litres pour le cas des airbags passagers. Il se compose principalement d'un sac d'air souple, d'un cache et d'un générateur. En cas de choc à une vitesse minimale de 50 km/h, une combustion de la charge pyrotechnique composée essentiellement d'azoture de sodium ( $\text{NaN}_3$ ) se produit [11,12]. Puis l'azoture de sodium solide se décompose très rapidement pour provoquer la libération, en quelques millisecondes, d'une quantité suffisante de gaz pour remplir rapidement le sac du coussin gonflable. Enfin, l'airbag se dégonfle spontanément après quelques millisecondes.

Dans la littérature, la formation du gaz est généralement supposée parfaite. La combustion passe dans ce cas par trois étapes :

**Réaction 1** :  $2\text{NaN}_3 \rightarrow 2\text{Na} + 3\text{N}_2$  : réaction de génération du gaz ;

**Réaction 2** :  $10\text{Na} + 2\text{KNO}_3 \rightarrow \text{K}_2\text{O} + 5\text{Na}_2\text{O} + \text{N}_2$  : réaction de sécurité ;

**Réaction 3** :  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{K}_2\text{N}_2\text{SiO}_4$  : réaction de combinaison.

Dans le système d'airbag d'une voiture de série, une quantité d'azoture de sodium équivalent à 65 g est mis en jeu pour bien gonfler l'airbag. Lors du déploiement du sac gonflable, un gonfleur injecte directement du gaz à grande vitesse pour assurer d'exercer une pression suffisante sur l'airbag, ce qui provoque automatiquement son expansion instantanée. Le gaz, à l'intérieur du sac gonflable, a été supposé parfait pour satisfaire l'équation d'état suivante :

$$p = (\gamma - 1)\rho e. \quad (1)$$

Le flux de gaz décrit par les lois de conservation de la masse et de l'énergie peut être traduit comme suit :

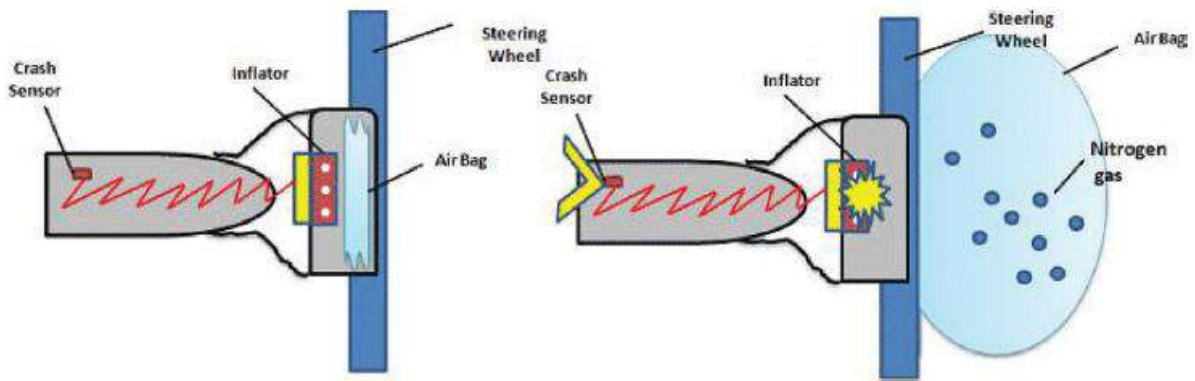
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_A \rho(un)dA = 0 &\Rightarrow \frac{d}{dt} \int_V \rho u_i dV + \int_A \rho u_i(un)dA = - \int_A p n_i dA \\ &\Rightarrow \frac{d}{dt} \int_V \rho e dV + \int_A \rho e(u \cdot n)dA = - \int_A u_i p n_i dA. \end{aligned}$$

L'application de l'équation de Bernoulli dans le cas d'un gaz parfait à entropie constante est donnée par l'équation (2) :

$$\frac{1}{2}u^2 + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p}{\rho} = \frac{1}{2}u_{ex}^2 + \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_{ex}}{\rho_{ex}}. \quad (2)$$

Ici l'indice  $\circ$   $\gamma$  désigne les quantités de gaz injecté,  $u$ ,  $p$  et  $\rho$  désignent les quantités physiques à l'intérieur de l'injecteur qui fournit la masse ( $m$ ) pour gonfler le sac gonflable. Celui-ci peut s'exprimé par :

$$u_{ex}^2 = \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \left( \frac{p}{\rho} - \frac{p_{ex}}{\rho_{ex}} \right). \quad (3)$$



**Figure IV.2.** Principe de fonctionnement pour le déploiement d'un airbag [13].

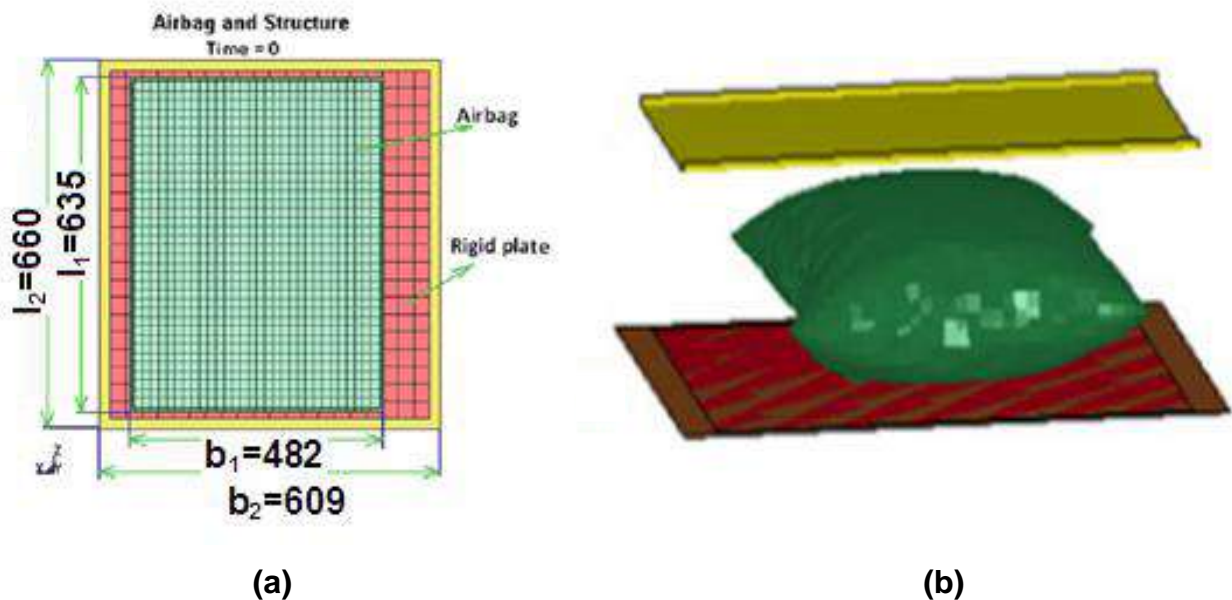
#### **IV.2.2. Description géométrique et hypothèses de simulation**

Un modèle éléments finis a été développé dans un premier temps, pour simuler numériquement les différentes étapes de déploiement des airbags côté conducteur (Fig.IV.3(a)). L'idée était de visualiser l'état de contraintes sur une membrane en tissu d'une structure gonflable ayant une rigidité faible en cisaillement et en flexion. Dans un second temps, le modèle permet de modéliser la compression de ces airbags, par un impacteur rigide indéformable, afin de voir sa capacité à résister au choc frontal et son absorption de l'énergie induit par l'impacteur. Ceci peut ressembler à l'écrasement de la tête du passager ou bien son thorax sur l'airbag, comme indiqué sur la figure.IV.3(b).

La géométrie de l'airbag a été mesurée à partir de plusieurs cas d'airbags. Au final, la géométrie a été simplifiée en un rectangle de côtés égaux à 482 x 635 mm<sup>2</sup>, comme illustré la figure.IV.3(a). Le tableau de bord de la voiture en (HDPE) a été modélisé comme une plaque mince rigide indéformable de forme rectangulaire de 609\* 660 mm<sup>2</sup>. Le maillage de l'airbag est généré dans le logiciel Lsdyna® à l'aide d'un maillageur automatique. Il est composé initialement de 2832 éléments quadrilatéraux et de 5378 nœuds pour l'ensemble du système. Un contact de type contact 37 a été utilisé pour définir le contact entre l'airbag et la plaque rigide de forme rectangulaire. Par ailleurs, un coefficient de frottement de 0,1 est considéré entre l'airbag et la plaque thermoplastique (HDPE). Tous les nœuds du plan rigide, en polymère thermoplastique, sont contraints dans tous les directions. Au niveau des encastremets, tous les nœuds des faces latérales de l'airbag sont bloqués suivant (x-y) sauf, ceux de la surface qui reçoit une pression interne, sont totalement libres.

Un modèle de matériau de type MAT\_34 a été utilisé pour simuler le comportement mécanique du déploiement de l'airbag tandis que le tableau de bord de la voiture a été modélisé en utilisant un matériau de type MAT\_RIGID. On lui a attribué les propriétés classiques et similaires d'un polymère thermoplastique de type polyéthylène à haute densité (HDPE). Les paramètres matériau des tissus ont été déterminés sur la base de nos essais de traction présentés précédemment (tableau IV.1). La porosité du tissu est supposée nulle. Le flux du gaz injecté, supposé uniforme est assuré à l'aide de l'option AIRBAG\_LOAD\_CURVE, les propriétés de l'azote sont présentées dans le tableau IV.2.

Concernant les simulations de l'essai d'écrasement, un impacteur rectangulaire à fond plat de 690x550 mm<sup>2</sup> et d'une épaisseur de 5 mm a été utilisé. Dans nos simulations, l'impacteur est supposé rigide indéformable libre à se déplacer verticalement avec une vitesse initiale de 50 m/s à une certaine hauteur variante de 10 cm à 50 cm ; avec un pas de 5 cm. L'impacteur est maillé avec 675 éléments quadrilatéraux et 1245 nœuds. Le tableau IV.1 résume l'ensemble de propriétés physiques de l'impacteur.



**Figure IV.3.** Géométrie et maillage du modèle 3D : **(a)** airbag libre, de forme initiale rectangulaire, **(b)** test d'écrasement à l'aide d'impacteur plan [14,15].

Propriétés	Composant				
	Airbag			Plaque	Impacteur
	R0°/90°	P0°/90°	VW 0°/90°	- HDPE	- Aluminium
Densité [g/cm <sup>3</sup> ]	1.39	1.41	1.38	0.95	2.69
Module de Young [GPa]	2.51/2.53	2.43/2.46	2.48/2.52	1.1	73
Coefficient de poisson	0.349/0.342	0.341/0.346	0.345/0.346	0.460	0.300
Résistance à la traction [MPa]	155/154	285/292	210/213	15-40	365
Résistance au cisaillement [MPa]	-	-	-	-	331
Conductivité thermique [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	0.52	0.51	0.51	0.52	130
Coeff. d'expansion thermique [x10 <sup>-6</sup> .K <sup>-1</sup> ]	48	55	39	145	24

**Tableau IV.1.** Tableau récapitulatif des propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés (R: Renault, P: Peugeot, VW: Volkswagen) [14,15].

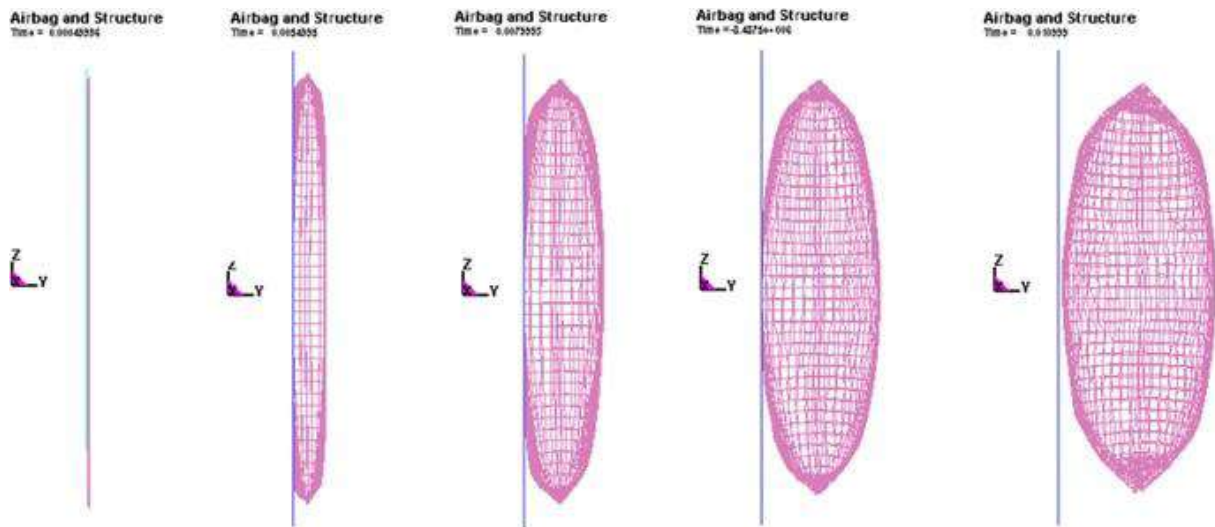
Pression [MPa]	0.005-0.01-0.1
Température [°C]	75
Constante de gaz [kg/kmol.K]	8.314
Poids moléculaire [g/mol]	28.02
Volume initiale [litres]	35-160

**Tableau IV.2.** Valeurs initiales utilisés dans le modèle EF [14,15].

### IV.3. Résultats de la simulation et discussions

#### IV.3.1. Déploiement d'airbag

La Figure IV.4 montre les premiers résultats de la simulation numérique du test de déploiement d'un airbag à différents instants. Il est essentiel de rappeler que la pression a été appliquée sur une structure gonflable ayant une rigidité très faible. L'airbag conducteur est entièrement gonflé, pour seulement 11 ms. L'augmentation progressive du volume s'effectue principalement grâce au flux de gaz injecté à l'intérieur de la structure. Par ailleurs, nous pouvons observer clairement que la faible rigidité en cisaillement et en flexion fait apparaître quelques plissements sur les côtés de l'airbag. Cette faible rigidité en flexion suffit certes, à localiser les zones de plissement mais, ne suffit pas à décrire correctement la forme des plis [16,17]. Néanmoins, ce modèle reproduit fidèlement la réponse mécanique globale du déploiement du sac gonflable sous pression interne.



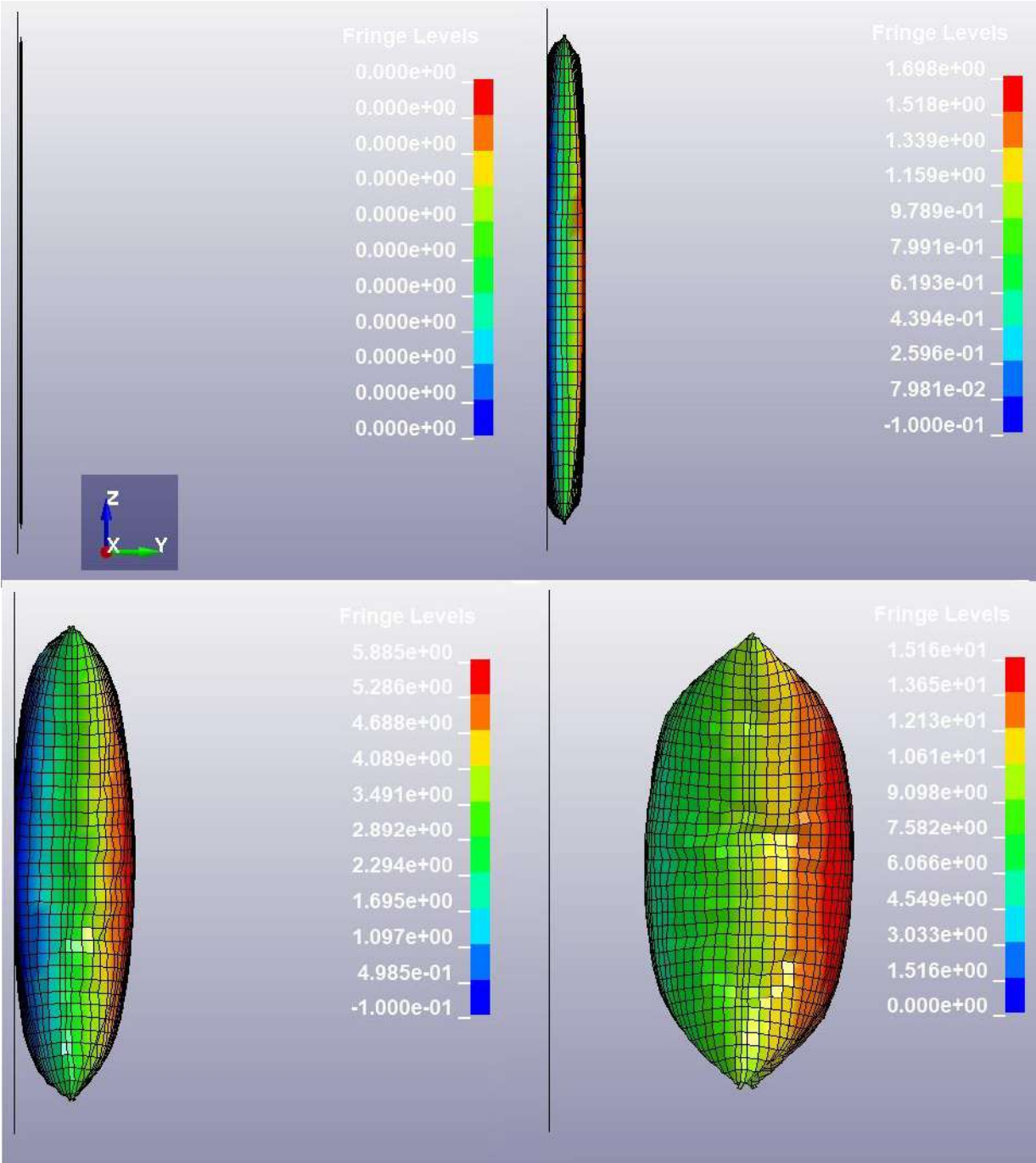
**Figure IV.4.** Différentes étapes du déploiement d'un airbag conducteur type VW soumis à une pression interne avec une rigidité en cisaillement et en flexion faibles.

La figure IV.5 montre les isovalues de déplacements suivant y-y, durant la phase déploiement de l'airbag. Initialement, les deux faces de l'airbag sont en contact. Puis, elles s'éloignent progressivement avec le remplissage du sac gonflable, avec un déplacement maximum, localisé au milieu de l'airbag. Par ailleurs, de faibles valeurs ont été enregistrées près des coins de la structure gonflable, ce qui colle bien à la réalité. Nous observons aussi la formation de plissements des tissus d'airbags, à un moment donné due aux faibles valeurs de rigidité en cisaillement qui disparaissent partiellement, à la fin de l'étape de déploiement. Ce qui est par ailleurs intéressant à observer, c'est que le fait de négliger la rigidité en flexion, suffit certes, à localiser les zones de plissement ; mais ne suffit pas à décrire correctement la forme des plis. Les résultats finaux des contours de déplacement se caractérisent par un déplacement symétrique.

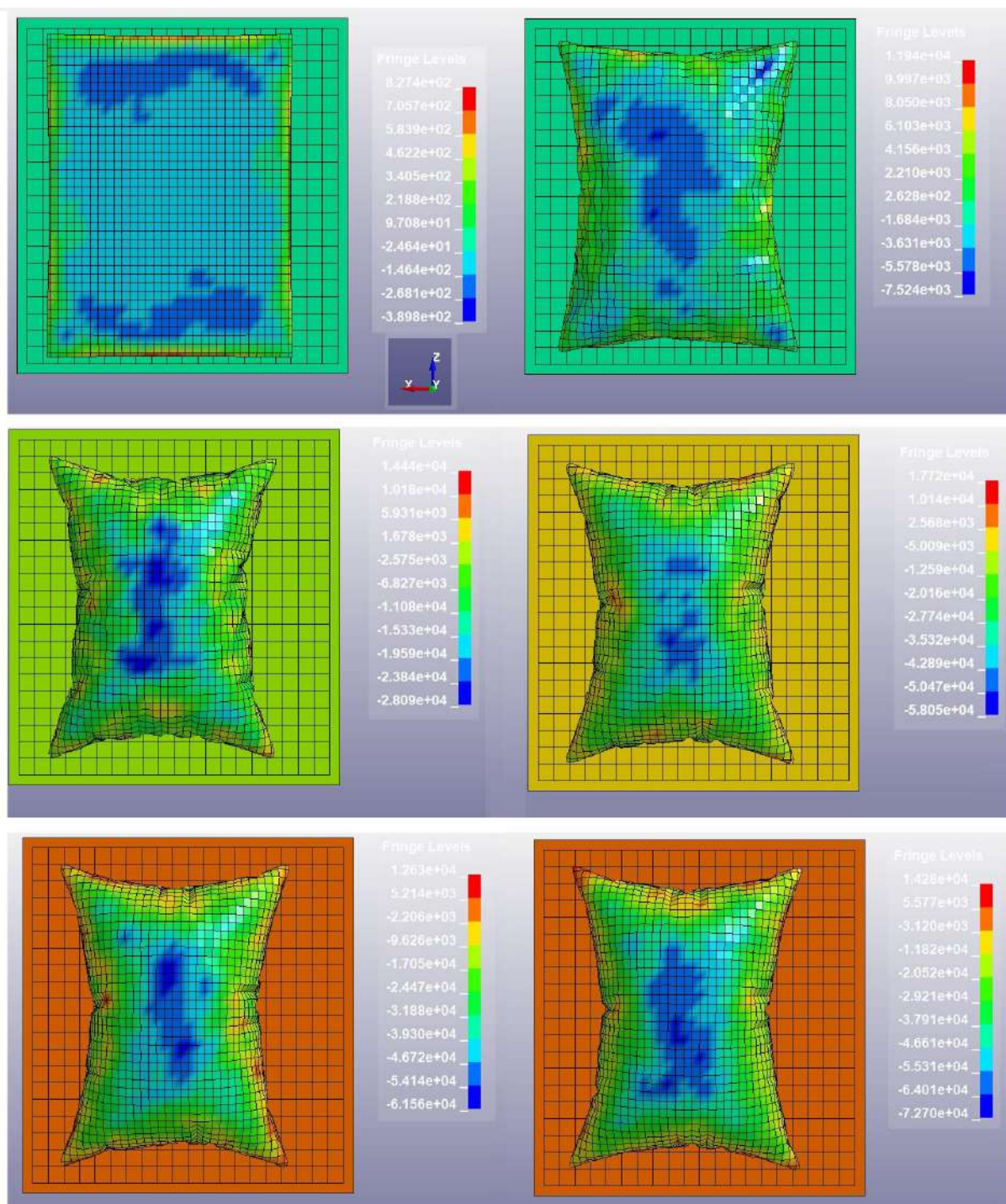
Les contours de pression, interne sont présentés sur la figure IV.6. En effet cette figure montre qu'à la fin du cycle de déploiement de l'airbag, une répartition non-uniforme de la pression, à l'intérieur de l'airbag est observée. Ceci est dû essentiellement, à la forme du sac gonflable. Par ailleurs, l'apparition des plis peuvent être clairement observés sur le coussin ; dès le début du gonflement, lié essentiellement à la rigidité du tissu utilisé dans la fabrication de ces airbags.



Cependant, il est intéressant de vérifier l'indépendance de nos résultats vis-à-vis du maillage [18]. Ainsi, trois tailles de maillage ont été testées. Il a été aussi constaté que la géométrie finale de l'airbag reste inchangée, En revanche, les champs de déplacement ainsi et des contraintes de Von-Mises demeurent très voisins.



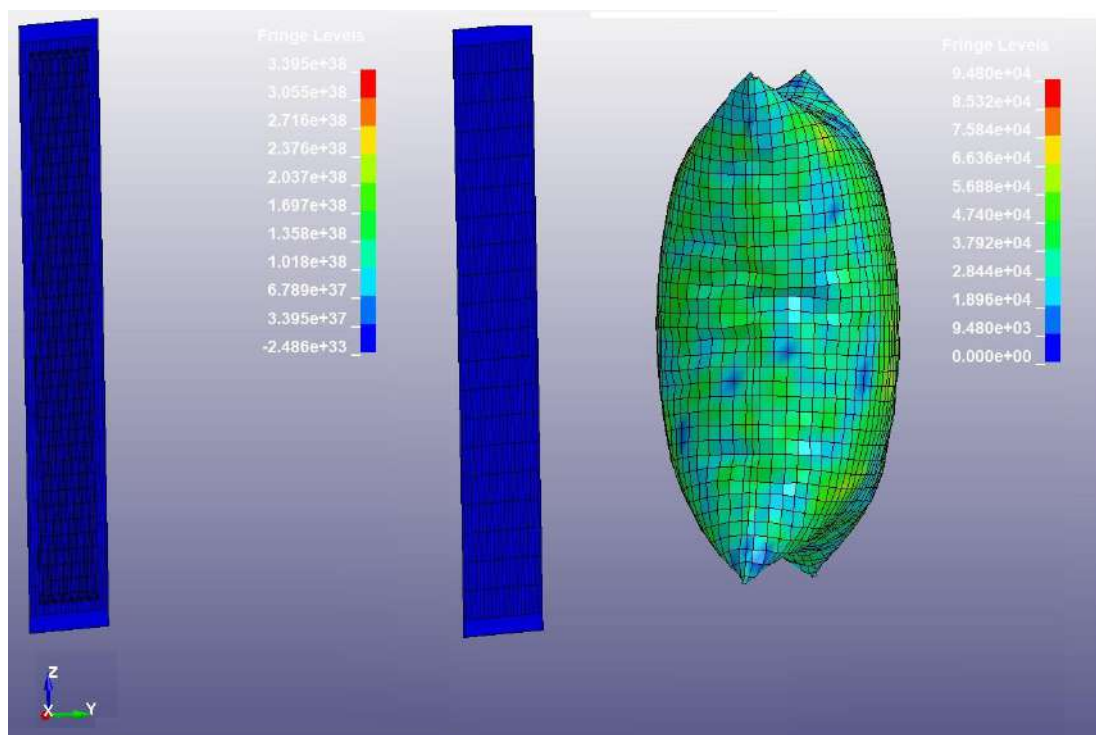
**Figure IV.5.** Isovaleurs de déplacement suivant y-y dans l'airbag conducteur de type VW, durant la phase de déploiement.



