

-
PROGRAMME PREDIT



PROTEUS

(**PRO**tection de la **TÊ**te des **US**agers vulnérables)
Groupe 4 (Usagers Vulnérables) du PREDIT III

PROTEUS

SYNTHESE DU PROJET

- Résumé
- Introduction
- Modélisation de la tête humaine
- Corrélation sollicitation-lésion et critères
- Apport de l'outil
- Conclusions & développements
- Valorisation
- Contactes & Partenaires

Rédacteur : Rémy. WILLINGER
willi@imfs.u-strasbg.fr

Date : 10/10/06

PROTEUS
(PROtection de la TÊte des USagers vulnérables)

SYNTHESE DU PROJET

Rémy Willinger (willi@imfs.u-strasbg.fr)

Résumé

L'objectif de ce projet est de mettre au point un outil numérique de prédiction des lésions crâno-encéphaliques nécessaire à l'évaluation et à l'élaboration des systèmes de protection de la tête en cas de choc. L'approche repose sur la mise au point d'un modèle éléments finis de la tête humaine en se référant largement à l'existant et en s'efforçant d'améliorer la validité de ces modèles. Après s'être assuré des capacités du modèle à simuler de façon réaliste la réponse dynamique de la tête soumise à un choc mais aussi à reproduire les principaux mécanismes qui conduisent aux lésions, ce modèle a été utilisé pour la reconstruction d'accidents réels particulièrement bien documentés dans le cadre de ce projet afin de mettre en regard les lésions observées avec les paramètres mécaniques intra crâniens calculés avec le modèle. Trois types d'accidents impliquant des usagers vulnérables ont été pris en considération à ce niveau, le piéton, le motocycliste et le conducteur de véhicule automobile en situation de choc latéral. Cette étape a contribué à proposer de nouveaux critères de lésions crâno-cérébraux spécifiques à un mécanisme donné. Le nouvel outil de simulation de traumatisme crânien a ensuite été évalué comparativement à l'existant dans des configurations de choc piéton et passager automobile sous impact latéral. L'intégration du modèle de la tête dans un modèle de casque de motocycliste a finalement conduit à l'optimisation de ce système de protection du motocycliste.

1) Introduction

En dépit d'incontestables progrès acquis ces dernières années, le nombre de victimes d'accidents de la route demeure élevé dans l'Union européenne avec une moyenne annuelle tournant autour de 42000 tués et 1,6 million de blessés. Les jeunes de 15 à 24 ans correspondent à la tranche d'âge de la population la plus exposée. Les statistiques montrent que les traumatismes crâniens restent une cause importante de décès ou d'incapacité parmi les usagers de la route. En premier lieu viennent les piétons (plus de 10% des morts sur les routes françaises), suivis par les cyclistes qui ne portent que trop rarement de casque. Pour cette population, un tiers des blessures concerne le segment céphalique d'après une analyse d'accidents effectuée dans le cadre du projet européen APROSYS. Les motocyclistes sont également très exposés aux traumatismes crâniens comme le montre le projet RIDER, en révélant la part importante des traumatismes crâniens par rapport à l'ensemble des lésions observées, puisque 66% des blessures se situent au niveau du segment céphalique, tout niveaux de gravités confondus, d'après une analyse d'accidents impliquant 253 motocyclistes. Si le traumatisme crânien n'est pas la première cause de décès du motocycliste, il est cependant à l'origine de la majorité des lésions graves. Enfin l'automobiliste n'est pas à l'abri du traumatisme crânien en particulier en cas de choc latéral.

Au niveau français, ce fléau entraîne des conséquences inadmissibles sur les plans humains, social et économiques. Afin de contribuer à l'enrayement de cette calamité publique, un programme de recherche relevant de la biomécanique du traumatisme crânien a été initié par dans le cadre du PREDIT en 2003. Le projet PROTEUS, pour Protection de la Tête des Usagers Vulnérables, est piloté par l'ULP (Université Louis Pasteur – Strasbourg) et réunit le CEESAR (Centre Européen d'Etudes de Sécurité et d'Analyse des Risques), le LAMIH (Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines de l'Université de Valenciennes), la Société SHARK (fabriquant de casques de motocyclistes à Marseille) et le LAB (Laboratoire d'Accidentologie et de Biomécanique de Peugeot et de Renault). L'objectif de ce projet est de mettre au point un outil numérique de prédiction des lésions crâno-encéphaliques nécessaire à l'évaluation et à l'élaboration des systèmes de protection de la tête en cas de choc. L'ambition est de proposer des critères de lésions plus réalistes que le HIC (Head Injury Criteria) calculé uniquement à partir de l'accélération linéaire

d'une fausse tête et largement critiqué dans la communauté scientifique internationale. L'approche repose sur la mise au point et la validation d'un modèle éléments finis de la tête humaine qui repose largement sur l'existant et qui devra être capable de reproduire les différents mécanismes de lésions cranio-encéphaliques. Dans une deuxième phase ce modèle sera utilisé pour la reconstruction d'accidents réels particulièrement bien documentés dans le cadre de ce projet afin de mettre en regard les lésions cérébrales observées avec les paramètres mécaniques calculés avec le modèle, contribuant ainsi à l'élaboration d'un outil numérique de prédiction des traumatismes crâniens. Dans la troisième phase, le nouvel outil sera évalué comparativement à l'existant dans des configurations de choc piéton et passager automobile sous impact latéral. Pour illustrer l'apport de l'outil dans l'amélioration de la protection de la tête, le modèle de la tête sera intégré dans un modèle de casque de motocycliste afin d'optimiser ce systèmes de protection du motocycliste. La recherche conduite dans le cadre de ce projet a aboutie à des résultats exploitables à court terme mais aussi à l'origine de nouveaux projets comme cela est décrit dans la dernière partie de cette synthèse, en même temps que la synthèse des diverses actions de valorisation.

2) Modélisation de la tête humaine

Pas moins d'une dizaine de modèles numériques de la tête humaine ont été publiés de part le monde ces dix dernières années. Ainsi, l'élaboration d'un modèle conforme à l'état de l'art dans le domaine de la modélisation numérique par la méthode des éléments finis de la tête humaine repose largement sur l'existant. Une revue de la littérature sur les propriétés mécaniques de l'os crânien et de la matière cérébrale a été réalisée et l'ensemble des essais mécaniques réalisés sur la tête humaine dans un but de validation des modèles a été répertorié. Deux modèles éléments finis disponibles à l'ULP et au LAMIH et illustrés en figure 1 ont été évalués comparativement au moyen de ce matériel. Globalement les deux modèles présentent un comportement mécanique du milieu intra-crânien très comparable et conforme aux autres modèles de la littérature comme illustré en figure 2, pour l'essai réalisé par Nahum en 1977. En raison des faibles différences entre les deux modèles il a été décidé de procéder à la simulation des accidents réels avec les deux modèles. Une telle approche permettant à la fois de poursuivre l'évaluation des modèles mais aussi de vérifier si les critères à venir sont modèle dépendant ou non.

Il est ressorti également de cette analyse de l'existant qu'aucune étude de l'influence des différences inter individus sur la réponse au choc de la tête n'a été entreprise, ce qui a engendré une étude dans ce sens. Enfin, ce travail a révélé l'importance d'une modélisation réaliste de la boîte crânienne, ce qui a motivé la nouvelle campagne d'essais de caractérisation de l'os crânien.