**Figure IV.6.** Isovaleurs de pression dans un airbag conducteur de type VW, durant le déploiement.

Par ailleurs, la contrainte de Von-Mises est relativement homogène dans le sac gonflable, par contre, les composantes de contrainte de traction sont beaucoup plus importantes, par rapport à la composante de contrainte de cisaillement. Néanmoins, selon la réponse globale obtenue, les déformations hyper-élastiques localisées

atteignent des valeurs bien inférieures à la déformation totale ; c-à-d la rupture mesurable dans nos essais de traction [14,15]. Le modèle développé, dans nos travaux, se révèle être toujours valide à ces niveaux de déformation élevés. En plus, plusieurs pressions ont été testées (tab.IV.2) et il s'avère qu'une pression de fonctionnement interne très élevée, entraînera un gonflement hyper-élastique maximal ; ce qui risque de faire rebondir l'occupant sur l'airbag, avec un risque très important de blessure du conducteur. Par contre, une faible pression rendra, malheureusement, l'airbag inefficace pour retenir le corps du passager et éviter de s'écraser sur le tableau de bord ou sur le pare-brise durant une collision.



**Figure IV.7.** Isovaleurs de contraintes de Von-Mises, durant le déploiement de l'airbag VW.

Sans re-détailler toutes les conditions utilisées dans nos modèles de calculs, déjà développés dans nos simulations numériques ; dans ce chapitre, nous présentons (fig.IV.8) les résultats numériques calculés pour trois épaisseurs différentes de tissus d'airbag. Les contours de déformation calculés sont représentés sur la (fig.IV.8). Comme le montre cette figure, pour un taux de remplissage identique équivalent à 85%, le déploiement des airbags est sensiblement affecté par l'épaisseur des tissus utilisés dans la fabrication des airbags. De plus, le développement des plis est de plus en plus visible pour des faibles épaisseurs c-à-d pour une faible rigidité.

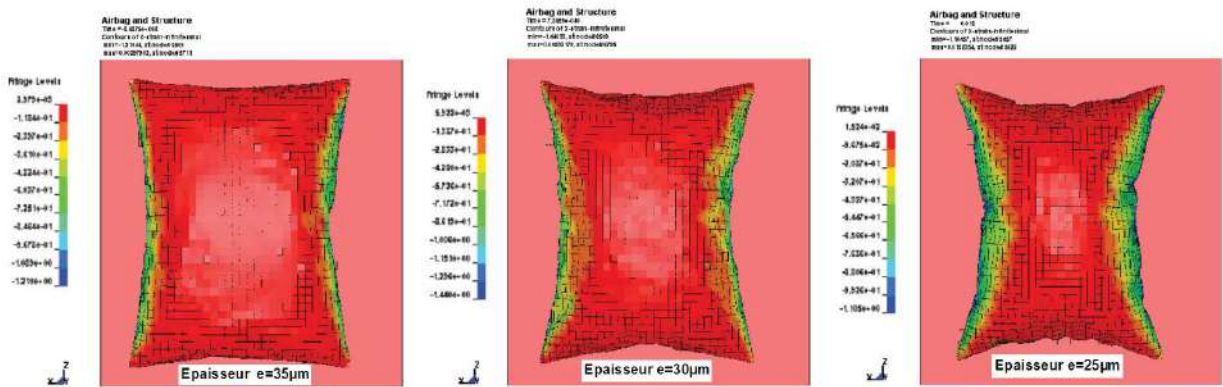


Figure IV.8. Isovaleurs de déformation globale durant le déploiement de l'airbag de type Peugeot.

L'évolution de la pression résultante dans trois nœuds (6396, 6856 et 6256) en fonction du temps de déploiement de l'airbag est retracée sur la (fig.IV.9). Il faut préciser que les fluctuations des courbes sont dues, entre autres, à l'évolution des formes des plis dans l'airbag. Comme attendu, pendant la phase de remplissage de l'airbag, les valeurs de pression maximale sont bien enregistrées, au milieu de la structure (nœud 656). De plus, nous avons également constaté qu'à la fin du déploiement les différences de pression, entre l'ensemble des nœuds de la structure est d'environ de ~12%. Cette différence est significativement sensible à la forme géométrique de l'airbag [19,20].

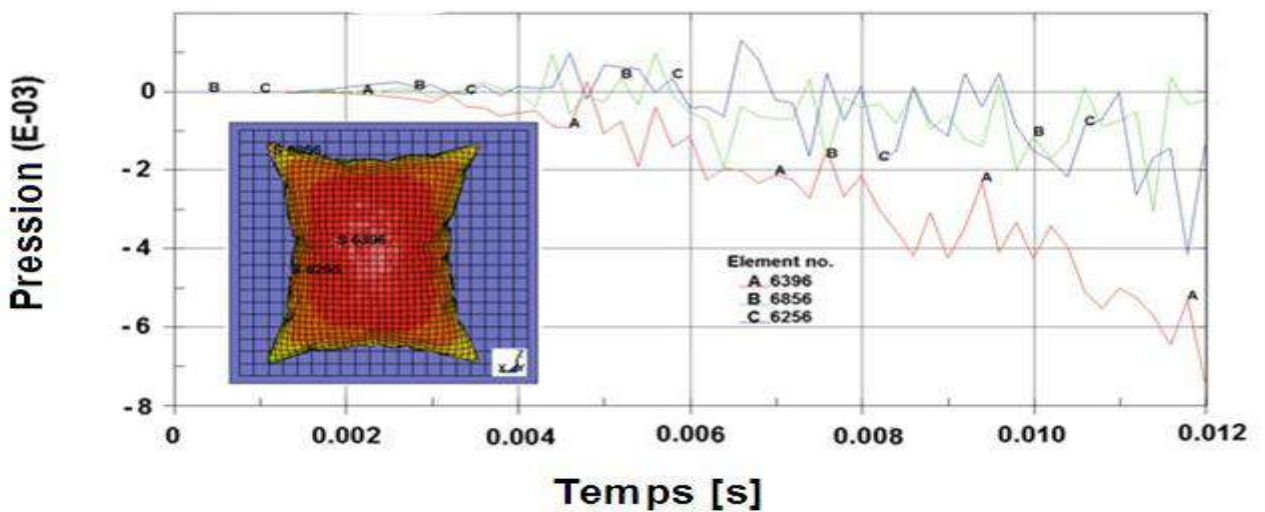
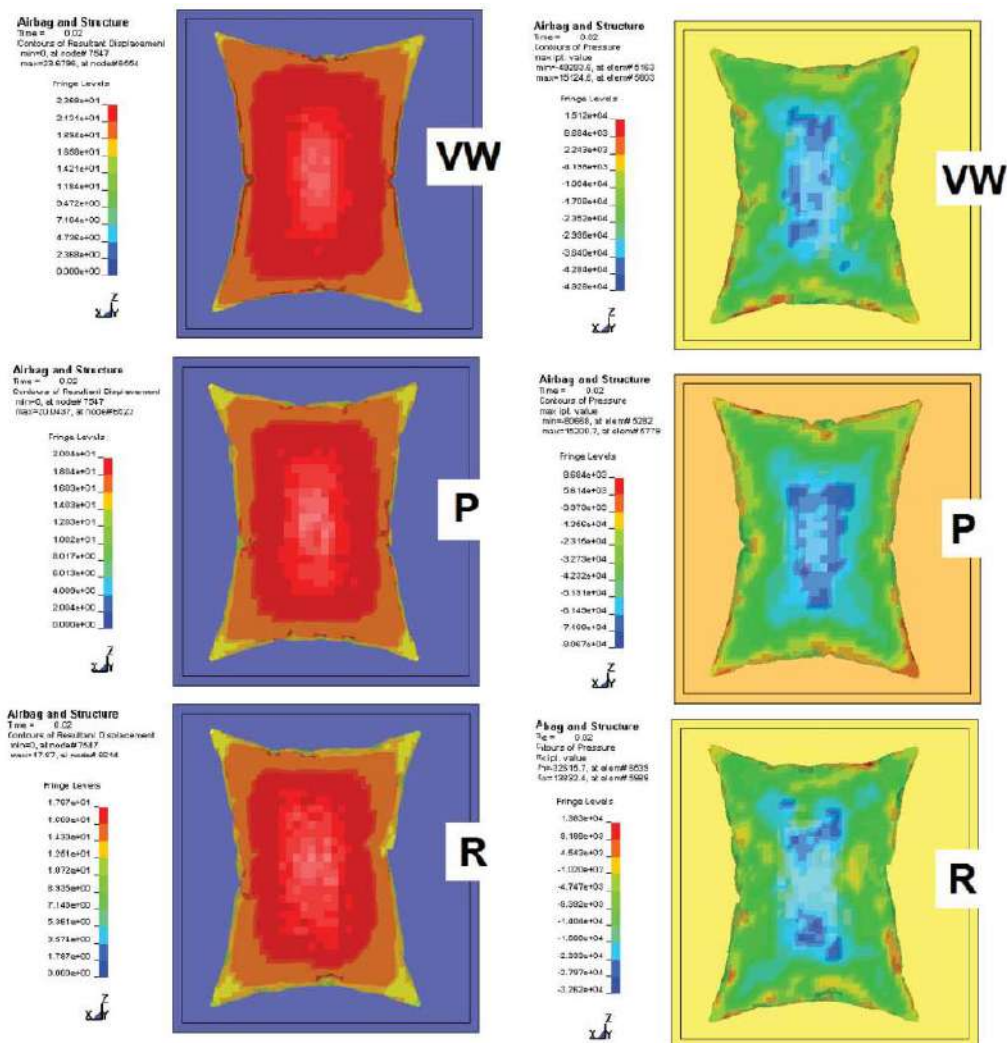


Figure IV.9. Evolution de la pression en fonction du temps du déploiement de l'airbag.

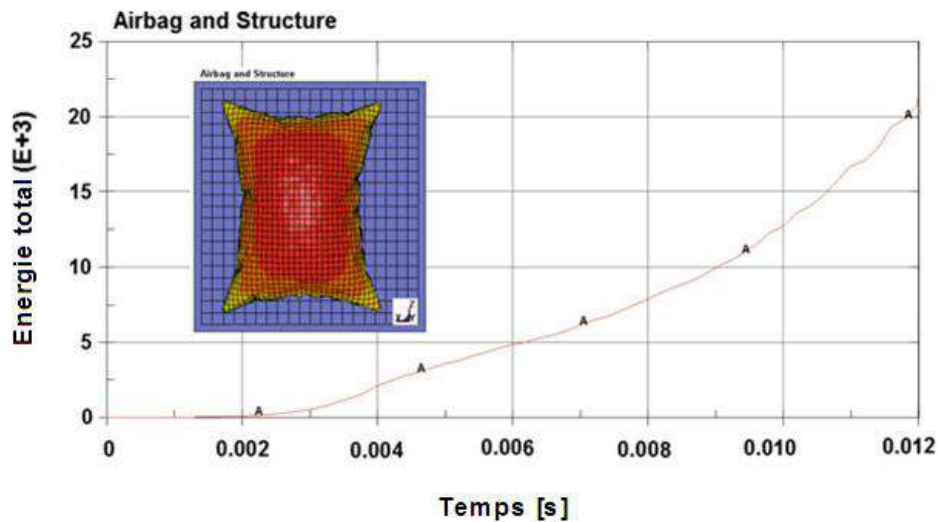
Le modèle nous a permis, non seulement d'observer l'évolution du déploiement de l'airbag, mais aussi de calculer la répartition, entre autres, de la pression interne, de l'évolution des contraintes, des déformations, du déplacement et d'estimer le temps final pour un déploiement optimisé, (Fig.IV.9).

Les résultats finaux des contours de déplacement et de la pression interne à la fin du déploiement, des différents sacs de gonflement des trois fabricants (R, P et VW) ont été présentés sur la (fig.IV.10). Nous pouvons observer clairement que dans les mêmes conditions, la répartition de la pression est très différente d'un cas à l'autre. En particulier, nous pouvons voir comment la configuration (R) se déploie de manière beaucoup moins importante que, les configurations (P) et (VW). Ceci se traduit par des propriétés mécaniques différentes [14,15].



**Figure IV.10.** Contours de déplacement et isovaleurs de pression durant le déploiement d'airbag de trois fabricants différents.

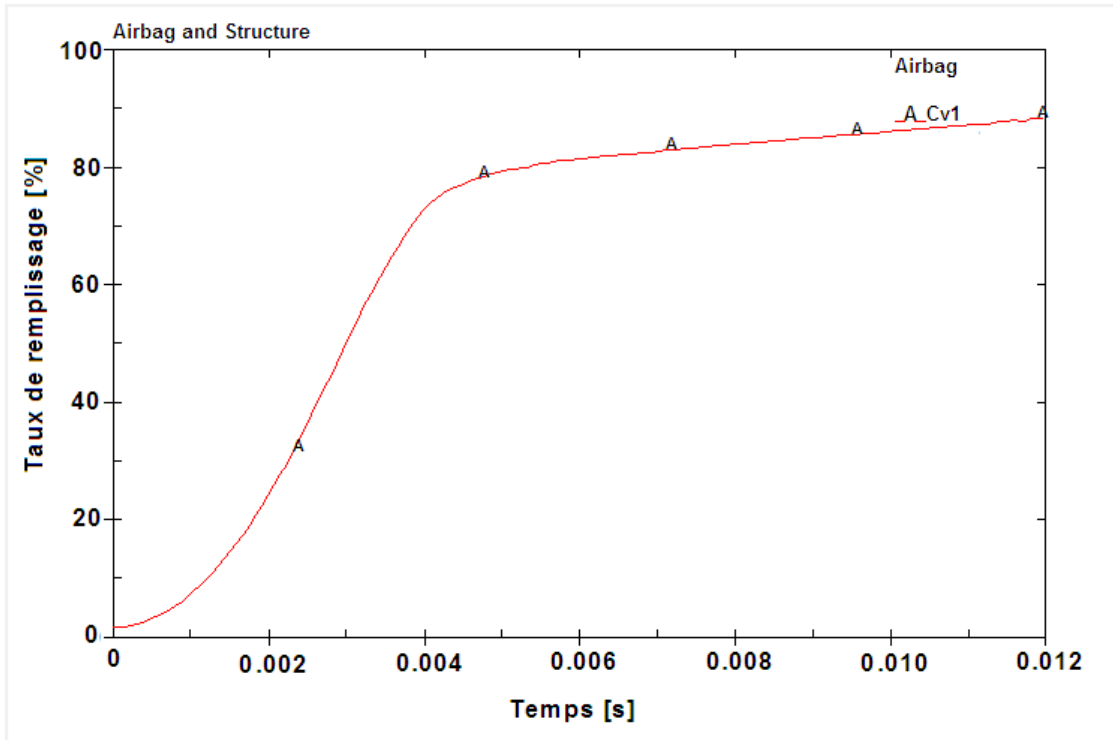
La (fig.IV.11) montre l'énergie totale, durant la phase de déploiement d'un airbag. Elle augmente considérablement avec le temps. La valeur finale est sensiblement liée aux dimensions géométriques de l'airbag, de sa forme, des caractéristiques mécaniques des tissus employés. Le taux de remplissage des sacs gonflables et de l'hyper-élasticité des tissus qui donnent aux airbags la capacité à absorber l'impact, suite à un choc frontal, lors d'un accident de véhicule [21,22].



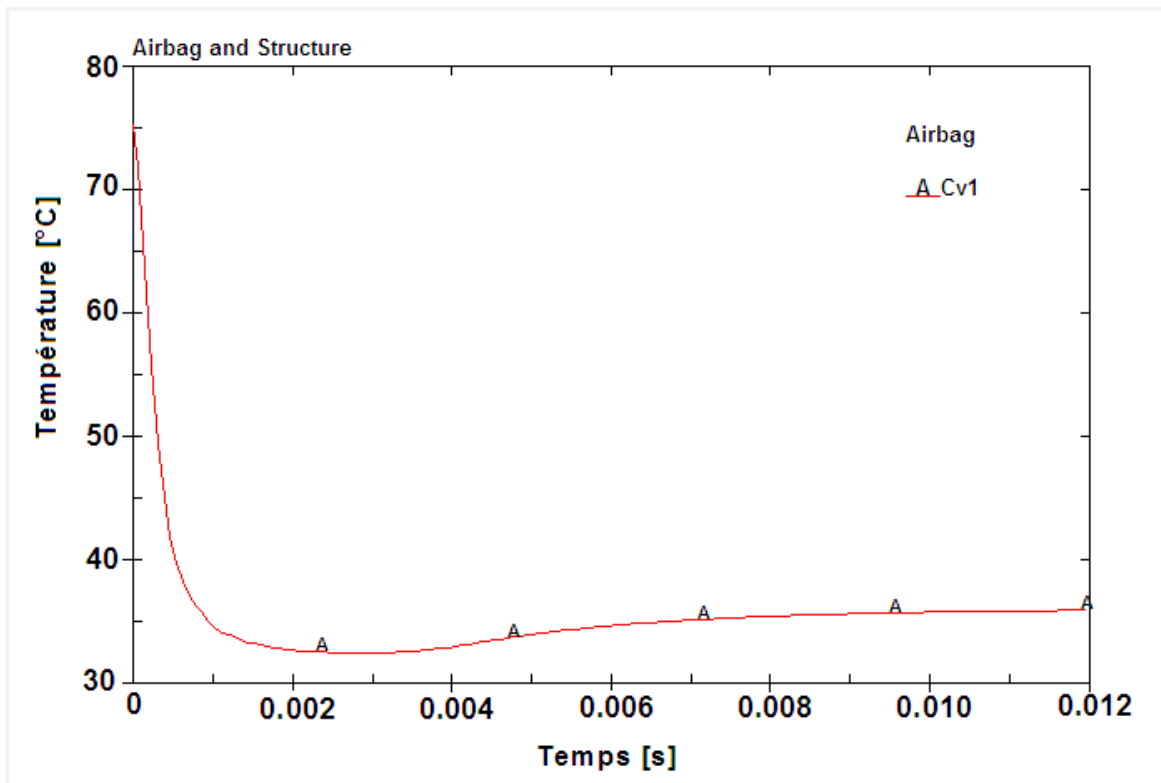
**Figure IV.11.** Evolution de l'énergie totale dans la structure gonflable en fonction du temps du déploiement de l'airbag.

L'analyse numérique permet aussi de représenter l'évolution du volume total (Cv1) d'un airbag conducteur de type (R), (Fig.IV.12). Le taux de remplissage ne cesse d'augmenter de façon rapide durant les quatre premières millisecondes, soit 72% du volume total. Puis, un deuxième palier est observé avec une vitesse de remplissage plus faible [23,24].

Les résultats obtenus de la (fig.IV.13) permet de voir l'évolution de la température des tissus du sac gonflable, suite à l'injection de gaz chaud supposé égale à 75°C pour gonfler l'airbag. La température diminue à 33°C puis se stabilise autour de 37°C. Ce résultat, Il à prendre avec précaution, car il est' ait difficile de le valider expérimentalement. A ma connaissance, aucune étude n'a été entreprise pour évaluer l'évolution de la température, durant le déploiement des airbags.



**Figure IV.12.** Evolution du volume de remplissage à l'intérieur d'un airbag, durant son cycle classique de déploiement.



**Figure IV.13.** Evolution de la température des tissus d'airbag, durant la phase de déploiement.

### IV.3.2. Ecrasement de l'airbag

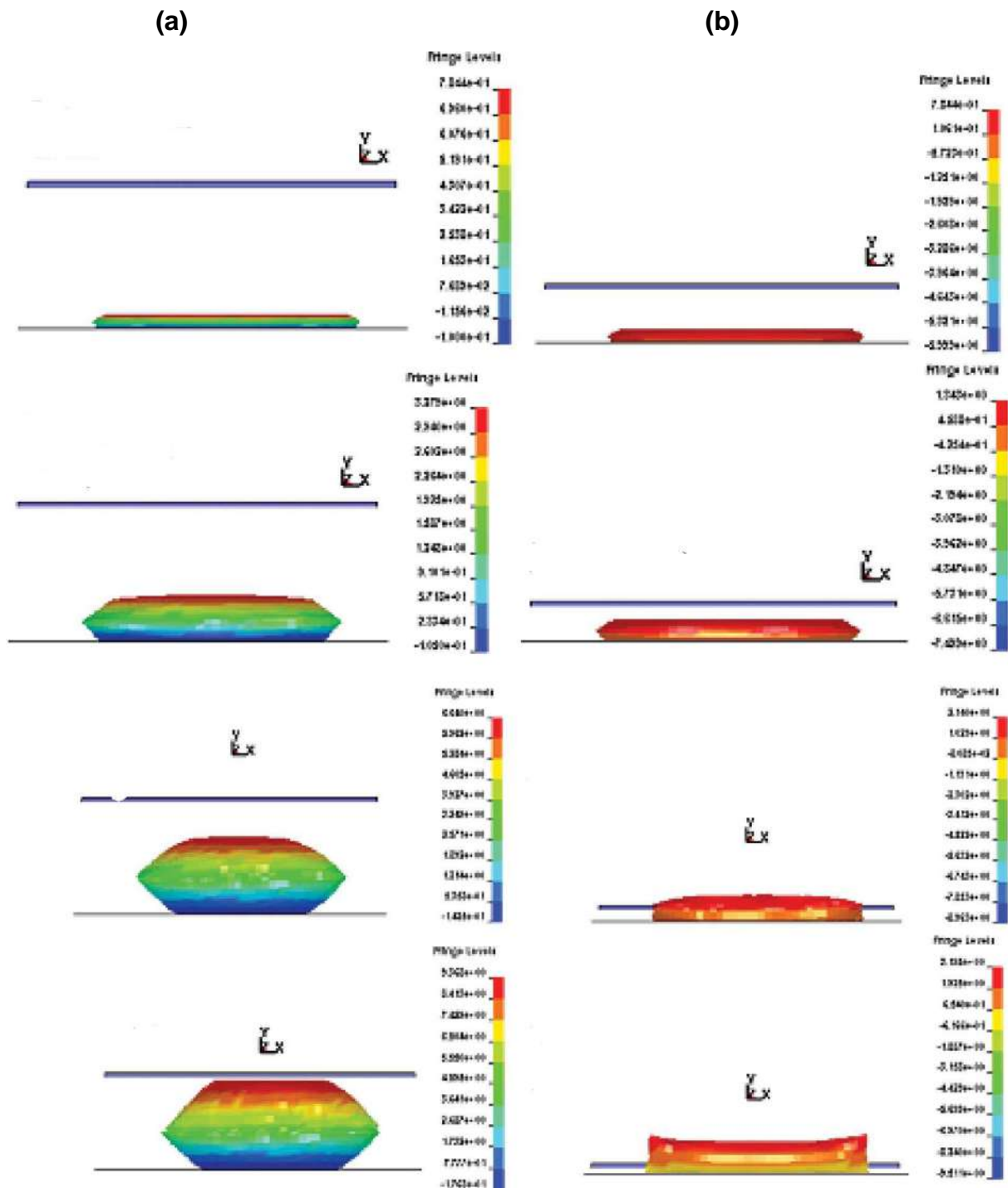
Pour étudier le comportement mécanique des airbags à l'écrasement, des simulations numériques ont été développées d'une part, pour déterminer la distance de sécurité ; entre l'impacteur et le coussin gonflable avant déploiement de l'airbag c-à-d de déterminer la distance de sécurité minimale qui doit séparer un passager de son coussin gonflable, pour assurer sa sécurité optimale [25]. Et d'autre part, de déterminer la capacité de ces airbags à absorber un choc frontal, à une vitesse de 50 m/s. En examinant les résultats numériques obtenus, pour une distance airbag/impacteur variant de 10 cm à 50 cm, le coussin gonflable est malheureusement moins fonctionnel, pour assurer la protection des passagers, à partir d'une distance inférieure à 35 cm. En effet, pour une distance de 10cm airbag n'aura pas le temps de se déployer correctement, sachons qu'il faut assurer un taux de remplissage minimal compris entre 70 à 80%, pour garantir la sécurité du conducteur [26,27]. A titre indicatif, la figure IV.14 montre les premières simulations de l'essai d'écrasement des airbags ; pour deux distances critiques soient 10 et 40 cm. Nous pouvons conclure que la distance de 10 cm, qui sépare le passager et l'airbag, n'est pas suffisante pour bien protéger le passager. Cela peut rendre malheureusement le coussin gonflable inefficace comme le montre la figure IV.14(a).

A une distance proche de 40 cm ; l'airbag a presque bien fini une grande partie de la course de son déploiement, soit 80% de sa course, avant d'entrer en contact avec l'impacteur (voir Fig.IV.14b). L'airbag a bien résisté au choc de l'impacteur à 50 m/s. Ces résultats sont prendre avec précaution, car la configuration traitée, dans nos travaux, est un cas parmi d'autres. Elle est peu différente de la réalité, où souvent l'impact sur l'airbag et la distance du passager dépend dans la plupart des cas de la position du passager ceinturé ou non, de sa taille, de son corporation et du réglage de la position des sièges de la voiture [29-32].

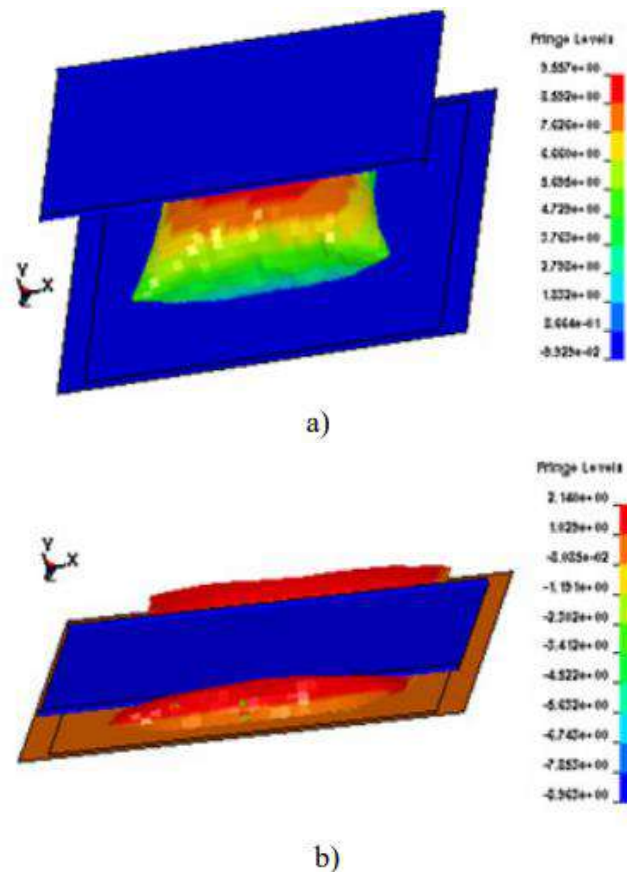
La figure 15 montre une vue 3D de l'écrasement de l'airbag par un impacteur à 50 m/s. Dans le premier cas, l'airbag n'absorbe que 13% de l'énergie cinétique de l'impacteur, qui heurte à grande vitesse l'airbag puis, la plaque thermoplastique. Tandis que dans le deuxième cas, il a absorbé la totalité de l'énergie cinétique de l'impacteur, sans heurter le tableau du bord modélisé ici par la plaque thermoplastique. Les résultats numériques concordent bien avec la réalité



néanmoins, la confrontation expérimentale est très importante ; car elle peut mieux montrer le degré de pertinence du modèle développé [33].