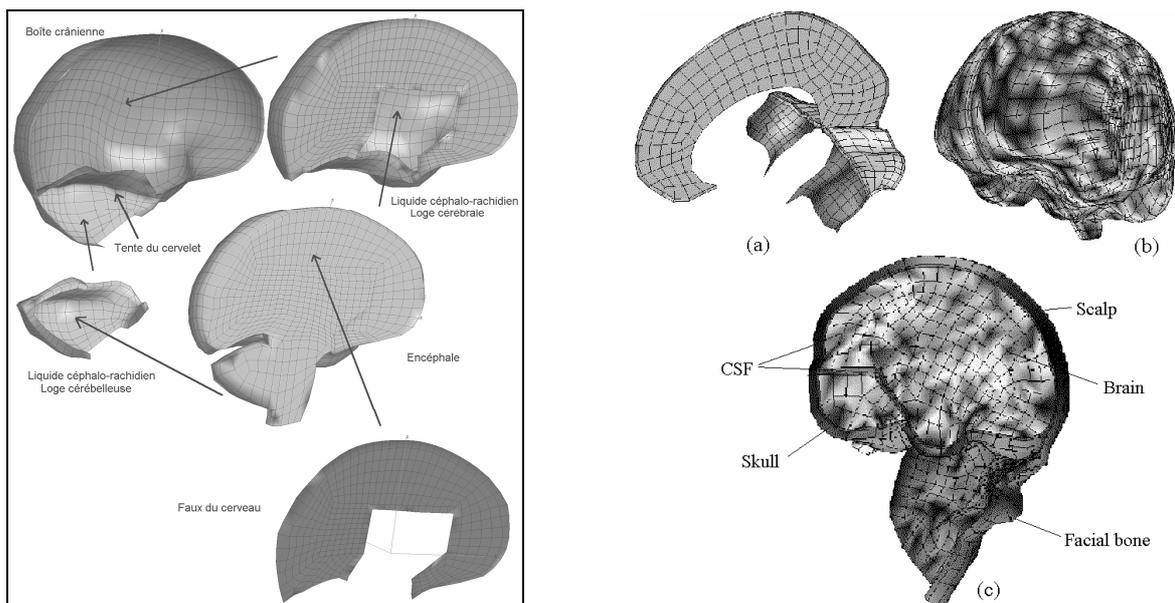


Figure 1 : Illustration des modèles éléments finis de la tête humaine du LAMIH à gauche et de l'ULP à droite.

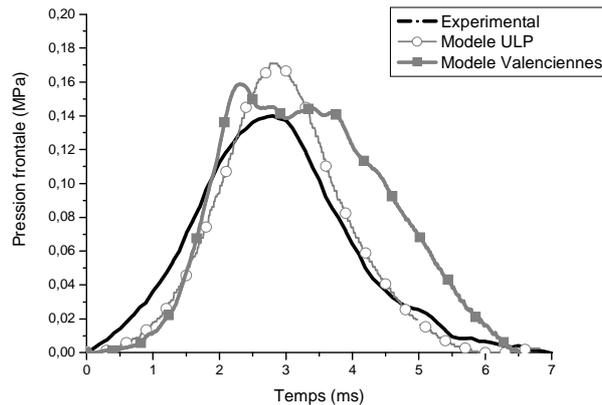


Figure 2 : Confrontation des pressions intra-cérébrales calculées au moyen des deux modèles avec celles enregistrée expérimentalement lors de l’essai de choc de Nahum.

Pour l’analyse de l’influence de la géométrie crânienne sur la réponse mécanique de la tête en situation de choc, une étude crânio-métriques a abouti à une classification des têtes basée sur leurs indices céphaliques horizontaux, verticaux et transverses. Il en résulta que 95% de la population humaine pouvait être représentée par huit modèles de crâne. Les réponses dynamiques des huit classes de crânes calculés dans des configurations de choc frontal et latéral apparaissent de manière équivalente, révélant ainsi que l’influence de la géométrie globale du crâne sur la réponse dynamique du milieu intracérébral reste en dessous de 10%.

Au vu de la dispersion des propriétés mécaniques de la boîte crânienne rapportée dans la littérature il a été décidé d’apporter également un volet expérimental dans cette phase de mise au point de modèles numériques de la tête. La campagne d’essais a été effectuée sur des sujets frais provenant de l’association de don du corps de Paris (Université René Descartes). La calotte crânienne a été prélevée sur 20 têtes puis digitalisés. Un total de 19 échantillons est prélevé sur chaque calotte selon une cartographie précise, puis digitalisés à leur tour avant d’être soumis à un essai de flexion trois points jusqu’à rupture conformément à la figure 3. Une étude de densité et de minéralisation est également menée dans le but d’établir à terme une corrélation entre ces grandeurs et les caractéristiques mécaniques de l’échantillon. A ce stade un module d’élasticité homogénéisé moyen de 2.3 GPa a été fixé, avec un écart type de l’ordre de 1 GPa. La contrainte à la rupture a été estimée à 70 MPa (écart type de 30 MPa) et la déformation à la rupture enregistrée se situe vers 3.2% (écart type de 1.2%).