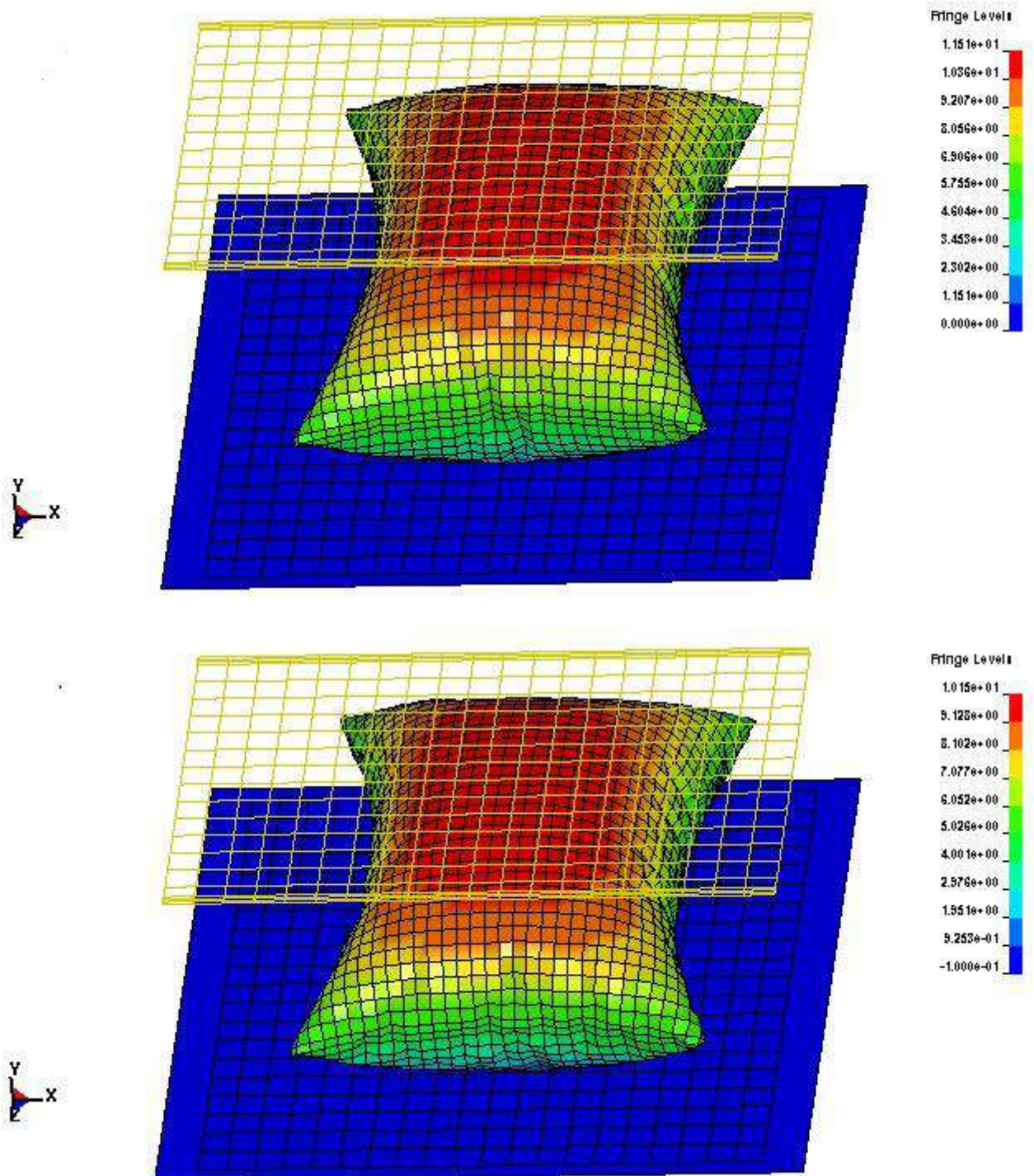
**Figure IV.14.** Isovaleurs de déplacement pour un test d'écrasement d'un airbag conducteur écrasé à une vitesse de 50 m/s par un impacteur à une distance de : **(a)** 10 cm et **(b)** 40 cm.



**Figure IV.15.** Simulation numérique du test d'écrasement de l'airbag : **(a)** airbag complètement déployé, **(b)** airbag partiellement déployé

Concernant l'impact de la position atypique de l'impacteur ; et de sa forme sur la réponse des structures gonflables de l'essai d'écrasement d'un airbag lui-même, les résultats relatés dans la littérature sont très variables en fonction de plusieurs paramètres [34-37]. Ceci convient bien avec certaines études expérimentales qui précisent bien qu'un impact sur le thorax, le menton ou le front n'aura pas du tout le même effet [38-42]. Cette remarque est d'ailleurs aussi valable pour la main et l'avant-bras. Dans cette étude, nous avons privilégié, plutôt de se focaliser à étudier le cas le plus fréquent à savoir l'impact au niveau de la zone centrale de l'airbag, qui concerne soit le contact airbag/thorax ou bien le contact front de la tête/airbag. A vitesse de déplacement imposée de 50 m/s, la contrainte maximale supportée par les tissus des airbags utilisés, dans cette étude, lors d'un essai d'écrasement est bien inférieure à celle obtenue en essai de traction (voir chapitre précédent). La déformation imposée ne provoque, ni l'éclatement de l'airbag, ni la rupture des

tissus. Avant que l'impacteur commence à heurter l'airbag, ce dernier se remplit de gaz à ~85% de son volume, pour une distance airbag/impacteur de 45 cm. Puis, l'airbag commence à ralentir la pénétration de l'impacteur, au même temps qu'il se dégonfle progressivement (Fig.IV.16).



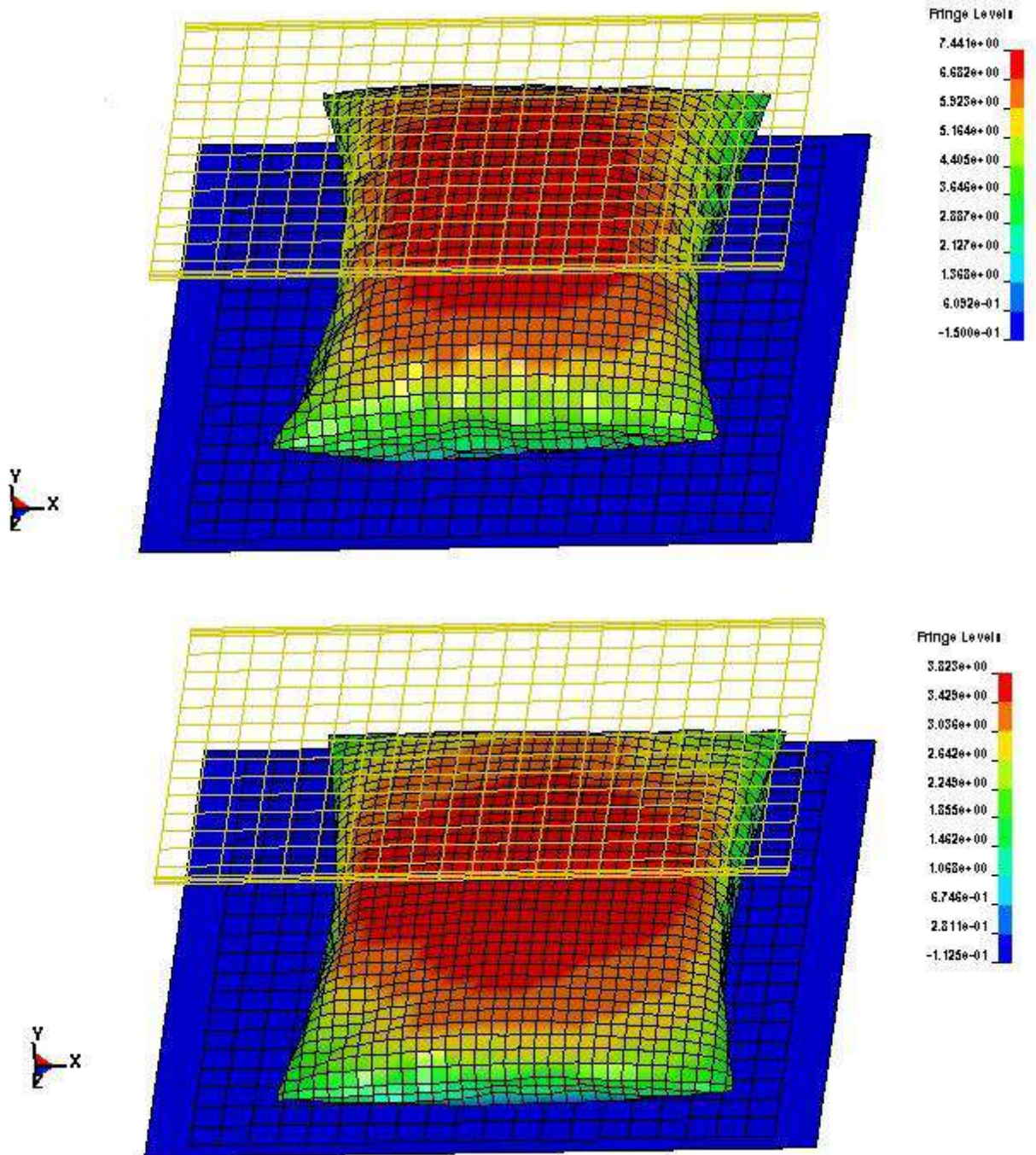


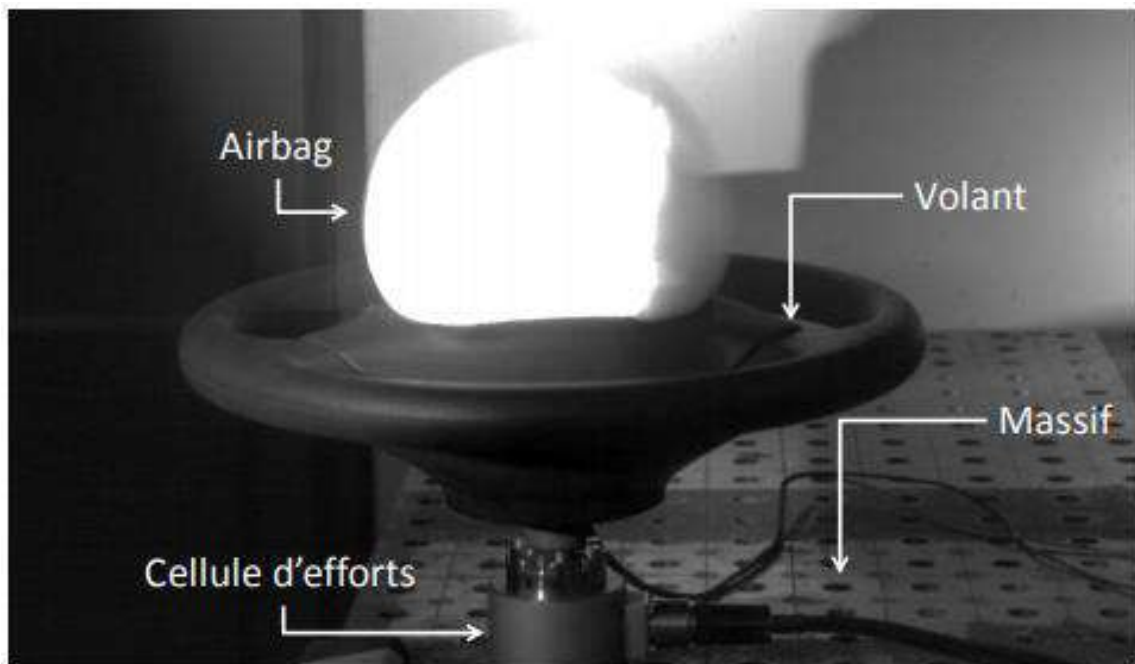
Figure IV.16. Simulation de l'airbag heurté par un impacteur à 50 m/s pour une distance de 45 cm.

#### IV.4. Validation expérimentale

##### IV.4.1. Déploiement libre d'un airbag conducteur

La validation du modèle numérique passe nécessairement par la confrontation avec l'expérience. Et vu la difficulté de mettre en place ce type d'expérience dans notre laboratoire de mécanique, nous avons fait le choix de faire appel à des essais expérimentaux effectués par F. Robache (2017) et Lee et al. (2009) pour tenter de

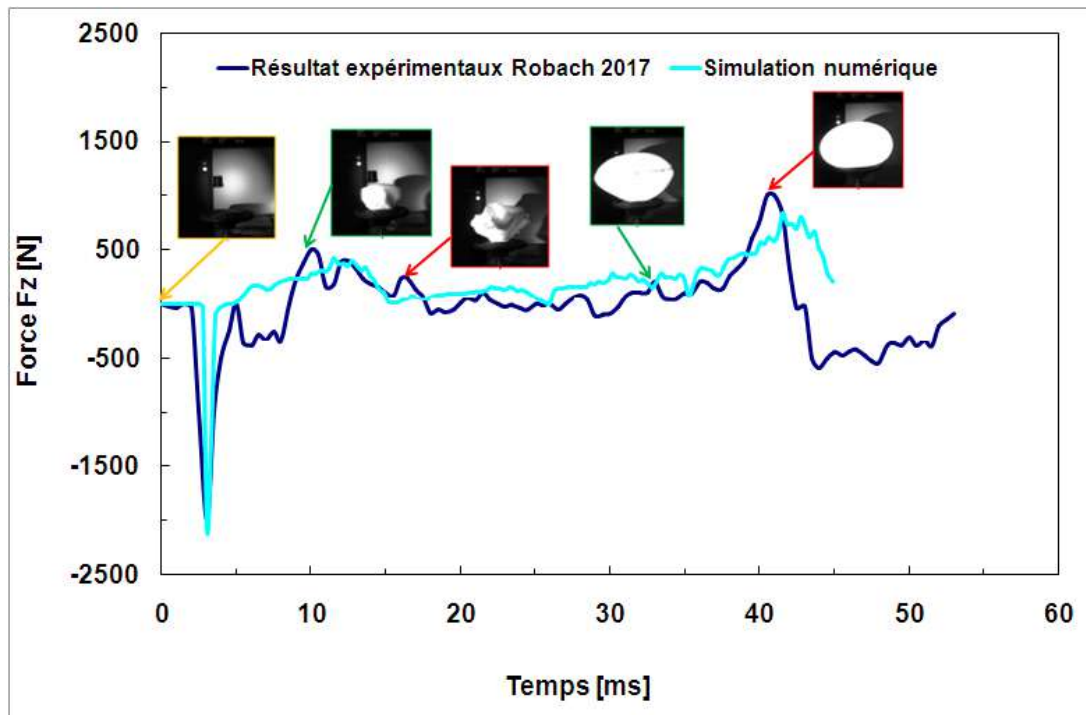
valider nos simulations numériques [43,44]. Dans les essais de déploiement libre, le module d'airbag conducteur, de grande série équipant un monospace compact de 45 litres, a été installé sur une cellule d'effort à 3 axes de mesure, (Fig.IV.17). La scène a été filmée avec une fréquence de 1000 images par seconde, à l'aide d'une caméra rapide adaptée à ce type d'essai [43].



**Figure IV.17.** Dispositif expérimental testé par effectués par F. Robache (2017 [43]).

L'analyse des efforts est nécessaire pour bien appréhender, à la fois, les différentes phases de déploiement de l'airbag et la pertinence du modèle numérique développé. La (fig.IV.18) représente un graphe de comparaison entre un profil d'effort, calculé numériquement à l'aide du modèle développé, dans cette étude, et celui mesuré expérimentalement par F. Robache (2017). La réponse obtenue, avec notre modèle EF suit bien le profil d'effort expérimental obtenu par F. Robache (2017), ce qui est globalement acceptable. Les pics d'effort calculés numériquement estimés à environ ~4 à 13% en-dessous de la moyenne expérimentale avec une bonne adéquation, entre les valeurs simulées moyennes et les résultats expérimentaux [43]. Par ailleurs, nous remarquons que la convergence de nos résultats est obtenue grâce, entre autres, à un ajustement de nos paramètres matériaux ( $E_0 = 3.1 \text{ GPa}$ ,  $E_{90} = 3.8 \text{ GPa}$ ) et géométriques ( $l_1 \times b_1 \times e = 690 \times 650 \times 0.35 \text{ mm}^3$ ). Ces données théoriques ont été obtenues, après plusieurs itérations.

Notre modèle EF a pu reproduire globalement la réponse finale escomptée, des différentes étapes de remplissage du sac gonflable, durant le déploiement libre de l'airbag.



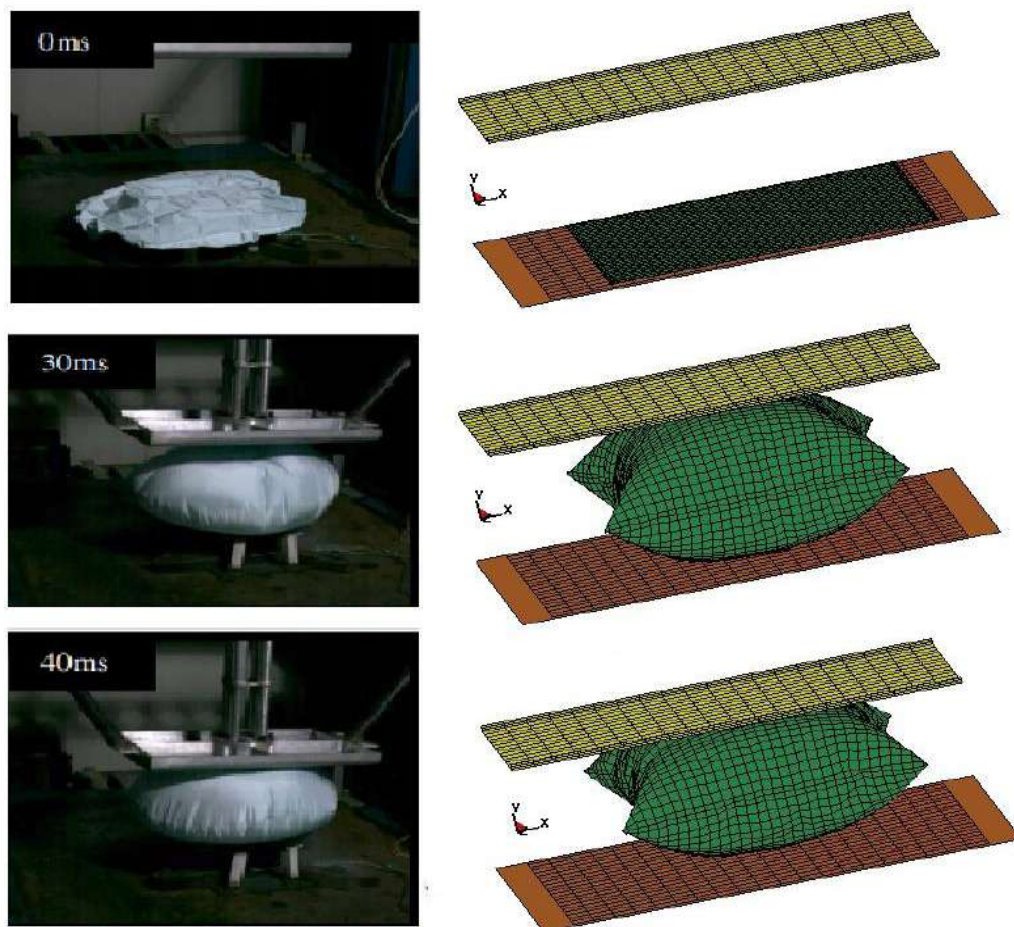
**Figure IV.18.** Evolution expérimentale, des efforts  $F_z$ , lors du déploiement d'airbags avec comparaison des résultats numériques.

#### IV.4.2. Ecrasement libre d'un airbag conducteur

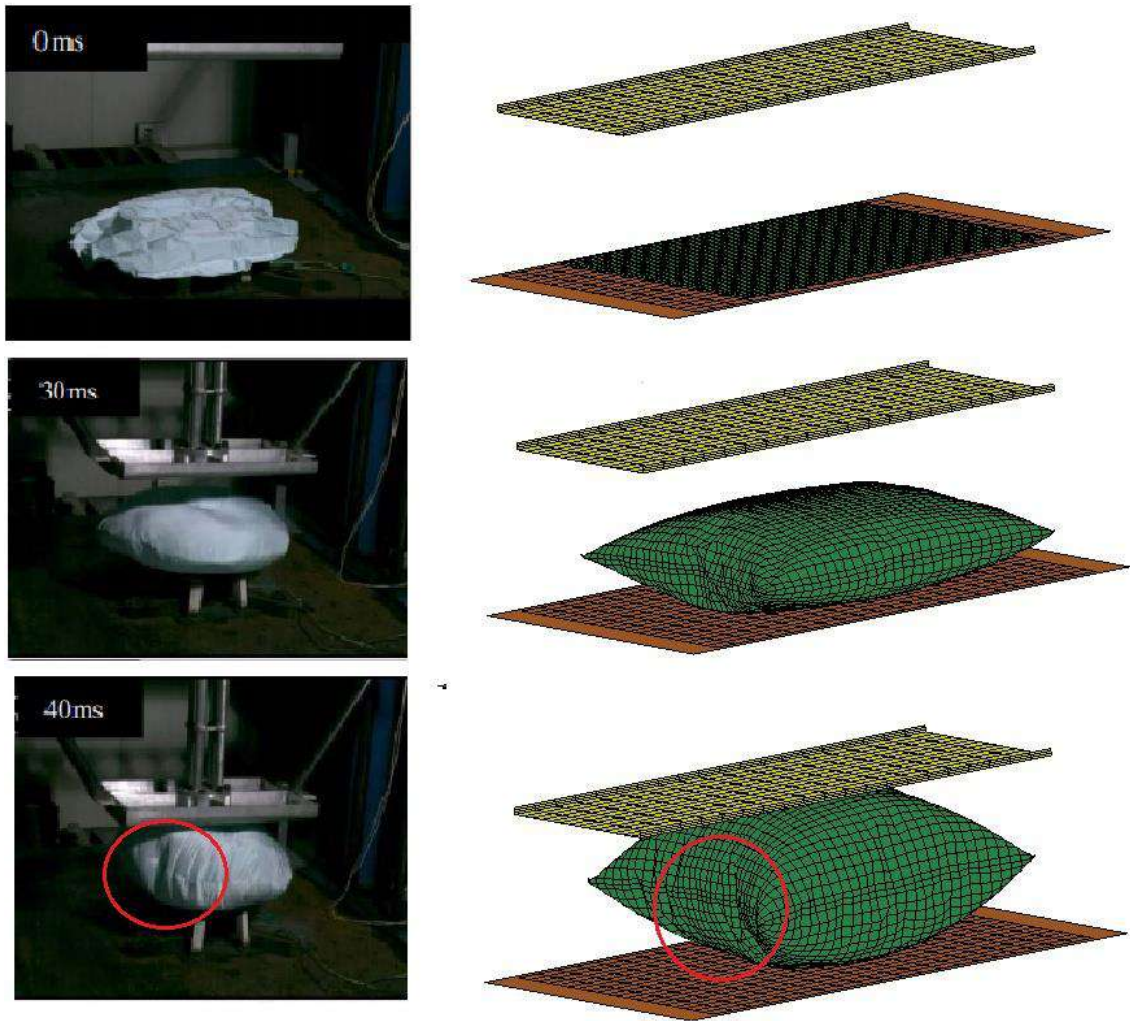
Dans le paragraphe précédent nous avons essayé de confronter nos résultats avec les quelques rares études trouvées dans la littérature afin de valider les simulations dans le cadre d'un déploiement libre des airbags conducteur. Cela nous a permis aussi de tester la pertinence du modèle EF développé pour simuler, cette fois-ci, l'écrasement de l'airbag conducteur. Les deux figures, montrent une comparaison des images de nos résultats numériques et ceux expérimentaux pris à différents instants compris entre 0 et 40 ms, pour un airbag conducteur de 60 litres utilisé dans une voiture touristique de taille moyenne [44]. Les images correspondent aux essais d'écrasement des airbags conducteur, par un impacteur, positionné au dessus de l'airbag à une distance comprise entre 30 cm à 50 cm. Par manque d'information, sur les propriétés mécaniques déterminées par des essais de bi-traction, la forme et les dimensions d'airbags utilisées dans l'étude expérimentale sont celle de Lee et al. (2009). Plusieurs paramètres, dans le modèle EF,

ont été variés pour essayer de recaler le modèle sur les données expérimentales. Dans ce contexte, la démarche adoptée dans cette partie, est identique à celle utilisée dans la section IV.4.1, pour valider le déploiement libre puis l'écrasement d'un airbag. En effet, des données purement théoriques ont été obtenues, après plusieurs itérations, puis comparées aux résultats expérimentaux de Lee et al. (2009). Les paramètres géométriques et les matériaux retenus, dans cette étude, sont : ( $l_1 \times b_1 \times e = 890 \times 675 \times 0.42 \text{mm}^3$ ), ( $E_0 = 3.6 \text{GPa}$ ,  $E_{90} = 3.3 \text{GPa}$ ) et pression (0.018 MPa), respectivement.

Dans cette analyse, nous nous sommes limités donc, à une comparaison d'images, malgré le manque d'information sur les conditions des essais effectués. Néanmoins, nos simulations 3D semblent donner une bonne synchronisation entre le déploiement libre des airbags et la position de l'impacteur. Cette situation est assez proche de celle observée expérimentalement par Mr. Lee et al, pour un airbag conducteur de volume de remplissage de ~60 litres.



**Figure IV.19.** Tests d'écrasement des airbags conducteur, obtenus à l'aide d'un impacteur, positionné à 30 cm : essais expérimentaux et prédictions numériques [15,44].



**Figure IV.20.** Tests d'écrasement des airbags conducteur, obtenus à l'aide d'un impacteur, positionné à 50 cm : essais expérimentaux et prédictions numériques [15,44].

Dès les premières millisecondes, l'airbag est en phase de déploiement libre, sous l'action du flux de gaz. À partir de 30 ms, plusieurs phénomènes coexistent et l'impacteur rigide commence à heurter l'airbag après, 30 ms suivi d'un écrasement sérieux après 40 ms, durant la phase de remplissage progressif du sac gonflable (Fig.IV.19). Par ailleurs, pour une distance de 50 cm, l'impacteur heurte l'airbag conducteur qu'à partir de 40 ms, avec l'apparition d'une zone de plis très marquée (Fig.IV.20). Ils sont moins visibles numériquement dus probablement aux valeurs de rigidités différentes [44, 45].

Malheureusement, il est difficile à ce stade de tirer des conclusions à partir de ces images car, beaucoup de conditions sont pour nous inconnues. Néanmoins, la



corrélation ci-dessus, entre l'expérience et le modèle EF, démontre que le modèle proposé sous LsDyna/Explicit est capable de prédire certains scénarios assez complexes et très réalistes. Par conséquent, ce modèle peut être, donc intégré dans le modèle global pour simuler des cas plus complexes tel que le crash-test.

#### **IV.5. Conclusion**

Nous avons, dans cette partie, développé et proposé un modèle numérique 3D destiné à prédire le déploiement d'un airbag conducteur, suite à une supposée collision frontale. Différents sacs de gonflement de trois fabricants (R, P et VW), caractérisés par une très faible rigidité ont été testés. Cette faible rigidité est responsable de l'appariation des plissements, dans les airbags. Par ailleurs, la pression imposée pour remplir les sacs gonflables, durant leurs déploiements est aussi primordiale, pour assurer une sécurité optimale. En effet, une pression trop élevée, peut causer un effet de rebondissement, par exemple de la tête du conducteur sur l'airbag, avec un risque très important de blessure grave. En revanche, une très faible pression peut rendre l'airbag inefficace pour retenir le corps du passager et lui évite de s'écraser sur le volant, le tableau de bord ou sur le pare-brise durant une collision.

Néanmoins, les déformations hyper-élastiques, localisées des pressions imposées dans les trois types d'airbags testés ; atteignent des valeurs bien inférieures à la déformation totale c-à-d la rupture mesurable dans nos essais de traction. Les résultats nous ont permis aussi, de montrer que le déploiement des airbags dépend sensiblement des propriétés mécaniques des tissus employés, pour la fabrication des sacs gonflables ; ainsi que du volume de remplissage admissible. La configuration (R) se déploie, de manière beaucoup moins importante que les configurations (P) et (VW) due essentiellement aux caractéristiques mécaniques. Enfin, le modèle développé reproduit fidèlement la réponse mécanique globale du déploiement du sac gonflable.

Pour étudier le comportement mécanique des airbags à l'écrasement, des simulations numériques ont été aussi développées pour déterminer la distance de sécurité minimale, qui doit séparer un passager de son coussin gonflable pour assurer son sécurité. Il a été observé qu'une distance inférieure à 35 cm rend le coussin gonflable inefficace, puisqu'il n'absorbe que ~13% de l'énergie cinétique de l'impacteur. Ce dernier heurte, à grande vitesse, la plaque thermoplastique censée

de simuler le tableau du bord d'un véhicule de série. Au-delà de cette distance, l'airbag conducteur, de petit volume ~45 à 60 litres, absorbe bien la majorité de l'énergie cinétique de l'impacteur (ou le conducteur) sans que ce dernier n'heurte le volant, ni le tableau du bord, voire même le pare-brise. Il a été clairement montré aussi que l'airbag résiste bien au choc de l'impacteur à 50 m/s. En effet, la contrainte maximale supportée par les tissus des airbags, lors d'un essai d'écrasement, est bien inférieure à celle obtenue en essai de traction. La déformation imposée ne provoque, ni l'éclatement de l'airbag, ni la rupture des tissus. Cependant, le taux de remplissage des sacs gonflables et l'hyper-élasticité des tissus donnent, aux airbags, cette capacité à bien absorber l'impact, suite à un choc frontal, lors d'un accident de véhicule. Globalement, une bonne adéquation entre les valeurs simulées moyennes et les résultats expérimentaux a été obtenue.

## Références

- [1] N. Bourdet, C. Deck, V. Tinard, et al. Behaviour of helmets during head impact in real accident cases of motorcyclists. *Int J Crashworthiness*. 17(2012) 51-61.
- [2] Y. Han, J. Yang, K. Mizuno, et al. Effects of vehicle impact velocity, vehicle front-end shapes on pedestrian injury risk. *Traffic Inj Prev*. 13(2012) 507-518.
- [3] L. Raslavičius, L. Bazaras, R. Keršys, Accident reconstruction and assessment of cyclist's injuries sustained in car-to-bicycle collision. *Proce. Eng*. 187(2017) 562-569
- [4] H. D. Audrey, R. Federic, M. P. Pacaux, and M. Herve, Determination of pre-impact occupant postures and analysis of consequences on injury outcome. Part: a driving simulator study, *Accid. Anal. Prev*. 43(2011) 66-74.
- [5] E. R. Braver, and S. Y. Kyrychenko, Efficacy of side airbags in reducing driver deaths in driver-side collisions, *Am. J. Epidemiol*. 159(2004) 556-564.
- [6] F. A. Bankdak, P. C. Chan, and Z. Lu, An experimental airbag test system for the study of airbag deployment loads, *Int. J. Crashworthiness* 7(2002) 129-161.
- [7] Y. Lu, J. Lai and Y. Feng, The modeling and simulation of collision protection system between the driver of non-motor vehicle and car door, *EURASIPJournal on Wireless Communications and Networking* 99(2018) 1-10.
- [8] Y. Peng, J. Yang, C. Deck, et al. Development of head injury risk functions based on real-world accident reconstruction. *Int J Crashworthiness* 19(2014) 105-114.
- [9] TQ. Fan, J. Zhang, QJ. Zhao, et al., Simulation modeling of vehicle front crash based on benchmark technology, *Bus Tech. Res*. 32(2010) 12-14.
- [10] Y. E. Wang, C. X. Yang, and K. Peng, Airbag cushion process simulation for cargo airdrop system, *J. Syst. Simul*. 19(2007) 3176-3179.
- [11] J. J. Freesmeier, and P. B. Butler, Analysis of a hybrid dual combustion-chamber solid propellant gas generator, *J Propulsion Power*. 15(1999) 552-561.
- [12] W. T. Wu, W. Hsieh, C. H. Huang, and C. H. Wang, Theoretical simulation of combustion and inflation processed of two-stage airbag inflators, *Combust. Sci. Tech*. 117 (2005) 383-412.
- [13] K. W. Marshall, B. L. Koch, and J. C. Egelhoff, Air bagrelated deaths and serious injuries in children: injury patterns and imaging findings. *AJNR Am. J. Neuroradiol*. 19(1998) 1599-1607.

- [14] D. Bendjaballah, A. Bouchoucha, M. L. Sahli, J.-C. Gelin, Numerical modelling and experimental analysis of the passenger side airbag deployment in out-of-position, *International Journal of Crashworthiness*, (2017), 1-14.
- [15] D. Bendjaballah, A. Bouchoucha, M. L. Sahli, J.-C. Gelin, Numerical analysis of side airbags deployment in out-of-position situations, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering* 12 (2017) 1-12.
- [16] M. Mahangare, D. Trepess, M. Blundell, M. Freisinger, H. Hoffmann, and S. Smith, A methodology for the simulation of out-of-position driver airbag deployment, *Int. J. Crashworthiness*. 11(2006) 511-517.
- [17] P-O. Marklund and L. Nilsson, Optimization of airbag inflation parameters for the minimization of out of position occupant injury, *Computational Mechanics* 31(2003) 496-504.
- [18] A. Chawla, S. Mukherjee, and A. Sharma, Mesh generation for folded airbags, *Comput. Aided Des. Appl.* 1(2004) 269-276.
- [19] H. Deery, A. P. Morris, B. Fildes, and S. Newstead, Airbag technology in Australian passenger cars: preliminary results from real world crash investigations, *J. Crash Prev. Inj. Control*. 1(1999) 121-128.
- [20] S. M. Duma, B. M. Boggess, J. R. Crandall, S. R. Hurwitz, K. Seki, and T. Aoki, Upper extremity interaction with a deploying side airbag: a characterization of elbow joint loading, *Accid. Anal. Prev.* 35(2003) 417-425.
- [21] N. Li, Finite element modelling and simulation of occupant responses in highway crashes, *Thèse de Doctorat à l'University of North Carolina at Charlotte* (2014).
- [22] Y. Y. Tay, CS. Lim, and H. M. Lankarani, A finite element analysis of high-energy absorption cellular materials in enhancing passive safety of road vehicles in side-impact accidents, *Int. J. Crashworthiness*. 19(2014) 288-300.
- [23] Y. Haland, and B. Pipkorn, A parametric study of a side airbag system to meet deflection based criteria, *J. Biomech. Eng.* 118(1996) 412-419.
- [24] G. Li, J. Yang, C. Simms, Safer passenger car front shapes for pedestrians: A computational approach to reduce overall pedestrian injury risk in realistic impact scenarios [J]. *Accid. Anal. Prev.* 100(2017) 97-110.
- [25] P. Wang, CY. Chan, Vehicle collision prediction at intersections based on comparison of minimal distance between vehicles and dynamic thresholds, *IET Intell. Transp. Syst.* 11(2016) 676-684.

- [26] M. U. Khan, and M. Moatamedi, A review of airbag test and analysis, *Int. J. Crashworthiness*. 13(2008) 67-76.
- [27] C. S. Crandall, L. Olson, and D. P. Sklar, Mortality reduction with airbag and seat belt use in head-on passenger car collisions, *Am. J. Epidemiol.* 153(2001) 219-224.
- [28] M. Mendoza-Vazquez, J. Davidsson, K. Brodin, Construction and evaluation of thoracic injury risk curves for a finite element human body model in frontal car crashes. *Accid Anal Prev.* 85(2015) 73-82.
- [29] D. J. Gabauer, and H. C. Gabler, The effects of airbags and seatbelts on occupant injury in longitudinal barrier crashes, *J. Safety Res.* 41(2010) 9-15.
- [30] M. U. Khan, M. Moatamedi, M. Souli, and T. Zeguer, Multiphysics out of position airbag simulation, *Int. J. Crashworthiness*. 13(2008) 159-166.
- [31] S. R. Potula, Safety counter measures: a comprehensive crashworthiness study of out-of-position (OOP) airbag deployment and passenger impact, Master Thesis, Mississippi State University (2012).
- [32] K. Messaoudene, Dispositif Innovant de Frein Automobile par le Volant, Intégré à un Système de Direction Type Steer-by-Wire, Thèse de Doctorat à L'Université d'Evry-Val d'Essonne (2011).
- [34] P-O. Marklund, L. Nilsson, Simulation of airbag inflation processes using a coupled fluid structure approach, *Computational Mechanics* 29(2002) 289-297.
- [35] Z. Cai, Z. Li, L. Wang, H. Y. Hsu, Z. Xiao, C. J. Xian, A three-dimensional finite element modelling of human chest injury following front or side impact loading, *Journal of Vibro-engineering*, 18(2016) 539-550.
- [36] P. Baudrit, A. Petitjean, P. Potier et al., Comparison of the thorax dynamic responses of small female and midsize male post mortem human subjects in side and forward oblique impact tests. *Stapp Car Crash Journal*, 58(2014) 103-121.
- [37] K. M. Tse, S. P. Lim, et al. A review of head injury and finite element head models. *American Journal of Engineering, Technology and Society*, 1(2014) 28-52.
- [38] L. Thollon, Y. Godio, S. Bidal, et al., Evaluation of a new security system to reduce thoracic injuries in case of motorcycle accidents. *Int J Crashworthiness*. 15(2010) 191-199.
- [39] M. Ghajari, U. Galvanetto, L. Iannucci, et al., Influence of the body on the response of the helmeted head during impact. *Int J Crashworthi.* 16(2011) 285-295.
- [40] MR. Bambach, RJ. Mitchell, The rising burden of serious thoracic trauma sustained by motorcyclists in road traffic crashes, *Acci. Anal Prev.* 62(2014) 248-258.

- [41] R. Desbats, Analyse du comportement de l'abdomen lors d'un choc automobile pour l'amélioration de la biofidélité et de la prédiction des lésions abdominales par le mannequin de choc THOR, Thèse de Doctorat à l'Université de Lyon 1 (2016).
- [42] M. Yu, Finite Element Analysis of Passenger Multiple Belt Restraint Configurations, Thèse de Doctorat à l'Wake Forest University school of Biomédical Engineering & Sciences (2010).
- [43] F. Robache, Évaluation sur simulateur de conduite du comportement humain en situation de pré-crash : application à l'amélioration des airbags, Thèse de Doctorat à l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis (2017).
- [44] J. K. Lee, W. P. Ha, J. H. Lee, D. B. Chae, J. H. Kim, Validation methodology on airbag deployment process of driver side airbag, Computer Science 363(2009) 1-9.
- [45] E. Oñate, F. Flores, Advances in the formulation of the rotation-free basic shell triangle, Comput. Meth. Appl. Mech. Engng., 194(2005) 2406-2443.

**Chapitre V : Modélisation et  
simulation numérique du  
comportement dynamique d'un  
conducteur lors d'un choc frontal**

---

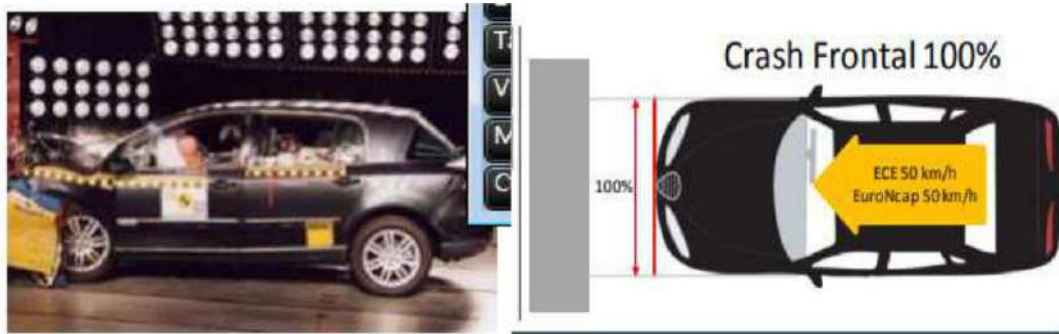
## V.1. Introduction

Les accidents représentent la première cause de mortalité dans le monde [1-3]. La grande majorité de ces décès accidentels survient, à la suite d'un accident de la route avec plus de 80% des cas à, la suite d'un traumatisme crânio-cérébral grave [4]. Aujourd'hui, réduire ces décès est devenu, une priorité dans le monde de la sécurité routière [5-8]. Dans ce contexte, l'ensemble des véhicules touristiques mis en circulation, sont soumis à un certain nombre de réglementations, où les critères de blessure des passagers sont évalués, de plus en plus, à l'aide des essais mécaniques de type crash-test. Des essais normalisés mises en place, pour s'assurer que les voitures touristiques protègent bien leurs occupants. Généralement, ces essais sont mis en place, pour pouvoir réaliser des scénarios très réalistes, dans lesquels les occupants sont représentés, de plus en plus, par des mannequins de choc [9,10].

Cependant, plusieurs approches sont envisageables, pour évaluer la sécurité dans les voitures touristiques, et aussi pour étudier le comportement cinématique du corps humain, lors d'un accident de la route. On distingue deux types d'essais mécaniques de crash-test : les essais physiques et les simulations multi-physiques [11-13]. D'une part, les essais physiques sont effectués avec des cadavres humains donnés à la science, ou avec des mannequins fabriqués en polymères thermoplastiques. Ils sont intimement liés dans la mesure ; où les mannequins doivent posséder les caractéristiques mécaniques issues des tests cadavériques. Et d'autre part, les simulations multi-physiques qui sont, de plus en plus, privilégiées et sont largement utilisées, ces dernières années, dans l'industrie de l'automobile pour des raisons essentiellement de coût et de gain de temps. Ces simulations permettent d'évaluer numériquement les risques encourus par un passager ; lors d'un accident de la route [14-18]. Grâce à l'évolution des moyens informatiques, les essais physiques sont repoussés par les ingénieurs, jusqu'aux derniers stades du développement de voitures touristiques, et donc de diminuer au mieux leur nombre. Mais bien que ces tests réalistes soient très coûteux, ils restent l'unique moyen de mesurer avec précision, le niveau de sécurité qu'on peut attendre d'une voiture touristique [19-21].

De manière à prévoir le comportement du corps humain, lors d'un choc frontal, des modèles numériques ont été développés dans cette étude. L'objectif est de fournir une connaissance satisfaisante et exploitable, sur le comportement dynamique des occupants de véhicules, lors d'un accident de la route (Fig.V.1).





**Figure V.1 :** Image d'un véhicule touristique lors d'un test de collision frontale avec obstacle [22,43].

La prise en compte des spécificités humaines (sexe, âge, corporation, poids...etc.) dans les tests de crash impose la nécessité absolue d'utiliser des sujets humains. Ceci pose de nombreux problèmes essentiellement d'ordre éthique. Le don de corps à la science est assez peu répandu à travers le monde, et principalement dans un pays musulman comme l'Algérie. De plus, ces essais de crash-tests sont très lourds à mettre en place, de par l'instrumentation nécessaire à chaque test. Ces différentes considérations nous ont donc amené à développer, nous-même, un premier modèle multi-physique, à l'aide de la méthode des éléments finis. Ce qui nous permet de reproduire, numériquement toutes les situations imaginables, sans limitation d'ordre quantitatif [23-27]. Les principales caractéristiques du modèle développé, qui est utilisé dans notre étude, ont été déterminées par des essais expérimentaux exposés dans le chapitre III.

## **V.2. Modélisation numérique d'une collision frontale**

Nous abordons dans cette section les aspects numériques pour modéliser, à l'aide de la méthode des éléments finis, un accident de la route d'un véhicule touristique conduit par un usager adulte ; de sexe masculin et dans plusieurs configurations. Il s'agit de reproduire une collision frontale avec un obstacle rigide indéformable, dont lequel le conducteur est supposé, partiellement ou totalement, ceinturé voire vulnérable sans ceinture de sécurité. Dans ces scénarios, il a aussi été prévu de complexifier le problème à étudier en considérant, cette fois-ci, le déploiement synchronisé de l'airbag. Le modèle développé dans notre étude, tient en compte que des éléments importants dans un cas de collision frontale, afin d'alléger le calcul et de nous permettre de se rapprocher au mieux de la réalité, et aux conditions des essais de références ; utilisés dans nos travaux pour une confrontation expérimentale.

Les éléments pris en compte dans le modèle EF sont principalement : le mannequin (conducteur), le châssis, la ceinture de sécurité, l'airbag, le dossier, l'assise, le pare-brise et le toit (Figs.V5 et V.7). Leur conception géométrique a été réalisée grâce au logiciel Solidworks puis modéliser avec LsDyna®.

### V.2.1. Mesures morphologiques

Toujours dans l'idée de tirer un maximum d'informations de cette expérience numérique, une campagne de recueil de données a été réalisée sur la morphologie d'un conducteur, de sexe masculin, et limité à une catégorie d'usager jeune et adulte de moins de 45 ans. Tout d'abord de manière conventionnelle, je me suis moi-même mis dans le rôle du conducteur modèle ; donc je me suis pesé puis mesuré grâce à un dispositif que j'ai conçu puis réalisé (Fig.V.2).

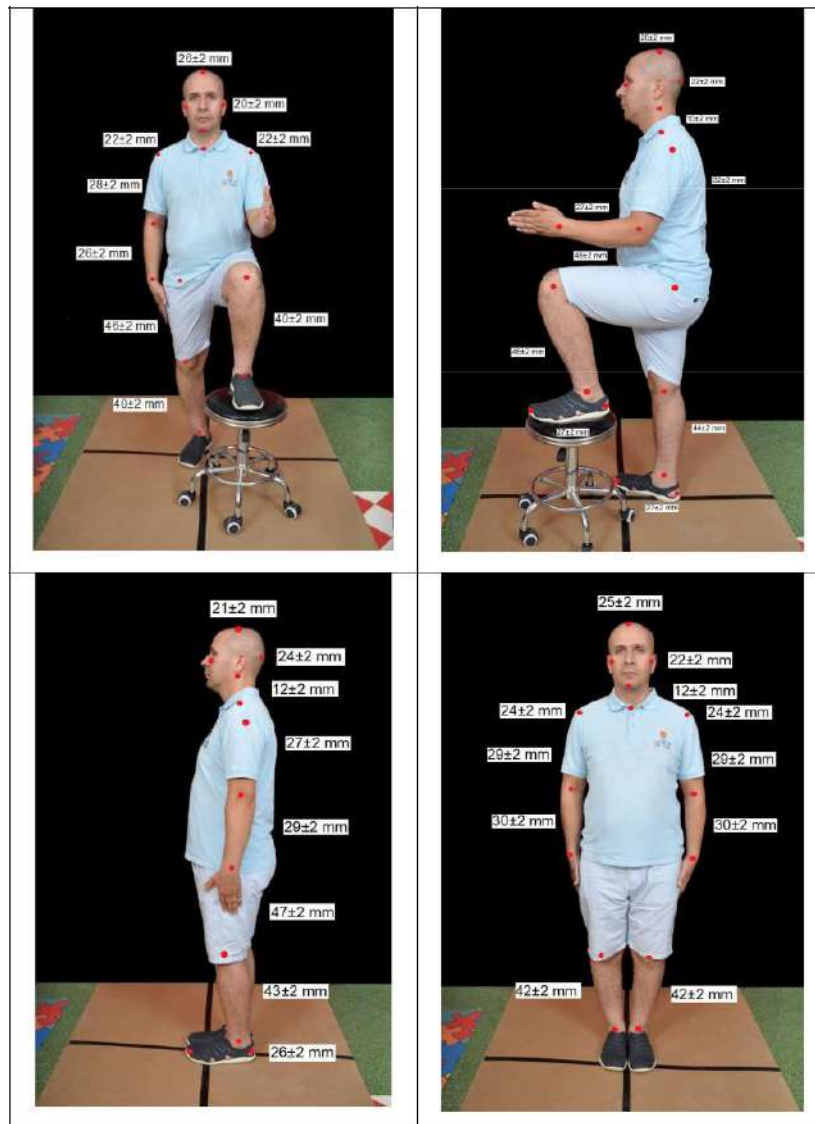


Figure V.2. Photographies d'un conducteur adulte en espace calibré.

Dès lors, des mesures ont été réalisées au mètre ; et des photos ont été prises dans un espace calibré, où j'ai pris des postures permettant de distinguer les positions de mes articulations (Fig.V.2). Ces prises de vue ont pour objectif de permettre la reconstruction à posteriori, de notre maquette numérique du mannequin, dédiée à la simulation d'un accident de la route.

### V.2.2. Modèle numérique de l'être humain

Nous avons développé un modèle multi-corps représentatif du corps humain que nous avons adapté en fonction de nos besoins. Nous décrivons, dans cette section, les principales hypothèses de modélisation que nous avons considérées, pour sa conception. Le modèle 3D développé correspond à un jeune conducteur masculin adulte âgé de 40 ans qui pèse 85 kilos pour 1,70 m (Fig.V.3). Le mannequin comporte 15 pièces rigides indéformables, soit 1608 éléments et 1734 nœuds. Il est modélisé par des multi-corps, composés de 15 surfaces ellipsoïdes et 35 liaisons. Il a été positionné dans la même posture que celle d'un conducteur de véhicule touristique, en position de conduite assise (Fig.V.4). Ceci permet, au final, de simuler numériquement, plusieurs configurations d'accident de la route, souvent difficilement reproductibles par l'expérimentation.

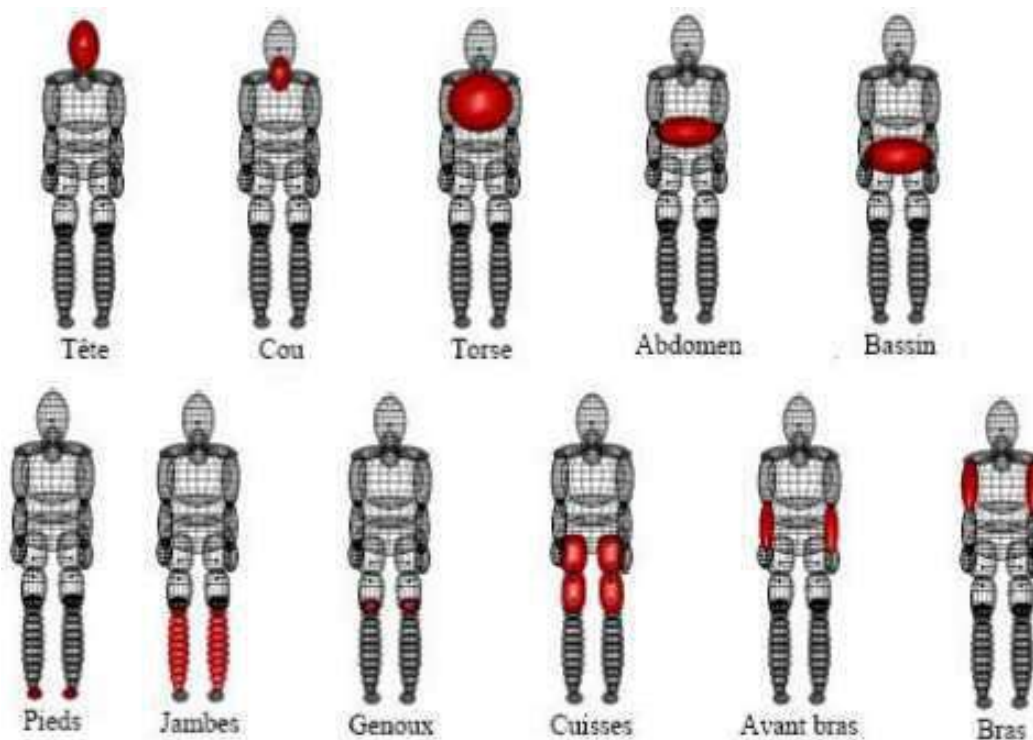
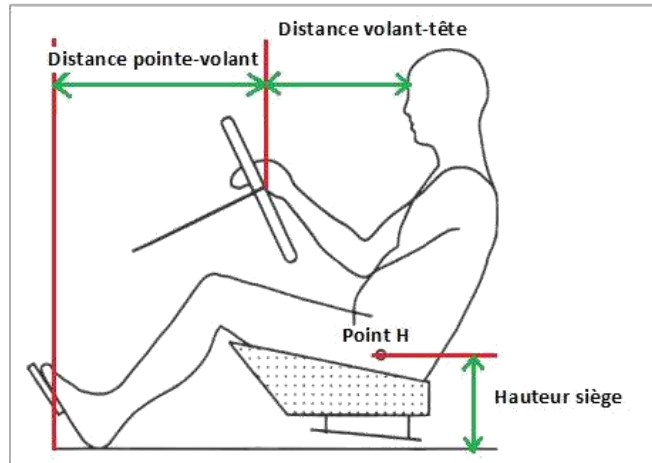


Figure V.3. Conception 3D d'un modèle multi-corps [28,43].