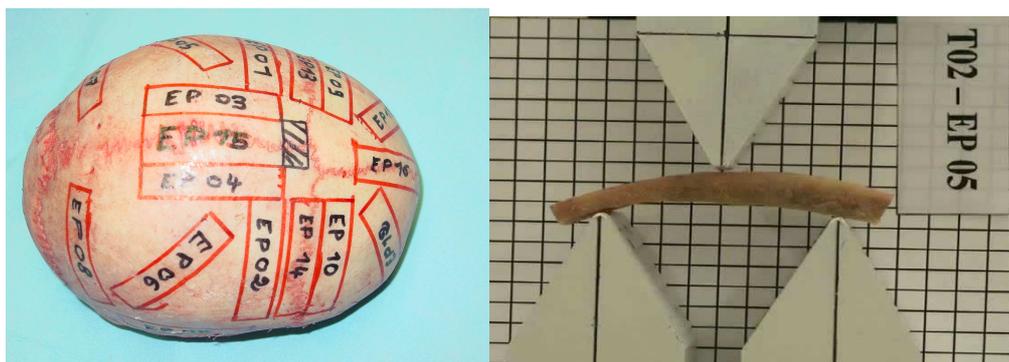


Figure 3 : Cartographie des échantillons à prélever sur la calotte crânienne et illustration de l’essai de flexion destiné à la caractérisation mécanique de la boîte crânienne.

Dans la mesure où les analyses d’accidents de piéton rapportent des proportions équivalentes de lésions neurologiques, d’hématomes sous durax et de fractures, il est important à ce stade de s’assurer que les modèles proposés sont capables d’intégrer les mécanismes de lésions observés. Au total il a été démontré que les modèles éléments finis de la tête humaine disponibles dans PROTEUS sont convenablement validés tant au niveau du chargement intracrânien, que du mouvement relatif