**Figure V.4.** Représentation schématique du modèle et ses variables de position [29,43,56].

### V.2.3. Modèle numérique d'un véhicule touristique

L'objectif visé des travaux, réalisés dans cette étude, est de simuler principalement un accédant de la route, pour des chocs spécifiquement frontaux, avec un obstacle rigide impacté, à différentes vitesses, comprises entre 40 à 90 km/h. Dans ce contexte, nous nous sommes donc focalisés sur les parties importantes de l'habitacle du véhicule. Les parties prises en compte, pour modéliser et construire cette structure, étaient une partie du châssis, le dossier, l'assise, le pare-brise et le toit (Fig.V.5). Sa géométrie est définie, à partir des mesures directes, effectuées sur le modèle Clio 3 et certaines données du constructeur Renault (Fig.V.5). L'avantage d'une telle modélisation est d'alléger les calculs, et de permettre de simuler le comportement global du système, avec des géométries simplifiées et donc de pouvoir reproduire des configurations de choc très variées.



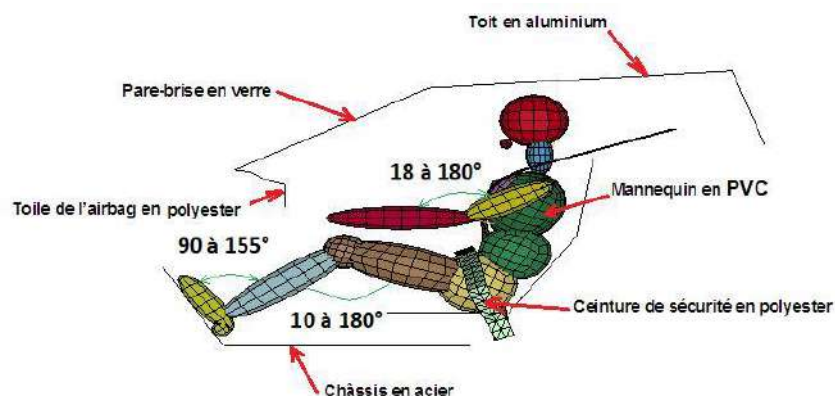
**Figure V.5.** Comparaison entre la géométrie du véhicule et de son modèle numérique 3D simplifié.

Il est intéressant aussi de rappeler que, dans une collision, le conducteur du véhicule prend souvent différentes postures, qui font varier l'angle de ses épaules, de ses coudes, de ses hanches et de ses genoux. Dans ce contexte, nous avons proposé un modèle, qui reproduit au mieux certains mouvements, en imposant plus de 34 liaisons, à notre mannequin, pour commander ses mouvements (Fig.V.6).



**Figure V.6.** Mouvements d'un conducteur adulte, lors de manœuvre de freinage, d'accélération ou en cas de chocs frontaux [30,43,56].

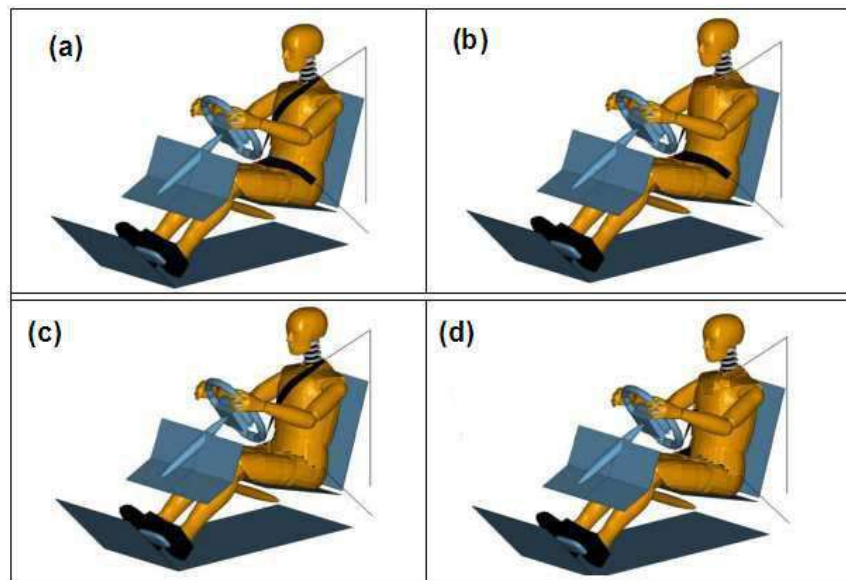
Le modèle numérique développé, à l'aide de la méthode des éléments finis est constitué d'un châssis massif en acier rigide indéformable, sur lequel vient se positionner un siège automobile en aluminium. Face à ce dernier, une succession de structures rigides, un tableau de bord, un pare-brise et un toit métallique considéré aussi comme rigide indéformable (Fig.V.7). Cependant, le positionnement assise d'un mannequin avec ses jambes est rendu possible grâce à un faible encombrement adopté dans la construction du modèle EF. Cette position a été calquée visuellement sur les positions expérimentales et des mesures directes que j'ai effectué sur moi-même [31-36].



**Figure V.7.** Modèle éléments finis, utilisé dans la simulation numérique d'une collision frontale [37,38].

Dans un cycle d'optimisation, les angles articulaires des membres supérieurs et inférieurs, ont été ajustés pour obtenir des zones de contact bras-pieds, le plus souvent identiques aux résultats d'essais expérimentaux (Fig.V.7). En plus, dans cette étude plusieurs scénarios ont été imaginés pour étudier au mieux le

comportement dynamique d'un conducteur adulte lors d'une collision frontale. En effet, l'utilisateur est tantôt, supposé maintenu au siège avec une ceinture sous-abdominale au niveau du bassin (Fig.V.8(b)), et tantôt maintenu avec une ceinture thoracique (Fig.V.8(c)). Il a aussi été considéré un conducteur, dans une configuration de vulnérabilité, c-à-d non-ceinturé (Fig.V.8(d)), et enfin maintenu parfaitement avec une ceinture à trois points (Fig.V.8(a)).



**Figure V.8.** Position assise d'un conducteur adulte : **(a)** parfaitement ceinturé, **(b)** et **(c)** maintenu avec une ceinture sous-abdominale ou thoracique et **(d)** vulnérable.

Le châssis, le dossier, l'assise, le toit et le pare-brise sont modélisés par des surfaces planes, composées d'éléments plaques, d'une épaisseur de 1 mm. Les surfaces du châssis, du dossier et de l'assise sont conçues de sorte que leur position ; par rapport au conducteur est telle que, ce dernier soit en appui contre ceux-ci. La ceinture de sécurité et l'airbag sont modélisés avec des éléments plaques à un seul point d'intégration dans l'épaisseur, pour reproduire au mieux un comportement d'une membrane à faible rigidité. Elle est placée, dans notre modèle horizontalement au-dessus de l'abdomen et croisée pour le thorax. Les propriétés physiques sont présentées en détail dans le chapitres III.

Le maillage du modèle EF est généré, dans le logiciel Lsdyna®, à l'aide d'un mailleur automatique. Il est composé initialement de 1959 éléments quadrilatéraux, et de 2066 nœuds pour l'ensemble du système. Un contact de type contact 37, a été utilisé, pour définir le contact entre les différents composants de notre modèle, avec un coefficient de frottement égal à 0,2 . Au niveau des encastremets, tous

les nœuds des extrémités de la ceinture de sécurité sont considérés parfaitement bloqués. Le conducteur est considéré totalement libre, à l'intérieur de l'habitacle. Par ailleurs, un matériau de type MAT\_34, a été utilisé pour simuler le comportement mécanique hyper-élastique de l'airbag. En outre, le comportement mécanique de la ceinture de sécurité, est reproduit par un matériau, de type MAT\_060. Le châssis, le dossier, l'assise et le toit, ainsi que le pare-brise ont été modélisés, en utilisant un matériau de type MAT\_RIGID et MAT\_BRITTLE, respectivement. Un matériau de type MAT\_004 a été aussi retenu, pour modéliser le comportement du conducteur en polymère thermoplastique. L'ensemble des propriétés mécaniques des différents matériaux utilisés, dans les simulations numériques, est présenté en détail dans le chapitre III. La vitesse d'impact du véhicule est prise comme un paramètre fondamental, directement lié au risque lésionnel et blessures mortelles, chez les occupants du véhicule. Dans ce contexte, le modèle développé, a été piloté en vitesse d'impact, dans les plages de vitesse suivantes : lente, de 45 km/h, moyenne 70 km/h et rapide au-delà de 85 km/h. Le profil de la route ne sera pas considéré comme un facteur influençant dans cette étude.

### **V.3. Résultats de la simulation numérique d'une collision frontale**

Pour étudier le comportement dynamique du conducteur d'une voiture touristique, durant une collision frontale avec un obstacle, des simulations multi-physiques ont été réalisées, en tenant en compte du retard inertiel du corps du conducteur ; qui bascule systématiquement vers l'avant. Dans cette optique, nous avons donc inclus, diverses situations, pour pouvoir traiter un maximum de scénarios, (Fig.V.8) : Scénario 1 : un conducteur parfaitement ceinturé. Scénario 2 : le haut de l'abdomen ou le bassin est ceinturé, et Scénario 3 : un usager vulnérable.

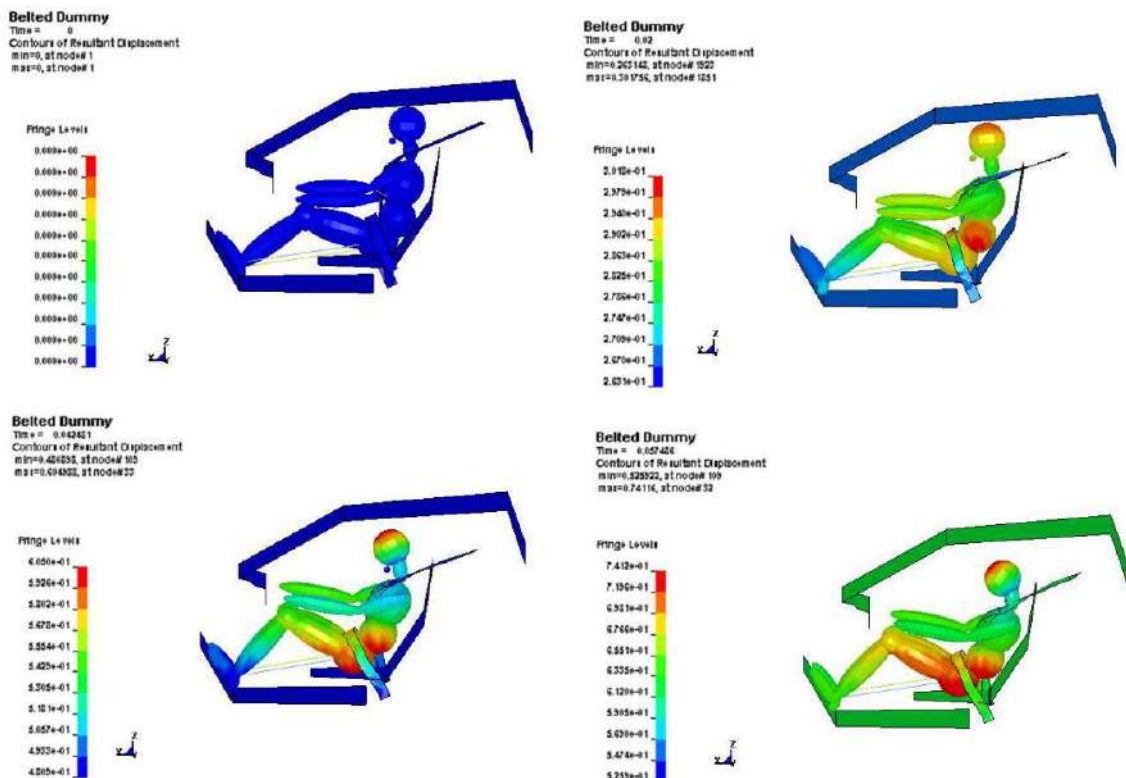
Nous présentons dans cette section, les premiers résultats de la simulation numérique, obtenus par le modèle 3D, développé dans cette étude. Cette simulation a été réalisée sous le logiciel LsDyna®.

#### **V.3.1. Comportement dynamique d'un conducteur parfaitement ceinturé**

##### **V.3.1.1. La dynamique mise en jeu durant une collision frontale**

Les résultats numériques, du comportement dynamique d'un conducteur parfaitement ceinturé, ont permis d'enregistrer les mouvements du conducteur, à l'intérieur d'un véhicule touristique. En effet, des séquences d'images d'une collision

frontale à une vitesse de 90 km/h, à différents intervalles de temps, sont illustrées sur la (Fig V.9). Il a été constaté que, dans aucun des cas, l'utilisateur n'est passé par-dessus ou par-dessous de la ceinture de sécurité et ce quelle que soit la vitesse d'impact du véhicule, comprise entre 40 et 90 km/h. D'autre part, nous avons constaté aussi que la position et la cinématique du conducteur, pendant l'accident, sont restées stables à l'intérieur de l'habitacle. Dans ces conditions, les résultats obtenus permettent de prouver que la ceinture de sécurité assure confortablement le maintien en place du conducteur en position assise ; ce qui augmente généralement sa sécurité à l'intérieur du véhicule. Par ailleurs, la probabilité pour que le conducteur ou les passagers du véhicule subissent des blessures, ou des lésions graves, lors d'un accident de la route ; est vraiment bien réduite lorsque ces passagers sont correctement ceinturés.

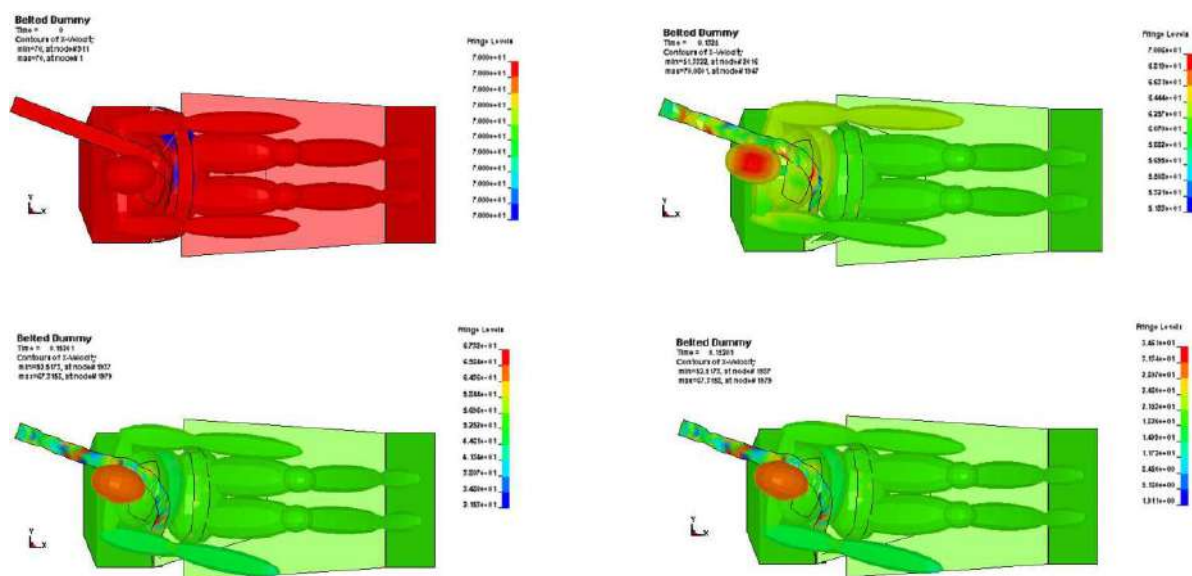


**Figure V.9.** Comportement dynamique d'un conducteur adulte, parfaitement ceinturé pendant une collision à 90 km/h.

La figure V.10 montre le comportement du conducteur, au moment de l'impact obtenu à 70 km/h. Les résultats obtenus, en termes de vitesse de déplacement ( $V_{x-x}$ ), montrent que l'utilisateur n'interagit pas directement avec l'habitacle intérieur du véhicule, pendant la collision. Grâce à la ceinture de sécurité, le conducteur est bien maintenu dans son siège, après un choc avec un obstacle. Le mouvement du corps

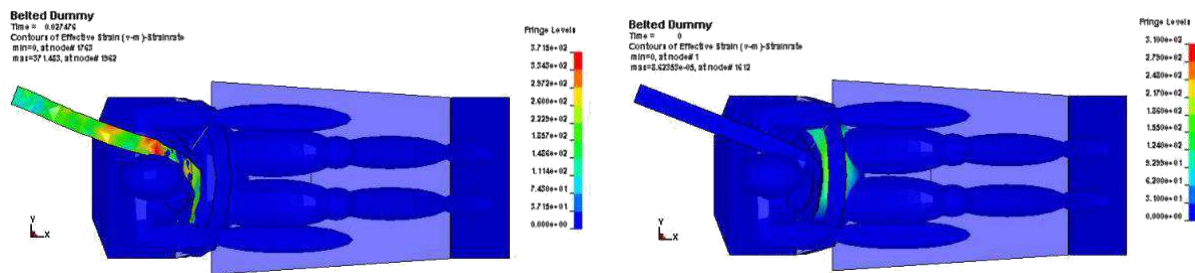


du conducteur est extrêmement sécurisé, pour lui-même, et pour les autres usagers de la route ; qui entreraient en collision de plein fouet avec le conducteur. Ainsi, ces résultats (Fig.V.10) nous permettent de voir l'évolution des vitesses de chaque composant avec des valeurs maximales enregistrées, au niveau de la tête de l'usager. En effet, dans cette situation, la seule partie du corps vulnérable est la tête du conducteur. Elle penche sensiblement en avant, en fonction de la vitesse d'impact, avec le risque à la fin de la collision de se faire repoussée rapidement vers l'arrière. Ce mouvement de la tête, connu par le coup du lapin, qui peut provoquer des traumatismes ; allant des micro-déchirures musculaires, jusqu'à des fractures cervicales accompagnées d'une section de la moelle épinière. Ils peuvent entraîner, en plus, une quadriplégie irréversible, voire même le décès du conducteur. A ce stade, nous pouvons conclure que la présence de l'appuie-tête, est aussi primordiale pour protéger à la-fois, le cou et la tête du conducteur, lors d'une collision.



**Figure V.10.** Isovaleurs des vitesses de déplacement  $V_x-x$ , durant les différents instants d'une collision frontale, obtenus à 70 km/h.

Les résultats, en termes de la déformation effective, obtenus dans les mêmes conditions, à une vitesse d'impact égale à 70 km/h, sont illustrés sur la figure V.11. Nous pouvons observer initialement que, la ceinture de sécurité, se tend de manière à maintenir le corps solidaire au siège (Fig.V.11). Elle est donc un élément clé, pour garantir la protection du conducteur, en cas de choc, puisqu'elle absorbe une grande partie de l'énergie cinétique de la voiture, pendant la collision. Par conséquent, elle augmente la sécurité des occupants à l'intérieur du véhicule.



**Figure V.11.** Isovaleurs des déformations effectives, durant les différents instants d'une collision frontale à 70 km/h.

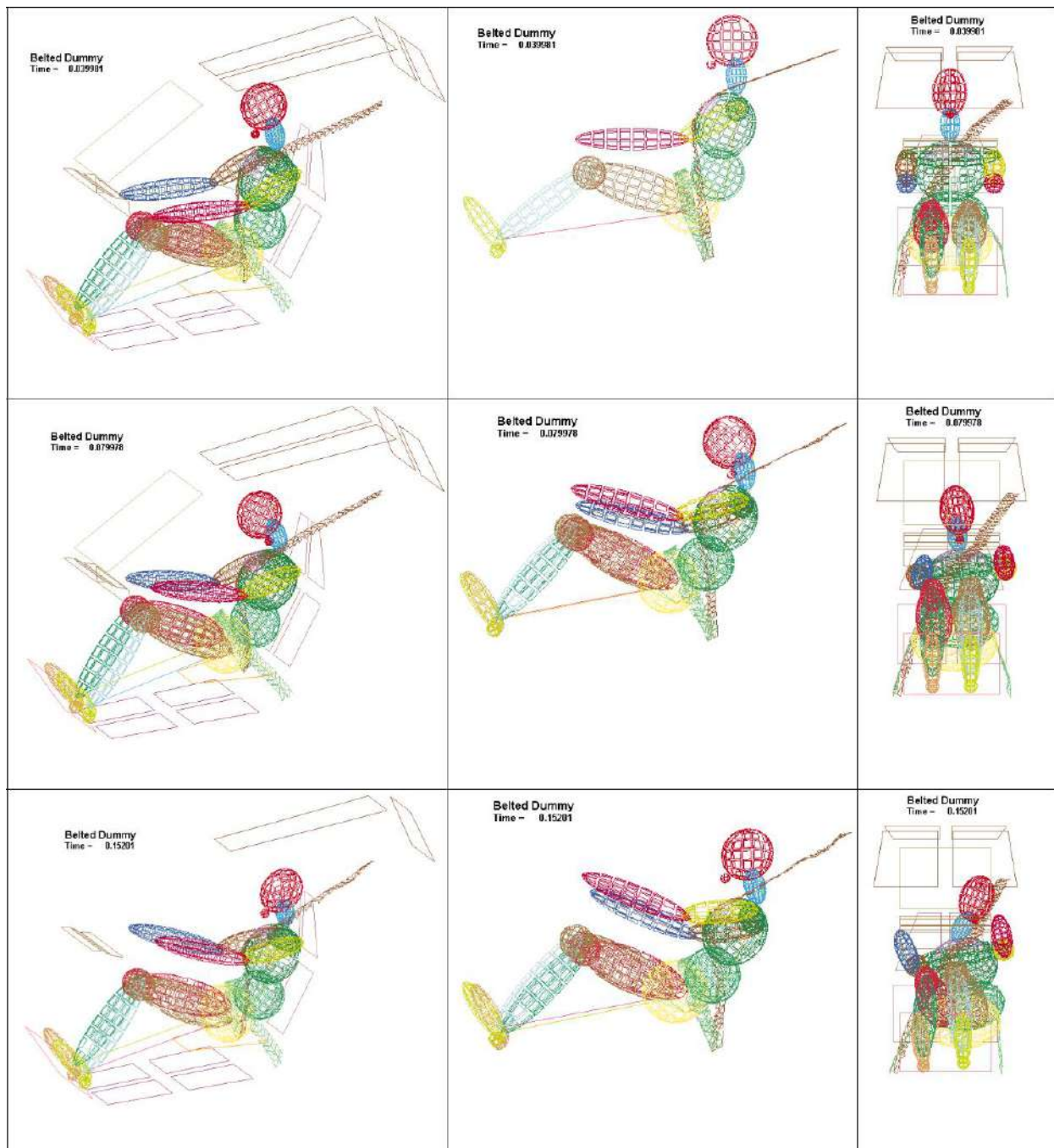
### V.3.1.2. Cinématique des mouvements dans une collision frontale

Les instantanés de simulation pour un conducteur adulte, maintenu avec une ceinture de sécurité à trois points sont illustrés par la (fig.V.12). Nous pouvons constater clairement, qu'après 40 ms de choc, le conducteur maintenu avec la ceinture de sécurité est initialement en position centrale. Il a commencé à se déplacer, petit à petit vers l'avant, la tête un peu penchée. Puis après 80 ms de choc, l'usager glisse un peu plus vers l'avant, avec la tête qui se penche un peu plus dans le sens du mouvement du véhicule. Ensuite, le corps du conducteur commence à prendre une position hors norme, c-à-d, une position décentrée avec un corps qui bascule vers sa gauche ; en raison de la nature asymétrique de la ceinture à trois points. Enfin, après plus de 152 ms, l'épaule et le thorax ont un mouvement vers l'arrière, avec un corps qui vire un peu plus vers sa gauche. Le mouvement général du conducteur, fourni par nos simulations numériques, est très proche de la réalité, voire très similaire à ceux déjà présentés dans plusieurs travaux scientifiques [21, 26, 39-45,52,56].

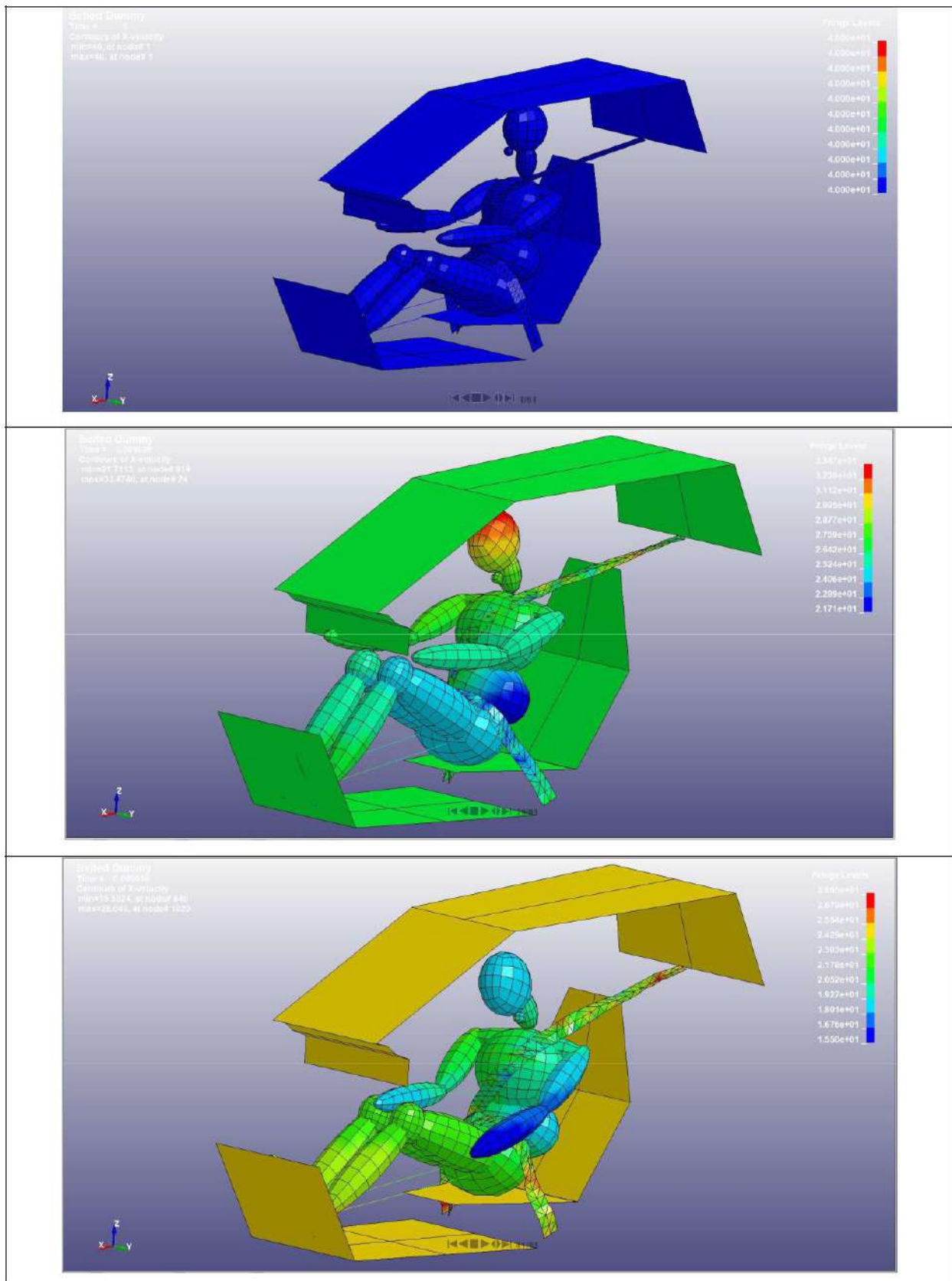
### V.3.1.3. Effet de la vitesse d'impact sur le comportement dynamique du conducteur

Les résultats de la simulation numérique d'une collision frontale, avec un obstacle rigide indéformable, obtenus pour trois différentes vitesses d'impact sont présentés sur les figures V.13 à V.15. De plus, nous pouvons constater que les mouvements du corps du conducteur présentent une allure globale identique, seul l'angle d'inclinaison de la tête, du buste et l'angle de rotation de la partie supérieure du corps diffère. Ils sont proportionnellement sensibles à la valeur de la vitesse d'impact. A titre indicatif, pour une vitesse d'un impact de 90 km/h, l'angle d'inclinaison de la tête et du buste égale à 33° et 37°, respectivement. Ce phénomène s'observe naturellement dans la conduite réelle, lors d'une collision frontale brusque. A l'instant de l'impact, il s'accompagne d'un décollement vers l'avant du buste du conducteur par rapport au

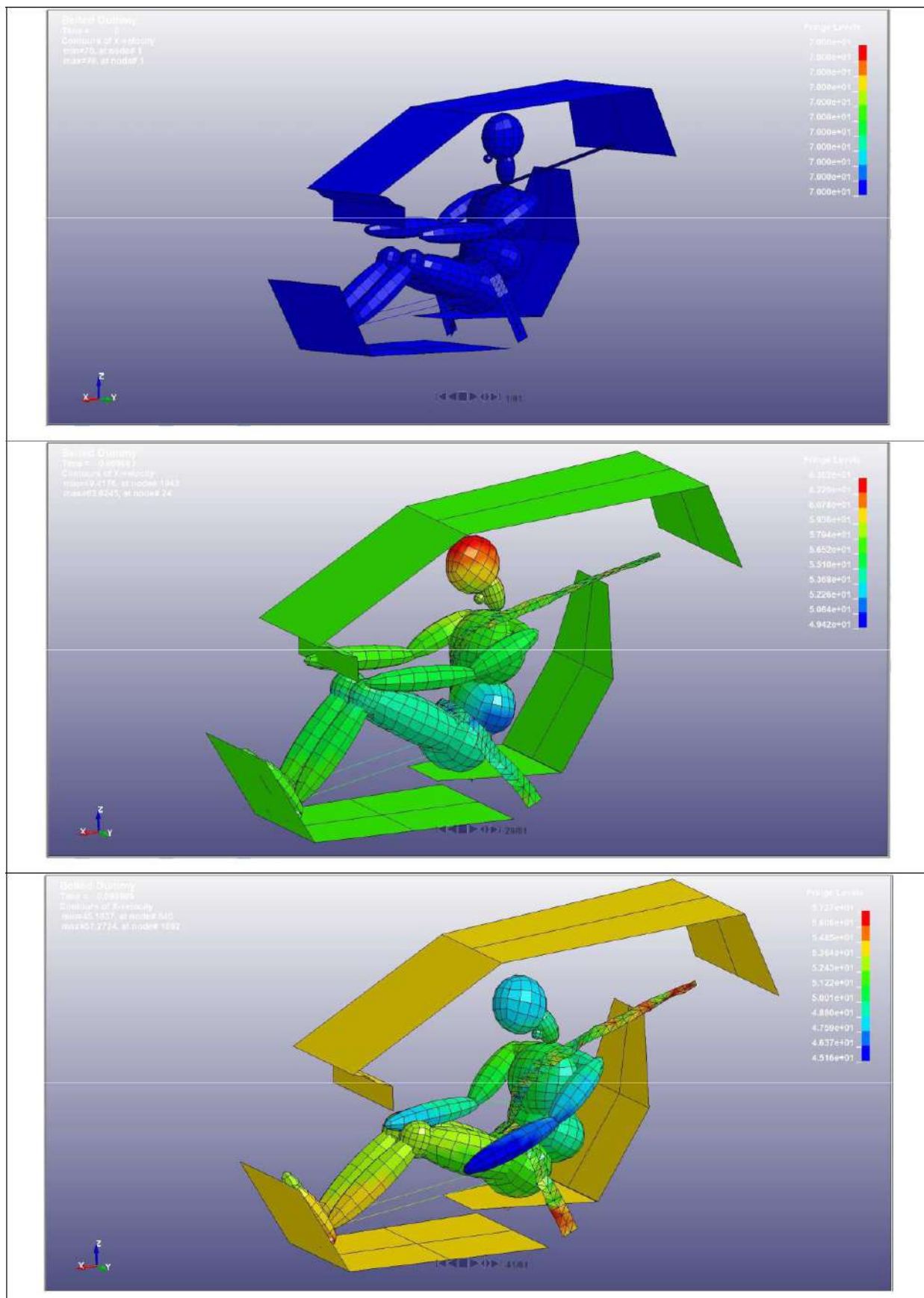
dossier de siège. Ceci est dû principalement à l'inertie du véhicule, au moment de l'impact et la présence de la ceinture de sécurité, qui agit vers l'arrière durant cette phase. Enfin, l'analyse a montré que dans les mêmes conditions, le comportement dynamique du conducteur est complètement différent, pour le cas d'un usager vulnérable ou mal ceinturé. Cette étude sera présentée en détail dans les sections suivantes (Figs V.16 à V.18).



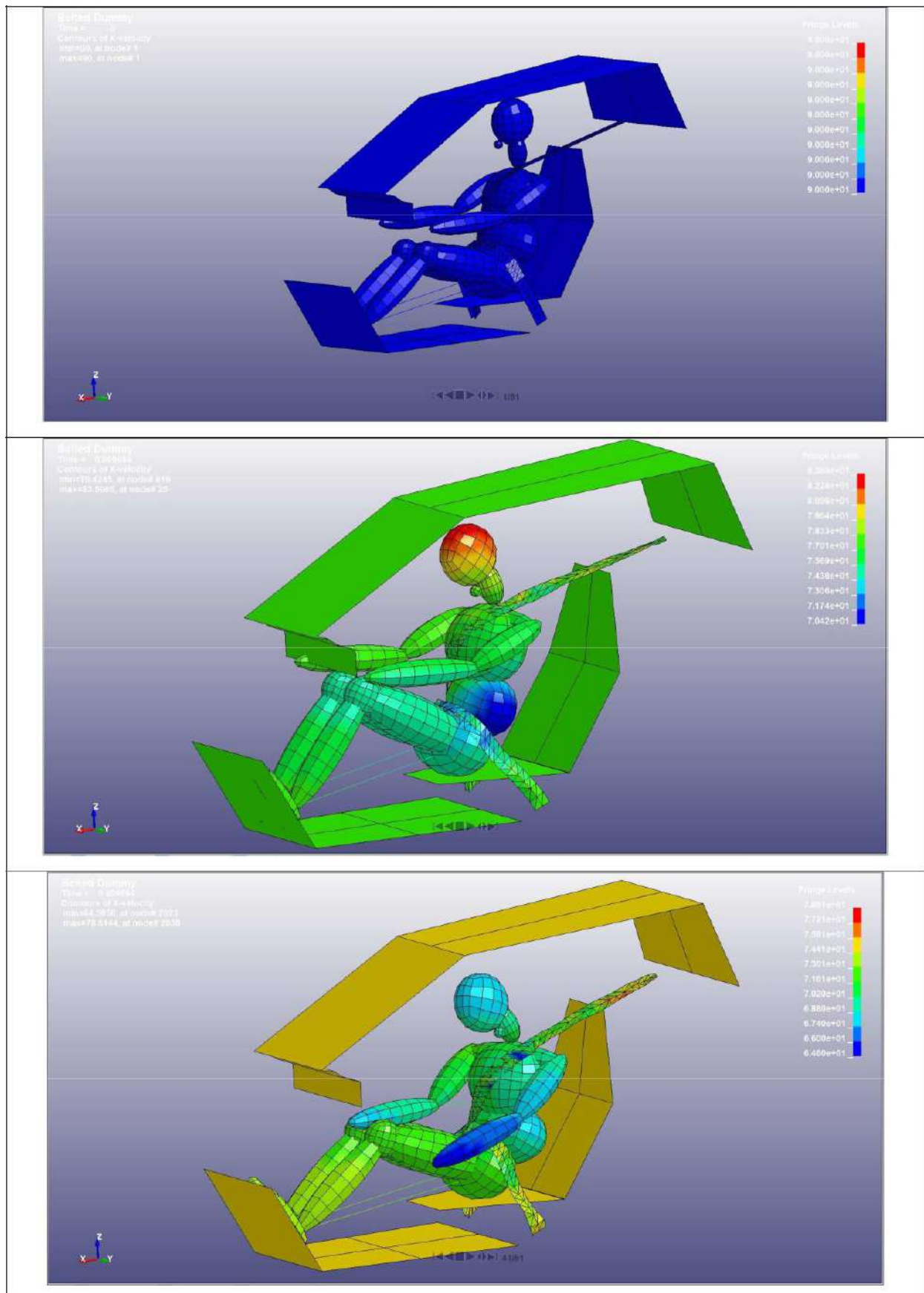
**Figure V.12.** Cinématique d'un conducteur adulte, obtenue suite à une collision frontale à 90 km/h.



**Figure V.13.** Comportement dynamique d'un conducteur adulte, obtenu suite à une collision frontale à 40 km/h.



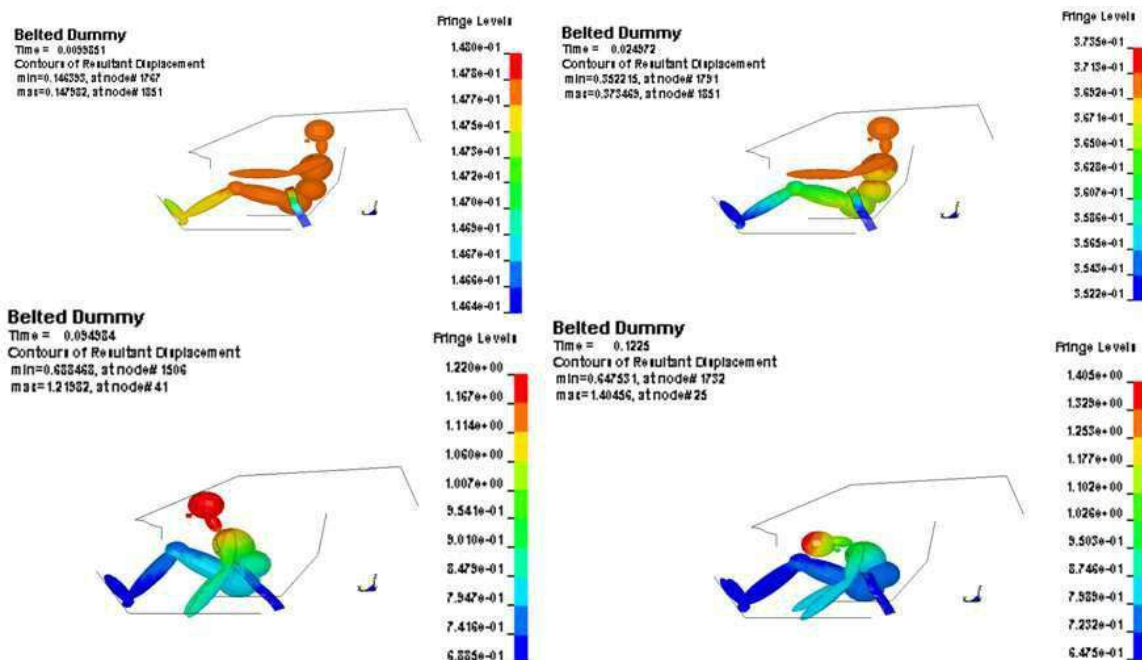
**Figure V.14.** Comportement dynamique d'un conducteur adulte, obtenu suite à une collision frontale à 70 km/h.



**Figure V.15.** Comportement dynamique d'un conducteur adulte, obtenu suite à une collision frontale à 90 km/h.

### V.3.2. Comportement dynamique d'un conducteur partiellement ceinturé

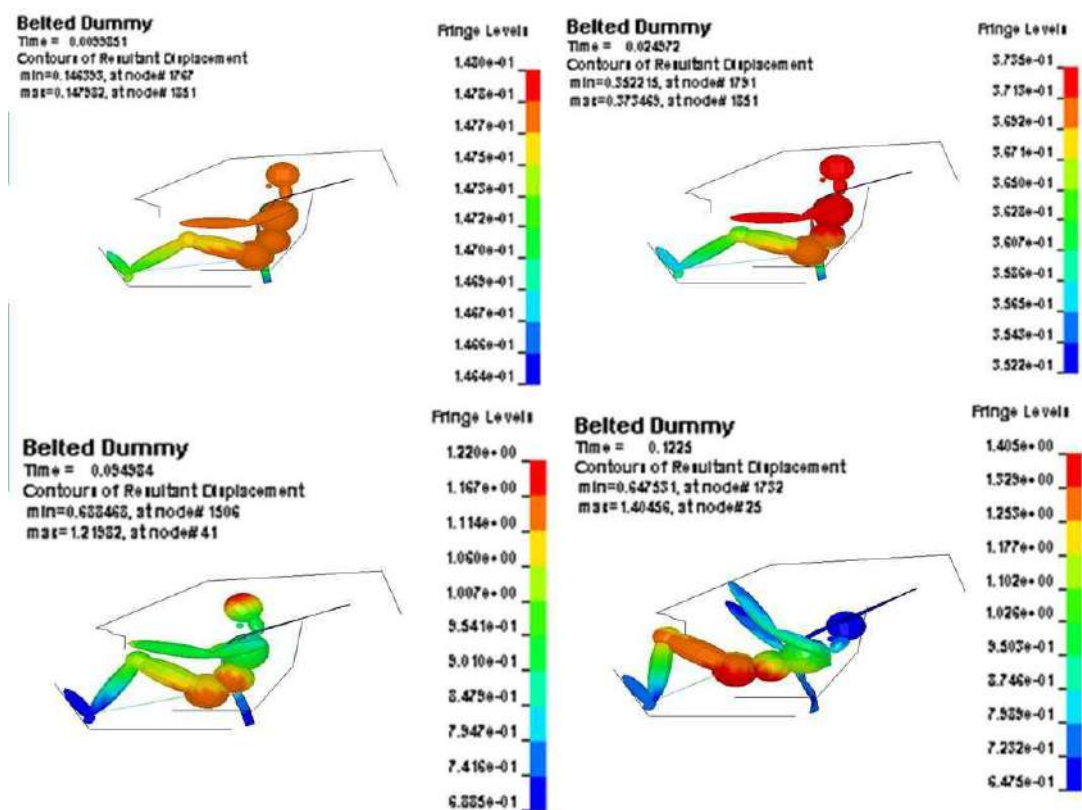
Les résultats de la simulation numérique du comportement dynamique du conducteur, maintenu avec une ceinture sous-abdominale, dans un choc frontal sont présentés sur la figure V.16. Dans cette analyse, il a été constaté principalement que la tête du conducteur se penche, très en avant, jusqu'à ce qu'elle touche dangereusement le pare-brise. Ce risque se traduit par une accélération inquiétante de la tête vers l'avant, tandis que le bassin est resté parfaitement maintenu, voir comprimé en arrière ; par la présence de la ceinture sous-abdominale, au niveau du bassin durant toute la phase du choc (Fig.V.16). À environ 90 ms, nous pouvons observer clairement, que la tête du conducteur touche violemment les genoux, lorsque l'usager est tiré vers l'arrière par la ceinture sous-abdominale. Par conséquent, nous pouvons conclure à ce stade, que l'utilisation d'une ceinture sous-abdominale est évidente, seule elle n'assure malheureusement pas la protection du conducteur du véhicule. Sa présence limite seulement certains mouvements incontrôlables à l'intérieur de l'habitacle, lors d'un accident de la route.



**Figure V.16.** Comportement dynamique d'un conducteur adulte, maintenu avec une ceinture sous-abdominale, durant un choc frontal à 90 km/h.

La figure V.17 présente les résultats de la simulation numérique du comportement dynamique d'un conducteur maintenu, cette fois-ci, avec une ceinture thoracique, lors d'une collision frontale, à une vitesse d'impact de 90 km/h. Nous pouvons constater par ailleurs que pendant les 25 premières ms, l'occupant prend une position stable

avec un faible glissement vers l'avant. À environ 95 ms, le conducteur est finalement contraint au niveau du thorax par la ceinture thoracique, qui maintient le haut du corps en contact avec le siège accompagné d'un glissement, plus important du bassin, dans le sens du roulement. Puis, à environ 123 ms, le conducteur glisse dangereusement sous la ceinture thoracique, jusqu'à ce que ses jambes heurtent violemment le tableau de bord. Ceci, risque de causer des plaies, mais aussi, des fractures des fémurs par flambage ; dû au choc sur le volant ou, surtout contre le tableau du bord. Il a été indiqué, dans plusieurs travaux scientifiques, que les traumatismes de la ceinture sont plus graves, si cette dernière n'est pas bien ajustée [21, 26, 44-49].



**Figure V.17** Comportement dynamique d'un conducteur adulte, maintenu avec une ceinture thoracique durant un choc frontal à 90km/h.

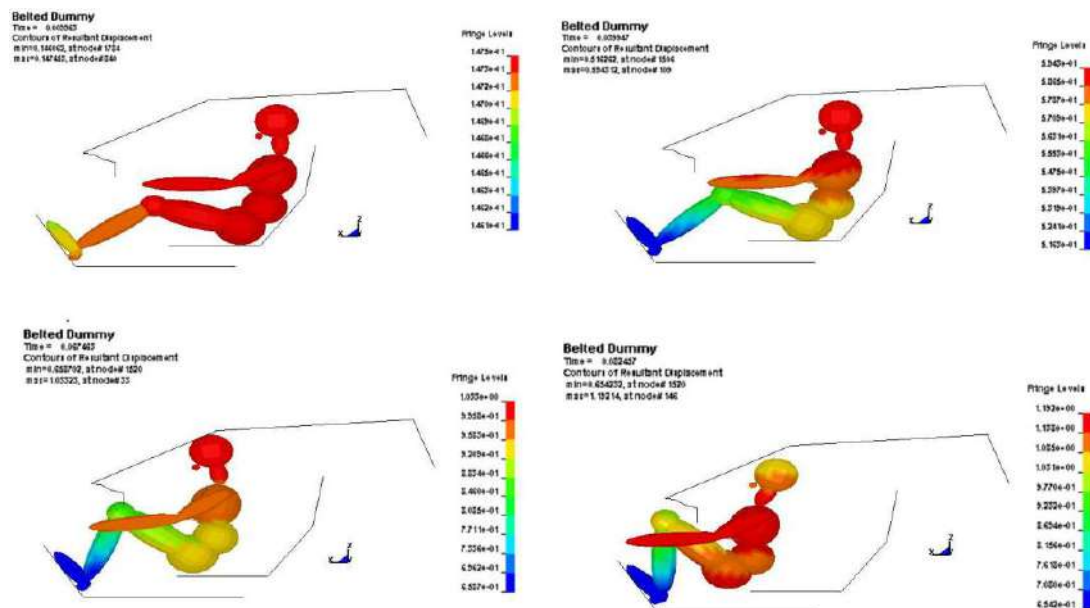
Par ailleurs, nous avons remarqué que la rotation du corps vers l'avant, pour un conducteur mal ceinturé, soit avec l'utilisation d'une ceinture sous-abdominale (Fig.V.16) ou thoracique (Fig.V.17) est plus importante, par rapport à un conducteur, maintenu avec une ceinture à trois points (Fig.V.9) ; dans le cas d'un choc frontal correspondant à un arrêt brusque du véhicule. Ceci est dû essentiellement à la complémentarité des deux parties de la ceinture de sécurité (abdominale et thoracique), qui minimisent le mouvement du corps vers l'avant. Il est donc très



évident, que la ceinture de sécurité, peut sauver la vie de conducteur, ainsi que celle des autres passagers, à bord d'une voiture touristique.

### V.3.3. Comportement dynamique d'un usager vulnérable non ceinturé

Dans cette section, nous étudions le comportement dynamique d'un conducteur non ceinturé, lors d'une collision frontale. Il a été remarquablement constaté que dans une séquence de conduite sans ceinture de sécurité ; le conducteur du véhicule peut dangereusement interagir avec l'habitacle intérieur du véhicule, en se projetant brutalement par inertie vers l'avant, lors d'un choc frontal. Les résultats de la simulation numérique obtenus, par le modèle développé, montrent clairement la dangerosité de conduire sans ceinture de sécurité. Nous pouvons observer que la tête du conducteur heurte violemment le pare-brise, et le corps s'écrase sur le tableau du bord du véhicule ; (Fig.V.18). Dans cette situation, il est évident que le conducteur seul, sans sécurité à l'intérieur de l'habitacle, devient très vulnérable, même à faibles vitesses d'impact. L'utilisateur peut donc être éjecté, à tout moment du véhicule, ce qui peut aggraver encore ses blessures.



**Figure V.18** Comportement dynamique d'un conducteur adulte non ceinturé, pendant une collision à 90 km/h.

En effet, la ceinture de sécurité à trois points, contraint l'utilisateur dans le siège, de sorte que le corps ne touche aucun élément du tableau de bord.

Par ailleurs, le non-port de la ceinture de sécurité transforme donc ; le conducteur en de véritable projectile qui peut être très dangereux, lors d'un choc ou une collision, avec une autre voiture. Sur la base de ces résultats, nous pouvons conclure que l'utilisation de la ceinture de sécurité est essentielle, voire obligatoire durant un trajet. Les résultats obtenus, dans cette section, concordent bien avec ceux de la littérature [26,45,48,49-51]. Le modèle développé a donné des résultats très encourageants, signe d'une approche fiable et robuste ; pour étudier d'autres problèmes plus complexes du comportement dynamique d'un conducteur, lors d'un accident de la route.

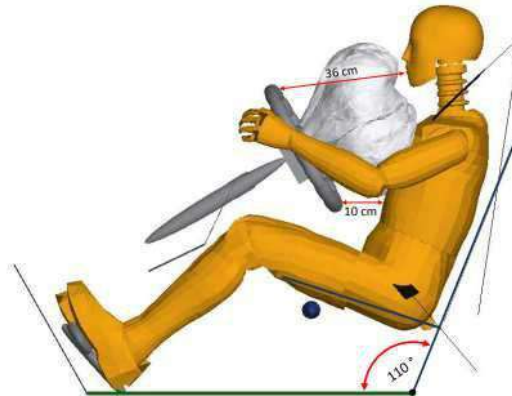
### **V.3.4. Comportement dynamique d'un conducteur ceinturé lors d'une collision frontale avec déploiement d'airbag**

#### **V.3.4.1. Mise en situation**

Dans la dernière étape de notre développement numérique, un airbag a été intégré dans notre modèle EF. L'objectif est de simuler, cette fois-ci, un choc frontal d'un véhicule touristique, conduit par un usager adulte de sexe masculin, et maintenu en position assise, avec une ceinture de sécurité à trois points. La difficulté principale est de synchroniser le déploiement de l'airbag, avec le comportement dynamique de l'usager, lors d'un choc frontal, afin d'obtenir un comportement dynamique du conducteur le plus réaliste possible et ; déterminer les fonctions cinématiques les plus représentatives, d'un accident de la route dans sa globalité. Si la démarche peut être similaire que les études précédentes, elle sera en revanche beaucoup plus complexe à mettre en œuvre.