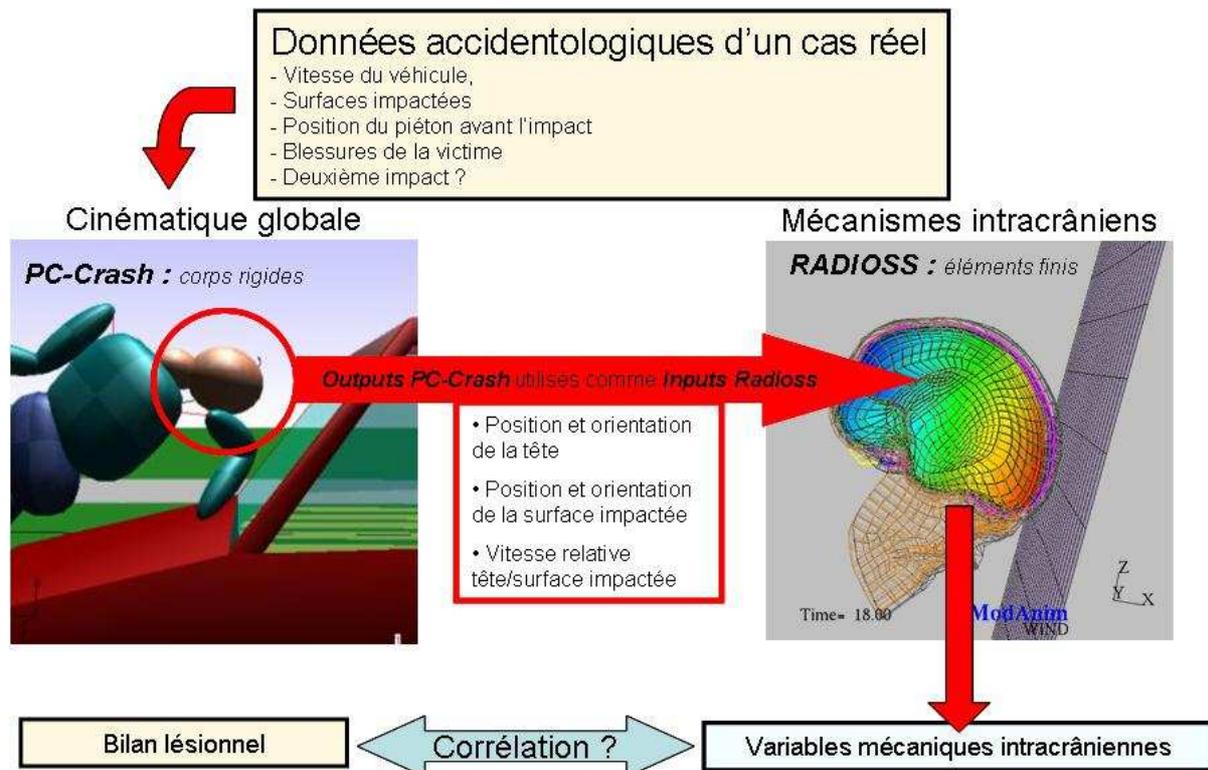
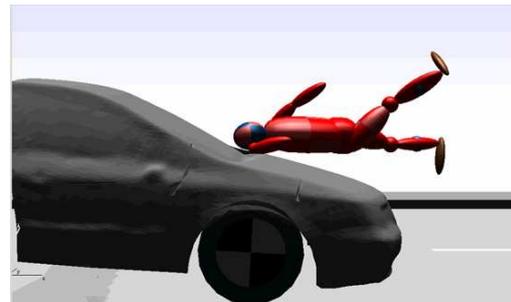
cerveau crâne et de la déformation crânienne. Dans la mesure où ces trois paramètres peuvent être reliés aux mécanismes de lésions à l'origine respectivement des lésions neurologiques, des hématomes sous duras et des fractures crâniennes, ces modèles constitueront un outil incontournable pour l'analyse de la corrélation entre la sollicitation de la tête et les lésions observées, une étape qui fait l'objet du prochain paragraphe.

3) Corrélation sollicitation – lésion et critères

Dans cette étape, il s'agit de mettre en relation les lésions observées avec la dynamique mise en jeu lors d'accidents réels, entraînant un traumatisme crânien. Pour y parvenir il faut bien entendu identifier et analyser les lésions à partir de dossiers cliniques, mais aussi remonter à la cinématique de la victime par le biais d'une reconstruction théorique de l'accident, pour finalement simuler de façon numérique l'impact de la tête contre l'obstacle. Les résultats de ces simulations permettront de mettre en regard les sollicitations dynamiques de la tête avec les lésions observées. La multiplication des cas reconstruits contribuera à l'enrichissement d'une base de données originale et inédite sur les critères de lésions crânio-encéphaliques. Le traitement statistique de ces données conduira enfin à la définition de courbes de risque spécifiques à des mécanismes de lésions donnés

Dans le cadre du projet PROTEUS un total de 22 cas d'accidents ont été recueillis, 7 piétons, 10 motocyclistes et 5 cas de chocs automobiles latéraux. Parmi ces derniers seuls 5 cas ont fait l'objet d'une reconstruction de la cinématique à l'aide d'un logiciel de simulation dynamique en corps rigide (PC Crash) validé sur des cas d'écoles en laboratoire. Un exemple de reconstruction de cette cinématique est donné en figure 4.