Un seul modèle d'airbag des trois constructeurs (R, P, VW), présenté et étudié, dans le chapitre IV, a été utilisé dans ce chapitre ; pour réaliser une analyse dynamique d'une collision frontale avec déploiement de l'airbag. Certaines valeurs obtenues, durant cette analyse, seront utilisées comme référence pour recalibrer notre modèle numérique. Dans cette étude, un modèle standard d'airbag conducteur de grande série de volume ; de 45 litres équipant un véhicule Renault Clio 3 a été utilisé. La distance entre le corps du conducteur et le volant, a été ajustée pour correspondre à 36 cm, une position obtenue, lors d'un test d'écrasement des airbags par un impacteur rigide indéformable à 50 km/h (chapitre IV). Par ailleurs, la simulation du choc frontal, avec déploiement d'airbag, a demandé en plus de quelques modifications et ajustements, sur le modèle de base présenté ci-dessus. Outre la modélisation du conducteur d'un véhicule ceinturé, il a notamment fallu bien repositionner l'airbag à

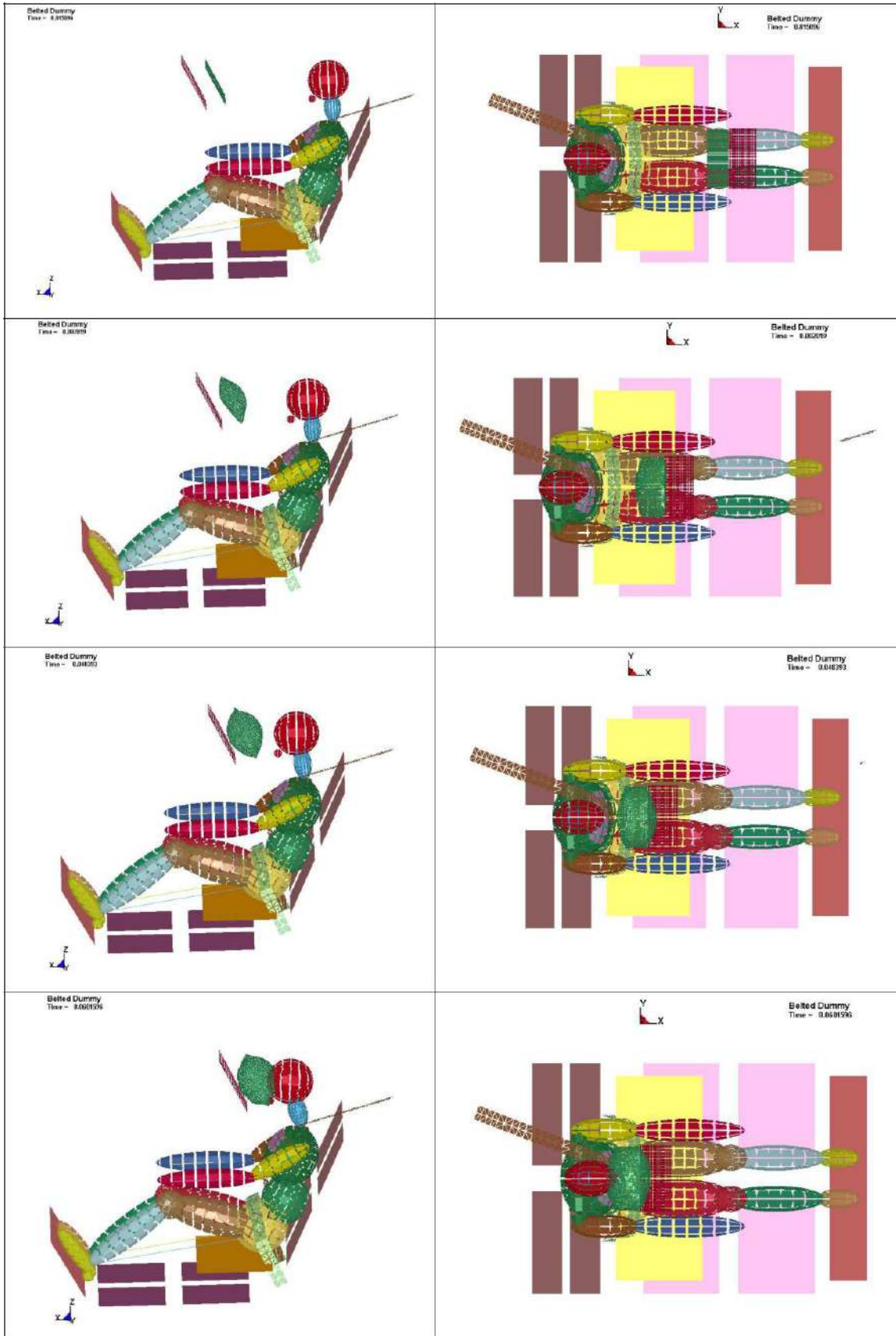
l'intérieur de l'habitacle, à la bonne distance puis l'incliner, face au conducteur (Fig.V.19).



**Figure V.19.** Schéma descriptif d'un conducteur adulte, en position assise, face un airbag [43].

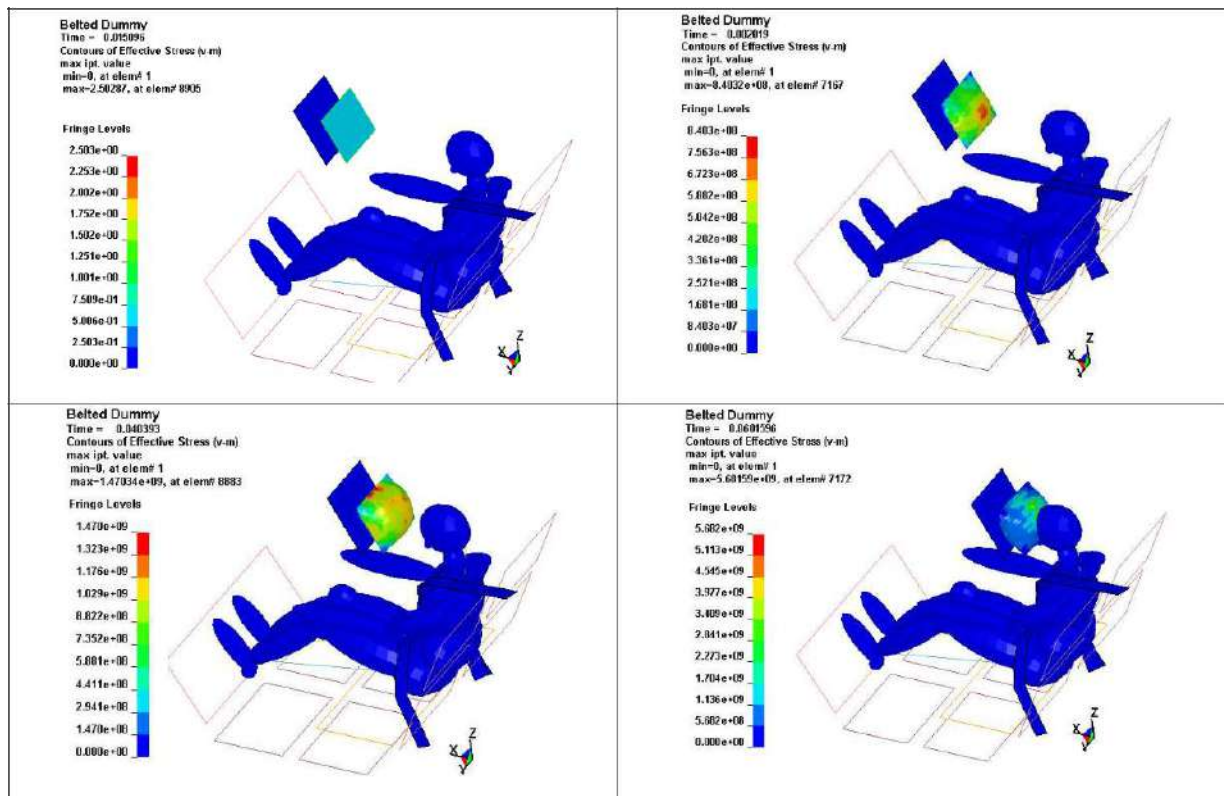
#### **V.3.4.2. Résultats numériques et discussions**

La figure V.20 illustre le comportement dynamique d'un jeune conducteur parfaitement ceinturé, lors d'un choc frontal à 50 km/h, avec déploiement de l'airbag. Un soin tout particulier a été pris, pour bien synchroniser les mouvements usager/airbag et bien définir leurs zones de contact, en tenant compte de la faible rigidité d'une structure gonflable, comme l'airbag. Nous pouvons voir clairement, qu'après 15 ms de choc, le conducteur est encore en position assise sur son siège, avec la tête qui se penche un peu vers l'avant. Puis, l'airbag se déploie, après 20 ms de choc, alors que le conducteur glisse dans son siège, un peu vers l'avant. Au-delà de 40 ms, l'airbag est complètement gonflé, tandis que la ceinture de sécurité est appliquée fermement contre le corps du conducteur. Elle est dans un état tendu, avec une énergie du choc, en partie bien absorbée. Au-delà de 60 ms, le conducteur se déplace un peu plus en avant et, sa tête heurte l'airbag, en fin de phase de déploiement. Il est intéressant de signaler, qu'après avoir réalisé plusieurs tentatives numériques, une bonne synchronisation a été obtenue, entre la position du conducteur, à l'intérieur de l'habitacle et le moment de déclenchement de l'airbag. Elle se traduit par un bon contact entre le front et l'airbag. Cette cinématique est très proche de la réalité, comme cela est bien relaté par certains auteurs [26,43,45-54]. Les résultats obtenus, dans ce cas, sont très satisfaisants en attendant la confrontation avec les données issues des tests expérimentaux ; afin de confirmer la fiabilité de notre modèle.



**Figure V.20.** Comportement dynamique du conducteur, lors d'un choc frontal, avec déploiement de l'airbag (vitesse d'impact = 50 km/h).

Les isovaleurs de contraintes de Von-Mises, lors d'un choc frontal, sont illustrées sur la figure V.21. Les valeurs maximales des contraintes de Von-Mises ont été enregistrées, au niveau de l'airbag, durant les 40 premières millisecondes de la collision. C'est le temps qu'il faut pour un déploiement complet de l'airbag. Ensuite, ces valeurs évoluent au contact du front du conducteur sur l'airbag. Par ailleurs, nous pouvons constater d'une part, que le conducteur du véhicule en mouvement décélérant brutalement, lors d'un choc, n'est pas projeté contre l'habitacle, par son inertie due essentiellement à la présence de la ceinture de sécurité à trois points. Et d'autre part, le risque de collision et de blessures en présence, à la fois, de la ceinture de sécurité et de l'airbag est en effet faible, d'après les résultats obtenus.



**Figure V.21.** Isovaleurs des contraintes de Von-Mises, durant une collision à 50 km/h.

L'analyse numérique, présentée dans cette partie, nous a permis de voir que la mise de la ceinture de sécurité ; permet réellement d'assurer le maintien du conducteur sur le siège le long de l'accédant. Elle ne garantit pas la protection de la tête et donc le port de la ceinture de sécurité ; ne peut éviter les blessures graves, dans cette zone sensible du corps, comme les coups de fouet cervicaux associés aux collisions automatiques. C'est pour cette raison, que les airbags et coussin repose-tête sont devenus, de plus en plus, des éléments incontournables de la sécurité routière.

Ils complètent utilement la ceinture de sécurité, afin de protéger au mieux, tout le corps du conducteur et les passagers, qui circulent à bord d'un véhicule ; en cas d'accident de la route. Dans la partie suivante, une étude de validation expérimentale de quelques cas est présentée.

#### **V.4. Validation expérimentale**

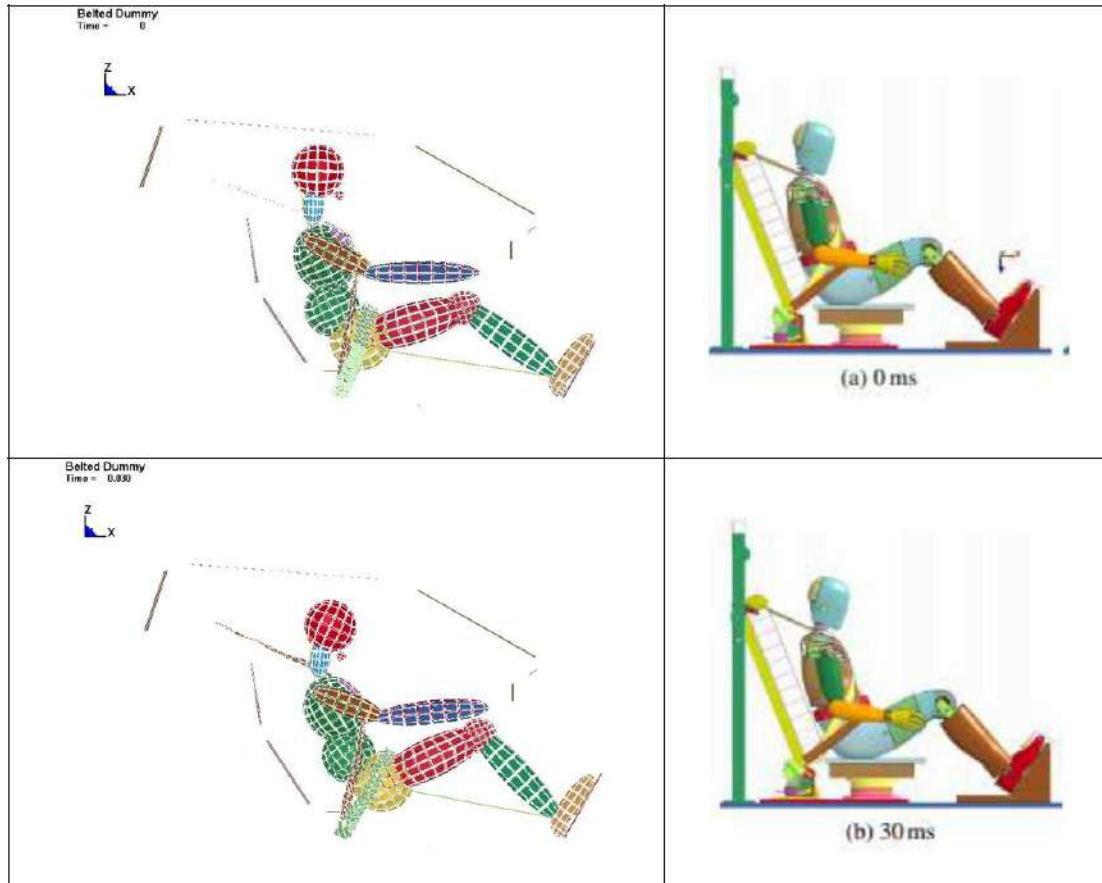
Cette partie consiste à présenter, une étude de validation expérimentale, du modèle multi-corps développé dans nos travaux ; en se limitant à une comparaison des instants cinématiques, obtenus grâce à nos simulations numériques, avec des essais expérimentaux, réalisés par des paires scientifiques [55,57]. L'idée est d'essayer de tester la capacité du modèle développé, à reproduire certains scénarios de crash-test, dans lequel, leur préparation est souvent complexe, très coûteuse et très lourds à mettre en place, de par l'instrumentation nécessaire à chaque test.

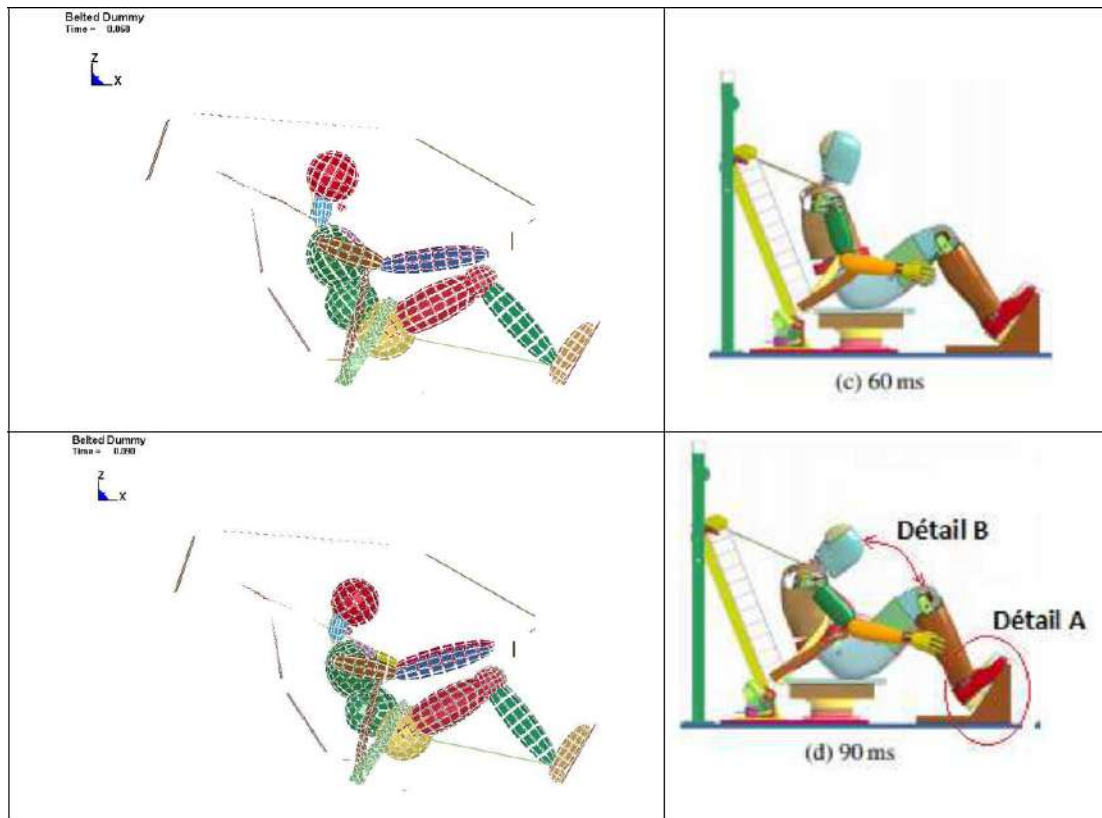
##### **V.4.1. Comportement dynamique d'un conducteur parfaitement ceinturé**

Les réponses cinématiques du mannequin, doivent bien s'accorder avec le test expérimental, pour garantir une dynamique cohérente. Les instantanés d'un test de collision, sur un traîneau réalisé par Desbats (2016), ont été utilisées pour effectuer une première étude comparative, à quatre instants différents, avec nos résultats de simulations numériques. Les résultats de la (fig.V.22) permettent de montrer, de façon générale ; le mouvement global et le comportement dynamique du conducteur, obtenu à l'aide de notre modèle 3D, pour une simulation typique effectuée à une vitesse d'impact égale à 50 km/h. Globalement, nous pouvons voir clairement, que la posture simulée du comportement dynamique du conducteur, est effectivement très proche de celle de l'essai [55]. D'un point de vue cinématique, nous observons aussi des différences notables, que nous pouvons l'attribuer au manque d'informations, sur quelques caractéristiques du mannequin utilisé, dans l'étude expérimentale et à la nature du contact entre le mannequin et l'assise (Taille, poids, type de polymère,...etc.). Cette différence est due aussi au manque d'informations sur la position exacte des mains et des bras et la distance entre la tête et les genoux, avant l'exécution du test. Ce qui y a permis d'observer visuellement les différences suivantes:

- Les pieds factices du mannequin ont perdu un contact partiel, avec la plaque d'appui, au cours de l'essai, tandis que les pieds de notre modèle sont restés en contact total, dans la simulation, à même après 90 ms (Fig V.22 - détail A).
- Le haut du corps du mannequin s'est plié plus en avant dans le test qu'en simulation (Fig V.22 - détail B).

Malgré l'inadéquation des mouvements de la main et des bras, la position de la tête et la posture du haut du corps étaient globalement cohérentes, avec celles observées dans le test. Outre les petits décalages, comme le montre la figure V.22, le mouvement résultant de la tête prédite, par la simulation numérique, était bien conforme aux données visuelles du test réalisé par Desbats. Globalement, nous pouvons conclure que le modèle développé, dans notre étude, est capable de reproduire correctement certains scénarios [26, 55,56]. Plusieurs études ont démontré aussi, la complexité de ce problème, si nous nous intéressons en plus, au comportement des personnes en situation de conduite réelle ; et non plus en situation statique, comme cela est traité dans notre étude [54-57]. Sohr et al indiquent que des petites variations, dans la position du conducteur, peuvent entrainer de gros effets [58].



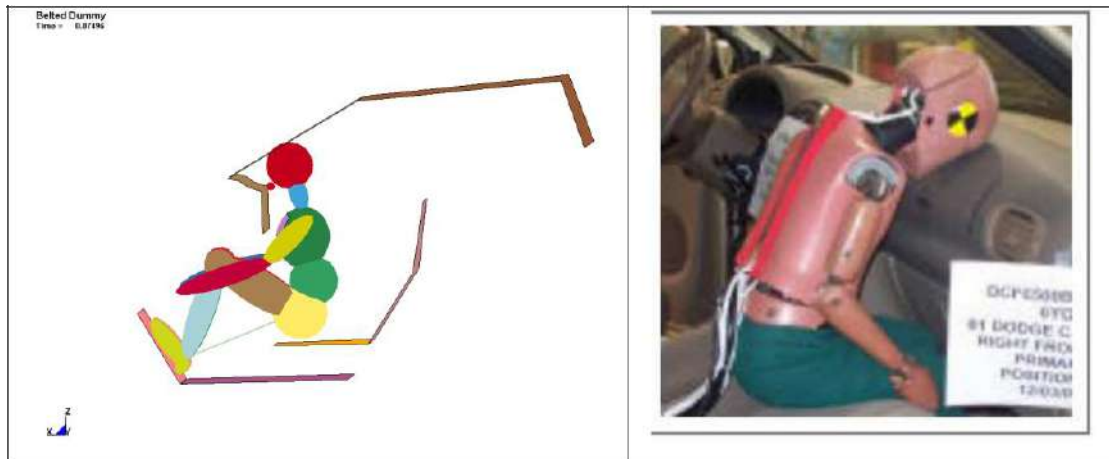


**Figure V.22.** Comparaison qualitative des deux cinématiques [55].

#### V.4.2. Passager non-ceinturé

Une deuxième étude comparative a été effectuée, cette fois-ci, avec l'étude expérimentale de Prasad dont laquelle l'auteur a réalisé des essais de collision à une vitesse d'impact de 50 km/h ; sur un mannequin non ceinturé et en position très avancée par rapport au tableau du bord. Le comportement dynamique simulé, a été comparé au comportement du mannequin, dans les circonstances proches du test (Fig. V.23). Les premiers résultats obtenus nous révèlent une grande ressemblance des allures, dans le comportement dynamique du passager, dans les deux cas, mesurée par Prasad et simulée, notamment sur la position finale de la tête, du thorax et les bras. Nous avons aussi constaté que le test expérimental provoque moins de déplacement, et moins de rotation du bassin ; que ceux obtenus par notre modèle numérique. Ceci est dû essentiellement au manque d'informations sur le type de contact ; entre le mannequin avec pantalon et l'assise du véhicule. Au final, cette étude à montrer que boucler sa ceinture de sécurité, est un geste qui sauve des vies.





**Figure V.23.** Comparaison des cinématiques, de l'essai expérimental et la simulation numérique [57].

## V.5. Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, les différentes étapes de développement d'un modèle éléments finis, pour simuler une collision frontale, ont été présentées. Les principes sur lesquels notre modèle est construit ont été exposés. L'analyse implicite a été réalisée, à l'aide du code éléments finis LsDyna. Dans un premier temps, plusieurs scénarios ont été proposés, pour étudier le comportement dynamique d'un conducteur adulte de sexe masculin, lors d'une collision frontale. Les résultats obtenus sont très satisfaisants. Pour le cas d'un conducteur parfaitement maintenu ; avec une ceinture à trois points, l'usager prend au finale une position décentrée ; avec un corps qui bascule vers sa gauche ; en raison de la nature asymétrique de la ceinture à trois points. Ceci n'a pas empêché la ceinture d'assurer le maintien en place du conducteur, en position assise, ce qui augmente généralement sa sécurité à l'intérieur du véhicule. La seule partie du corps qui était vulnérable, est la tête du conducteur, qui risque de subir le coup du lapin. Par ailleurs, pour le cas d'un conducteur maintenu, soit avec une ceinture sous-abdominale, ou bien thoracique, il a été constaté que le mouvement général du conducteur ; fourni par les simulations numériques, présente des situations dangereuses, pour le conducteur. En effet, ce dernier, risque des blessures graves, c-à-d, soit sa tête peut heurter le pare-brise puis les genoux ou bien, il peut glisser dangereusement sous la ceinture thoracique ; jusqu'à ce que ses jambes heurtent violemment le tableau de bord. Par conséquent, nous pouvons conclure que, l'utilisation juste de la ceinture sous-abdominale ou thoracique, n'assure malheureusement pas la protection du conducteur du véhicule. Sa présence limite seulement certains mouvements incontrôlables, à l'intérieur de l'habitacle, lors d'un accident de la route.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à étudier le comportement dynamique globale d'un conducteur, parfaitement ceinturé, lors d'une collision frontale avec déploiement de l'airbag. Les résultats obtenus, nous ont permis de confirmer que, grâce à la ceinture de sécurité à trois points ; le conducteur n'est pas projeté contre l'habitacle par son inertie, après un choc frontal. En plus, le déploiement correct de l'airbag, a permis effectivement de protéger la tête du conducteur qui circule à bord d'un véhicule, en cas d'accident de la route. Il est donc prouvé que le risque de blessures en présence, à la fois de la ceinture de sécurité et de l'airbag, est en effet très faible. Enfin, dans la dernière partie de ce chapitre, une tentative de validation expérimentale a été présentée. Globalement, nous avons pu observer que la posture simulée du comportement dynamique du conducteur, dans les deux cas utilisés, est réellement très proche des essais expérimentaux. La fiabilité du modèle à reproduire certains scénarios, est prouvée, grâce cette étude comparative.

## Références

1. K. Opiela, S. Kan and D. Marzougui, Development & Validation of a Finite Element Model for the 2010 Toyota Yaris Passenger Sedan, the National Crash Analysis Center of the George Washington University(GWU), 2011.
2. A. O. Atahan, Vehicle Crash Test Simulation of Roadside Hardware Using LSDYNA: A Literature Review." International Journal of heavy vehicle systems Vol. 17, pp. 52-75, 2010.
3. H. J. Mertz, D. J. Dalmotas, Effects of shoulder belt limit forces on adult thoracic protection in frontal collisions., Stapp Car Crash Journal, Vol. 51, pp. 361-380, 2007.
4. Y. Kitagawa, T. Yasuki, J. Hasegawa, Research study on neck injury lessening with active head restraint using human body FE model., Traffic Inj Prev., Vol. 9, pp. 574-582, 2008.
5. Y. Kitagawa, J. Hasegawa, T. Yasuki, M. Iwamoto, K. Miki, A Study of Knee Joint Kinematics and Mechanics using a Human FE Model., Stapp Car Crash J., Vol. 49, pp. 117-131, 2005.
6. C. Du, Z. Mo, S. Tian, L. Wang, J. Fan, S. Liu, Y. Fan Biomechanical investigation of thoracolumbar spine in different postures during ejection using a combined finite element and multi-body approach Int. J. Numer. Method Biomed. Eng., Vol. 30, pp. 1121-1131, 2015.
7. J. G. Snedeker, M. H. Muser, F. H. Walz, Assessment of pelvis and upper leg injury risk in car-pedestrian collisions: comparison of accident statistics, impactor tests and a human body finite element model, Stapp Car Crash J., Vol. 47, pp. 437-457, 2003.
8. T. Teng, C. Liang, T. Tran, Development and validation of a finite element model for road safety barrier impact tests, Simul. Trans. Soc. Model. Simul. Int., Vol. 92, pp. 565-578, 2016.
9. D. Gierczycka, D. S. Cronin, Occupant thorax response variations due to arm position and restraint systems in side impact crash scenarios, Accident Analysis & Prevention, Vol. 106, pp. 173-180, 2017.
10. M., Arnoux, P. J., Serre, T., Bidal, S., Kang, H. S., Thollon, L., Cavallero, C., K. Kayvantash, and C. Brunet, A Human Model for Road Safety: From Geometrical Acquisition to Model Validation with Radioss, Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, Vol. 6, pp. 263-273, 2003.
11. A. Chawla, S. Mukherjee, D. Mohan, D. Bose, P. Rawat, T. Nakatani, M. Sakurai, FE simulations of motorcycle-car frontal crashes, validations and observations, Int. J. Crashworthiness, Vol. 10, pp. 319-326, 2005.
12. T. Serre, M. Llari, Numerical analysis of the impact between a PTW rider and a Car in different accident configuration IFMBE Proc., Vol. 31, 2010.
13. J.K. Yang, P. Lövsund, C. Cavallero, J. Bonnoit A human-body 3D mathematical model for simulation of car-pedestrian impacts, J. Crash Prev. Inj. Control, Vol. 2, pp. 131-149, 2000.
14. L. Thollon, Y. Godio, S. Bidal, C. Brunet Evaluation of a new security system to reduce thoracic injuries in case of motorcycle accidents, Int. J. Crashworthiness, Vol. 15, pp. 191-199, 2010.
15. Z.H. Zulkipli, A.M. Abdul Rahmat, S.A. Mohd Faudzi, N.F. Paiman, S.V. Wong, A. Hassan Motorcycle-related spinal injury: crash characteristics, Accid. Anal. Prev., Vol. 49, pp. 237-244, 2012.
16. Y. Wang, Z. Bai, L. Cao, M.P. Reed, K. Fischer, A. Adler, J. Hu A simulation study on the efficacy of advanced belt restraints to mitigate the effects of obesity for rear-seat occupant protection in frontal crashes Traffic Inj. Prev., Vol. 16, pp. 75-83, 2015.

17. J. Zheng, L. Tang, J. Hu, A Numerical Investigation of Risk Factors Affecting Lumbar Spine Injuries using a Detailed Lumbar Model Applied Bionics and Biomechanics, 2018, [10.1155/2018/8626102](https://doi.org/10.1155/2018/8626102)
18. M.A. Munjin, J.J. Zamorano, B. Marré, F. Ilabaca, V. Ballesteros, C. Martínez, R. Yurac, A. Urzúa, M. Lecaros, J. Fleiderman Speed hump spine fractures: injury mechanism and case series, *J. Spinal Disord. Tech.*, Vol. 24, pp. 386-389, 2011.
19. F.A. Pintar, N. Yoganandan, D.J. Maiman, M. Scarborough, R.W. Rudd Thoracolumbar spine fractures in frontal impact crashes, *Ann. Adv. Automot. Med.*, Vol. 56, pp. 277-283, 2012.
20. L. Tang, J.H. Liu Safety analysis of belted occupant in reclining seat, *Int. J. Veh. Des.*, Vol. 60, pp. 39-56, 2012.
21. T. Kapoor, W. Altenhof, A. Snowdon, A. Howard, J. Rasico, F. Zhu, D. Baggio, A numerical investigation into the effect of CRS misuse on the injury potential of children in frontal and side impact crashes, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 43, pp. 1438-1450, 2011.
22. A. Soni and P. Beillas, Modelling hollow organs for impact conditions: a simplified case study, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, Vol.18. pp. 730-739, 2015.
23. S. W. Kirkpatrick, Development and validation of high fidelity vehicle crash simulation models, *SAE Trans*, Vol. 109, pp. 872-881, 2000.
24. Borovinsek M., Vasenjak M., Ulbin M., Ren Z., Simulation of crash tests for high containment levels of road safety barriers, *Eng Fail Anal*, Vol. 14, pp. 1711-1718, 2007.
25. Wang Q., Fang H., Li N., Weggel D.C., Wen G., An efficient FE model of slender members for crash analysis of cable barriers, *Eng Struct*, Vol. 52, pp. 240-256, 2013.
26. N. Li, H. Fang, C. Zhang, M. Gutowski, E. Palta, Q. Wang, A numerical study of occupant responses and injuries in vehicular crashes into roadside barriers based on finite element simulations, *Advances in Engineering Software*, Vol. 90, pp. 22-40, 2015.
27. A. Nouredine, A. Eskandarian, K. Digges, Computer modeling and validation of a hybrid III dummy for crashworthiness simulation, *Math Comput Modell*, Vol. 35, pp. 885-893, 2002.
28. Z. Ben Azouz, M. Rioux, C. Shu, and R. Lepage. "Characterizing human shape variation using 3D anthropometric data". *The Visual Computer*, Vol. 22, pp. 302-314, 2006.
29. M. A. Manary, C. A. C. Flannagan, M. P. Reed, and L. W. Schneider, Predicting proximity of driver head and thorax to the steering wheel, *ESV*, Vol. 98, pp. 1-11, 1998.
30. K.-U. Schmitt, P. F. Niederer, M. H. Muser, and F. Walz. *Methods in Trauma-Biomechanics : Accidental injury in traffic and sports*, 2007.
31. J. Halgrin, Influence des paramètres architecturaux sur le comportement mécanique de l'os trabéculaire, Thèse soutenue à l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis, 2009.
32. Y. H. Choi, J. S. Sah, B. Lee, S. H. Cho, J. S. Kang, S. M. Mun, I. Lee, and J. Lee, Experimental and numerical studies of muscular activations of bracing occupant, *esv.*, Vol. 05, pp. 01-39, 2005.
33. S. Ejima, Y. Zama, K. Ono, K. Kaneoka, I. Shiina, and H. Asada, Prediction of pre-impact occupant kinematic behavior based on the muscle activity during frontal collision, *esv.*, 2009.
34. M. Hetier and X. Wang, Parametric posture prediction module Methodology for development of a predictive driver's position system in real time, *Aporsys.*, Vol. 5, 2008.
35. F. Bella, Driving simulator for speed research on two-lane rural roads, *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 40, pp. 1078-1087, 2008.

36. Z. Ben Azouz, M. Rioux, C. Shu, and R. Lepage, Characterizing human shape variation using 3D anthropometric data, *The Visual Computer*, Vol. 22, pp. 302-314, 2006.
37. D. Bendjaballah, A. Bouchoucha, M. L. Sahli, J.-C. Gelin, Numerical modelling and experimental analysis of the passenger side airbag deployment in out-of-position, *International Journal of Crashworthiness*, pp. 1-14, 2017
38. D. Bendjaballah, A. Bouchoucha, M. L. Sahli, J.-C. Gelin, Numerical analysis of side airbags deployment in out-of-position situations, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, Vol. 12, pp. 1-12, 2017
39. B. B. Munyazikwiye, D. Vysochinskiy, M. Khadyko, and K. G. Robbersmyr, Prediction of Vehicle Crashworthiness Parameters using Piecewise Lumped Parameters and Finite Element Models, *Designs*, Vol. 2, 2018 doi:10.3390/designs2040043
40. N. Asadina, A. Khalkhali, M. J. Saranjam, Sensitivity analysis and optimization for occupant safety in automotive frontal crash test, *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol.15, 2018, <http://dx.doi.org/10.1590/1679-78254666>
41. R. Jayakkanavar, S. H. Kulkarni, Assessment and Evaluation of Thermoplastic Guardrail through Impact of Passenger Cars, *International Research Journal of Engineering and Technology*, pp. 1337-1343, 2016.
42. J. B. Enni, D. Marzougui, A. Eskandarian, N. E. Bedewi, Finite element modelling of anthropomorphic test devices for vehicle crashworthiness evaluation, *Int J Crashworthiness*, Vol. 6, pp. 511-524, 2001.
43. F. Robache, Évaluation sur simulateur de conduite du comportement humain en situation de pré-crash: application à l'amélioration des airbags, Thèse soutenue à l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis (2017).
44. M. Ostmann, L. Jakobsson, An examination of pre-crash braking influence on occupant crash response using an active human body model, *IRCOBI Conference*, pp. 275-283, 2016.
45. T-L. Teng, F-A. Chang, Y-S. Liu, C-P. Peng, Analysis of dynamic response of vehicle occupant in frontal crash using multibody dynamics method, *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 48, pp. 1724-1736, 2008.
46. O. Oana, D. Nicolae, D. Ilie, Dynamic models to analyse the influence of the seat belt in a frontal collision, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 252, 2017, 012017 doi:10.1088/1757-899X/252/1/012017
47. D. Gierczycka, S. Malcolm, D. S. Cronin, Occupant-Restraint-Vehicle Interaction in Side Impact Evaluated Using a Human Body Model, *Ohio State University Injury Biomechanics Symposium*, 2016.
48. B. Campbell, D. S. Cronin, Coupled Human Body and Side Impact Model to Predict Thoracic Response. *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 19, pp. 394-413, 2014.
49. Y. Hu, C. E. Neal-Sturgess, A. M. Hassan and R. Guo, Modelling the Effects of Seat Belts on Occupant Kinematics and Injury Risk in the Rollover of a Sports Utility Vehicle (SUV), *SAE Transactions, J. of passenger cras: mechanical systems journal*, Vol. 116, pp. 1392-1406, 2007.
50. Y. Matsui and S. Oikawa, Effect of Seat Condition on Abdominal Injuries to Vehicle Occupants in Frontal Impact Accidents *Appl. Sci.* Vol. 8, pp. 2047, 2018, <https://doi.org/10.3390/app8112047>
51. F. Li, R. Lu, W. Hu, H. Li, S. Hu, J. Hu, H. Wang and H. Xie, The Influence of Neck Muscle Activation on Head and Neck Injuries of Occupants in Frontal Impacts, *Applied Bionics and Biomechanics*, 2018, <https://doi.org/10.1155/2018/7279302>
52. T. Tan, M. Mongiardini, R. Grzebieta and G. Mattos, Reconstruction of a Rollover Crash for Thoracic Injury Etiology Investigation, *Safety*, Vol. 3, 2017, doi:10.3390/safety3040027

53. M. R. Seyedi, S. Jung, Numerical assessment of occupant responses during the bus rollover test: A finite element parametric study, *J. of Automobile Engineering*, 2019, <https://doi.org/10.1177/0954407019894425>
54. M. G. Shi, M. T. Z. Hassan, S. A. Meguid, Nonlinear multibody dynamics and finite element modeling of occupant response: part II-frontal and lateral vehicle collisions, *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, pp. 23-41, 2019.
55. R. Desbats, Analyse du comportement de l'abdomen lors d'un choc automobile pour l'amélioration de la bio-fidélité et de la prédiction des lésions abdominales par le mannequin de choc THOR. Thèse soutenue à l'Université Claude Bernard Lyon 1, 2016.
56. K. Messoudene, Dispositif Innovant de Frein Automobile par le Volant, Intégré à un Système de Direction Type Steer-by-Wire, Thèse soutenue à l'Université d'Evry-Val d'Essonne, 2011.
57. A. Prasad, M. Maltese, and A. Loudon, Injury risks from advanced air bags in frontal static out-of-position tests, 2003.
58. S. Sohr, H. Hofmann, S. Kutschenreuter, and H. Ruck, Influence of HIII 5% dummy tolerances on positioning and test results in out-of-position load cases according to the FMVSS 208, *Innovations for safety : opportunities and challenges*, 2007.

# **Conclusions et perspectives**

---

## Conclusion

Les travaux menés, dans ce mémoire, apportent une contribution importante dans la compréhension des phénomènes intervenant, dans un accident de la route impliquant un jeune conducteur adulte de voiture touristique, avec un obstacle. L'analyse accidentologique, simulée dans cette étude, a permis d'établir essentiellement des scénarios, types d'accidents et d'effectuer des choix de modélisation. Globalement, les travaux ont porté sur la modélisation du comportement dynamique d'un conducteur adulte, maintenu par une ceinture de sécurité, lors d'un accident de la route. L'utilisation de simulations d'accident, par la méthode des éléments finis, nous a aidé à mieux comprendre les risques de blessures, mis en jeu lors d'un choc frontal. Dans ce contexte, il a été donc nécessaire ; de développer des modèles, les plus bio-fidèles possibles et des scénarios d'accident, simulant les plus représentatifs de la réalité. Cependant, une démarche mixte expérimentale et numérique, associée à une analyse de sensibilité a été proposée ; pour l'évaluation et la modélisation des dispositifs de sécurité, les plus importants dans la survie des passagers d'un véhicule touristique ; lors d'un accident de la route, à savoir l'airbag et la ceinture de sécurité.

Une attention particulière a été portée d'une part, aux différents types d'airbags intégrés dans un habitacle de voiture touristique et leurs principes de déploiement ainsi que les éléments de sécurité dédiés au leur bon fonctionnement tels que le calculateur, le générateur de gaz, le système de déclenchement, et les coussins gonflables. Et d'autre part, à la nécessité de déterminer de manière précise les valeurs caractéristiques des matériaux utilisés dans cette étude par des essais mécaniques, en particulier les essais de traction pour déterminer leurs comportements mécaniques. Sur la base de ces essais, des paramètres de lois de comportement des modèles utilisés ont été mis en place dans un code de calcul de structure LsDyna® pour simuler d'une part, le déploiement des airbags et d'autres part, pour analyser le comportement dynamique d'un conducteur lors d'un accident de la route.



La deuxième partie de cette étude s'intéresse aux développements d'un modèle numérique destiné à prédire correctement le déploiement d'un airbag conducteur suite à une supposée collision frontale. Différents sacs gonflables de trois grands fabricants ont été utilisés. Les résultats obtenus ont permis en premier lieu, de montrer que le déploiement des airbags dépend sensiblement des propriétés mécaniques des tissus employés pour la fabrication de ces sacs gonflables. En second lieu, il a été signalé l'importance de la pression imposée dans le remplissage des airbags durant leurs déploiements pour assurer principalement une sécurité optimale. Puis, nous nous sommes intéressés au comportement mécanique des airbags lors d'un écrasement par un impacteur rigide indéformable. Dans ce contexte, des simulations numériques ont été aussi mises en place pour déterminer essentiellement la distance de sécurité minimale qui doit séparer un passager de son coussin gonflable pour assurer pleinement sa sécurité. L'étude réalisée a montré qu'une distance inférieure à 35 cm rend le coussin gonflable inefficace puisqu'il n'absorbe que ~13% de l'énergie cinétique de l'impacteur tandis qu'au-delà de cette distance, l'airbag conducteur absorbe bien la majorité de l'énergie cinétique de l'impacteur sans que ce dernier n'heurte le volant, ni le tableau du bord voire même le pare-brise. Aussi, nous avons mis au point un deuxième modèle 3D pour simuler cette fois-ci une collision frontale avec des passagers ceinturés ou vulnérables, en tenant en compte du déploiement d'airbag. Dans un premier temps, plusieurs scénarios ont été proposés pour étudier le comportement dynamique d'un conducteur lors d'un accident de la route. Pour le premier scénario, il a été supposé un conducteur parfaitement maintenu avec une ceinture de sécurité à trois points. L'analyse obtenue a montré que l'utilisateur prend durant la collision, une position décentrée avec un corps qui bascule vers sa gauche, en raison de la nature asymétrique de la ceinture à trois points. Ceci n'a pas empêché la ceinture d'assurer le maintien en place du conducteur, en position assise, ce qui augmente donc sa sécurité à l'intérieur du véhicule. La seule partie du corps qui était vulnérable c'est plutôt la tête du conducteur qui risque de subir le coup du lapin. Par ailleurs, dans le deuxième scénario, il a été supposé, cette fois-ci, un conducteur maintenu partiellement, soit avec une ceinture sous-abdominale ou thoracique. Il a été constaté que le mouvement général du conducteur ; fourni par les simulations numériques présente des situations dangereuses pour le conducteur, puisque ce dernier risque des blessures graves. En effet, il peut glisser dangereusement sous la

ceinture thoracique jusqu'à ce que ses jambes heurtent, violemment, le tableau de bord. Il est évident que l'utilisation de la ceinture sous-abdominale ou celle thoracique n'assure malheureusement, pas la protection du conducteur du véhicule. Sa présence limite seulement certains mouvements incontrôlables, à l'intérieur de l'habitacle, lors d'un accident de la route.

Enfin, le modèle éléments finis proposé, a été élargi aux cas d'une collision frontale avec déploiement de l'airbag. En effet, l'étude a montré que si l'airbag se déploie correctement, il permet de protéger la tête du conducteur, en cas d'accident de la route. Une tentative de validation expérimentale a été présentée. Globalement, nous avons pu observer que la posture simulée du comportement dynamique du conducteur dans les deux cas utilisés, était proche des essais expérimentaux. La fiabilité du modèle à reproduire certains scénarios est prouvée avec cette étude comparative. A ce stade, nous pouvons conclure que les résultats obtenus sont satisfaisants. L'étude réalisée nous a permis de conclure, que l'utilisation de la ceinture de sécurité et les airbags associés sont essentielles, puisqu'ils diminuent largement le risque mortel et sauve des vies. Elle a aussi permis de démontrer l'intérêt que pouvait présenter un modèle éléments finis comme outil d'accompagnement ; pour la mise au point des essais physiques de crash-tests nécessaires d'une part, aux développements des dispositifs de la sécurité routière intégrés dans l'habitacle d'une voiture touristique et d'autre part ; dans la conception des voitures futuristes mieux sécurisées pour l'industrie de l'automobile.

## **Perpectives**

Les travaux réalisés, au cours de cette thèse, ont conduit à de nombreux résultats innovants et prometteurs. Ils constituent une base de données conséquente, dans notre thématique de recherche, ouvrant ainsi la voie à plusieurs perspectives. Premièrement, il serait intéressant de développer un modèle qui tient mieux en compte du mode de pliage, ce qui permettrait une meilleure représentativité du début de phénomène de déploiement dans l'airbag.

Deuxièmement, il serait judicieux d'imaginer l'intégration des paramètres de personnalisation, représentatifs de la morphologique, du sexe, ou de l'âge, par exemple, afin de rechercher des corrélations entre le comportement et ses paramètres intrinsèques du conducteur. Un tel modèle, une fois fiabilisé, permettrait

de vérifier l'efficacité et l'innocuité des systèmes de sécurité ; pour des gammes variées des situations et du conducteurs. La conception de scénarios variés est une autre piste de recherche envisagée.

Enfin, il serait souhaitable de mettre en place, au niveau de notre laboratoire, un banc d'essais à grande échelle, afin d'effectuer des expérimentations de crash-tests en collaboration avec des industriels. Ceci, nous permet de récolter et de traiter, une grande quantité de données, obtenues grâce à ces essais et de les confronter avec nos résultats de simulations numériques, déjà obtenus, pour améliorer la fiabilité de notre modèle.

# Table des matières

Résumé de thèse .....	1
Introduction générale .....	4
<b>Chapitre I : Étude bibliographique .....</b>	<b>10</b>
<b>I.1. Introduction .....</b>	<b>11</b>
<b>I.2. Evolution des dispositifs de sécurité dans la voiture .....</b>	<b>14</b>
<b>I.3. La sécurité dans l'automobile .....</b>	<b>14</b>
I.3.1. La sécurité active .....	15
I.3.2. La sécurité passive .....	17
<b>I.4. Les éléments de sécurité dans les véhicules .....</b>	<b>18</b>
I.4.1. Les airbags .....	18
I.4.2. Les prétensionneur de ceinture .....	19
I.4.3. La ceinture de sécurité .....	19
I.4.4. Le détecteur de l'impact .....	20
I.4.5. L'assistance au freinage d'urgence .....	21
I.4.6. La déformation de la structure du véhicule .....	21
I.4.7. Le pare-brise avant, les vitres et l'appuie-tête .....	22
I.4.8. Les barres de protection latérales et la direction .....	22
I.4.9. Surveillance de pression des pneus .....	22
<b>I.5. Conclusion .....</b>	<b>23</b>
<b>Chapitre II : Les airbags .....</b>	<b>26</b>
<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>27</b>
<b>II.2. Les airbags de sécurité .....</b>	<b>31</b>
<b>II.3. Les différents types d'airbags .....</b>	<b>33</b>
II.3.1. Les airbags frontaux .....	34
II.3.2. Les airbags latéraux .....	35
II.3.3 Les airbags de genoux .....	36
II.3.4. Airbags anti-glissement .....	37
II.3.5. Les airbags rideaux .....	37

II.3.6. Les airbags piétons .....	38
II.3.7. Les airbags de ceinture .....	39
II.3.8. Les airbags extérieurs latéraux .....	39
<b>II.4. Principe de déploiement des airbags .....</b>	<b>40</b>
<b>II.5. Les éléments de sécurité dédiés aux airbags .....</b>	<b>41</b>
II.5.1. Les générateurs de gaz .....	42
II.5.1.1. Générateur pyrotechnique .....	42
II.5.1.2. Les générateurs à gaz chaud .....	44
II.5.1.3. Les générateurs à gaz froids .....	44
II.5.1.4. Les générateurs multi-étagés .....	45
II.5.1.5. Les générateurs hybrides .....	45
II.5.2. Prétensionneur de ceinture .....	47
II.5.3. Capteurs et calculateurs pour le déploiement des airbags .....	47
II.5.3.1. Capteurs pour airbags .....	47
II.5.3.2. Calculateurs pour airbags .....	48
II.5.4. Capteurs pour sièges auto .....	49
II.5.5. Fonctionnement des airbags de sécurité .....	51
<b>II.6. Les airbags et les risques d'une mauvaise utilisation .....</b>	<b>53</b>
<b>II.7. Conclusion .....</b>	<b>56</b>
<b>Chapitre III : Caractérisation expérimentale et modélisation du comportement mécanique .....</b>	<b>60</b>
<b>III.1. Introduction .....</b>	<b>61</b>
<b>III.2. Description des matériaux de l'étude .....</b>	<b>62</b>
III.2.1. L'alliage d'aluminium AA5052 .....	63
III.2.2. Les tôles d'acier Dual Phase .....	64
III.2.3. Le verre feuilleté .....	64
III.2.4. Polyester stratifié 1000D .....	64
III.2.5. Poly chlorure de vinyle .....	65
<b>III.3. Eprouvette de traction .....</b>	<b>66</b>
<b>III.4. Dispositif expérimental .....</b>	<b>67</b>
<b>III.5. Résultats expérimentaux et discussion .....</b>	<b>68</b>

III.5.1. Comportement en traction des tôles métalliques .....	68
III.5.2. Comportement en traction des éprouvettes thermoplastiques .....	71
III.5.3. Comportement en traction des matériaux tissés .....	72
III.5.4. Bilan des essais de traction dans le plan du matériau .....	74
<b>III.6. Simulation numérique du comportement monotone en traction .....</b>	<b>75</b>
III.6.1. Conditions aux limites .....	75
III.6.2. Résultats numériques et discussion .....	77
III.6.3. Validations expérimentales .....	81
<b>III.7. Conclusion .....</b>	<b>84</b>
<b>Chapitre IV : Simulation numérique du déploiement d'un airbag .....</b>	<b>88</b>
<b>IV.1. Introduction .....</b>	<b>89</b>
<b>IV.2. Simulation par éléments finis .....</b>	<b>90</b>
IV.2.1. Contexte théorique .....	90
IV.2.2. Description géométrique et hypothèses de simulation .....	92
<b>IV.3. Résultats de la simulation et discussion .....</b>	<b>94</b>
IV.3.1. Déploiement de l'airbag .....	94
IV.3.2. Ecrasement de l'airbag .....	103
<b>IV.4. Validation expérimentale .....</b>	<b>107</b>
IV.4.1. Déploiement libre d'un airbag conducteur .....	107
IV.4.2. Ecrasement libre d'un airbag conducteur .....	109
<b>IV.5. Conclusion .....</b>	<b>112</b>
<b>Chapitre V : Modélisation et simulation numérique du comportement dynamique d'un conducteur, lors d'un choc frontal .....</b>	<b>118</b>
<b>V.1. Introduction .....</b>	<b>119</b>
<b>V.2. Modélisation numérique d'une collision frontale .....</b>	<b>120</b>
V.2.1. Mesures morphologiques .....	121
V.2.2. Modèle numérique de l'être humain .....	122
V.2.3. Modèle numérique d'un véhicule touristique .....	123

<b>V.3. Résultats de la simulation numérique d'une collision frontale</b> .....	126
V.3.1. Comportement dynamique d'un conducteur parfaitement ceinturé .....	126
V.3.1.1. La dynamique mise en jeu durant une collision frontale .....	126
V.3.1.2. Cinématique des mouvements dans une collision frontale .....	129
V.3.1.3. Effet de la vitesse d'impact sur le comportement dynamique du Conducteur .....	129
V.3.2. Comportement dynamique d'un conducteur partiellement ceinturé .....	134
V.3.3. Comportement dynamique d'un usager vulnérable non ceinturé .....	136
V.3.4. Comportement dynamique d'un conducteur ceinturé lors d'une collision frontale avec déploiement d'airbag .....	137
V.3.4.1. Mise en situation .....	137
V.3.4.2. Résultats numériques et discussions .....	138
<b>V.4. Validation expérimentale</b> .....	141
V.4.1. Comportement dynamique d'un conducteur parfaitement ceinturé .....	141
V.4.2. Passager non-ceinturé .....	143
<b>V.5. Conclusion</b> .....	144
<b>Conclusion et perspectives</b> .....	150