Figure 4 : Schéma synoptique de la méthodologie de reconstruction théorique de la cinématique du piéton et de la simulation numérique de l'impact crânien au moyen d'un modèle éléments finis de la tête



A partir de la simulation de la cinématique de la victime, le traumatisme crânien est restitué numériquement à l'aide du modèle par éléments finis de la tête, toujours conformément à la figure 4, ce qui nécessite au passage également la modélisation du pare brise. Ce sont les vitesses relatives de la tête par rapport à l'obstacle qui ont été considérés comme conditions initiales pour cette dernière étape de la simulation. Un exemple de résultat relatif aux contraintes de cisaillement dans le cerveau, au moment de l'impact avec le pare brise est donné en figure 5

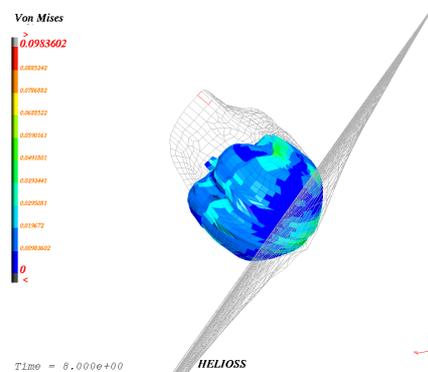


Figure 5 Simulation du traumatisme crânien : Champ de contraintes de cisaillement intracérébral de Von Mises relatif au cas piéton P394

L'idée est de confronter un certain nombre de variables mécaniques calculés en situation de choc, aux bilans lésionnels attachés à chacun des cas. Des études antérieures réalisées à l'ULP ont montrées que les contraintes de cisaillement intra-cérébrales de Von Mises, l'énergie interne de l'espace subarachnoïdien et l'énergie interne de la structure crânienne sont les trois paramètres les mieux corrélés respectivement les lésions neurologiques, les hématomes sous durax et les fractures du crâne. Pour les trois piétons qui ont fait l'objet d'une analyse détaillée des sollicitations intra-crâniennes, les résultats obtenus avec les modèles du LAMIH et de l'ULP sont rapportés en figure 6. Si une même tendance se dessine, les valeurs ne sont cependant pas identiques ce qui aura pour conséquences que les critères de lésions seront modèles dépendant. Les valeurs obtenus pour les paramètres relatifs aux trois mécanismes de lésion ont été confrontés aux critères proposés par l'ULP antérieurement pour montrer que les lésions des trois piétons pouvaient être prédites par ces critères surtout au niveau neurologique et des hématomes sous durax même si la corrélation avec les fractures était moins bonne. Ces cas seront bien entendu versés à la base de donnée de traumatismes crâniens en cours d'élaboration et serviront à la consolidation des critères proposés. A ce stade et en conclusion de cette étape, les critères émanent d'études antérieures (Marjoux et al 2006) et afférent au modèle de l'ULP sont rappelés sous la forme de courbes de risque pour les trois mécanismes de lésions en figure 7. Ceci transforme le modèle éléments finis de la tête en un outil omnidirectionnel de prédiction des lésions crânio-cérébrales.

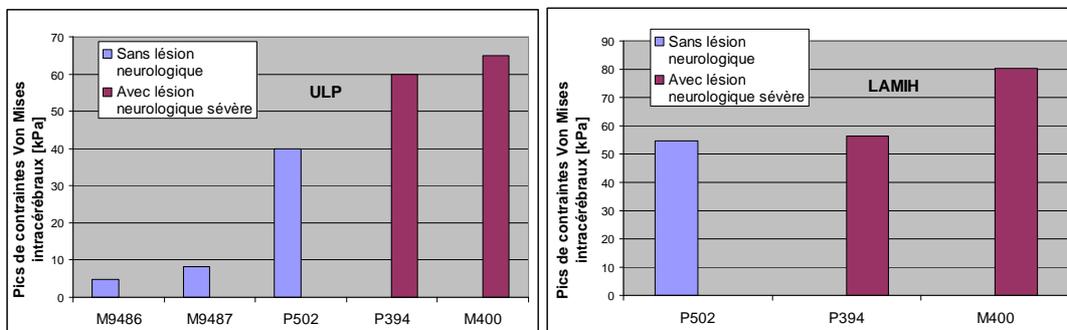


Figure 6 : Résultats en termes de contraintes de cisaillement intra-cérébral obtenus avec le modèles éléments finis de la tête de l'ULP et du LAMIH pour trois piétons.

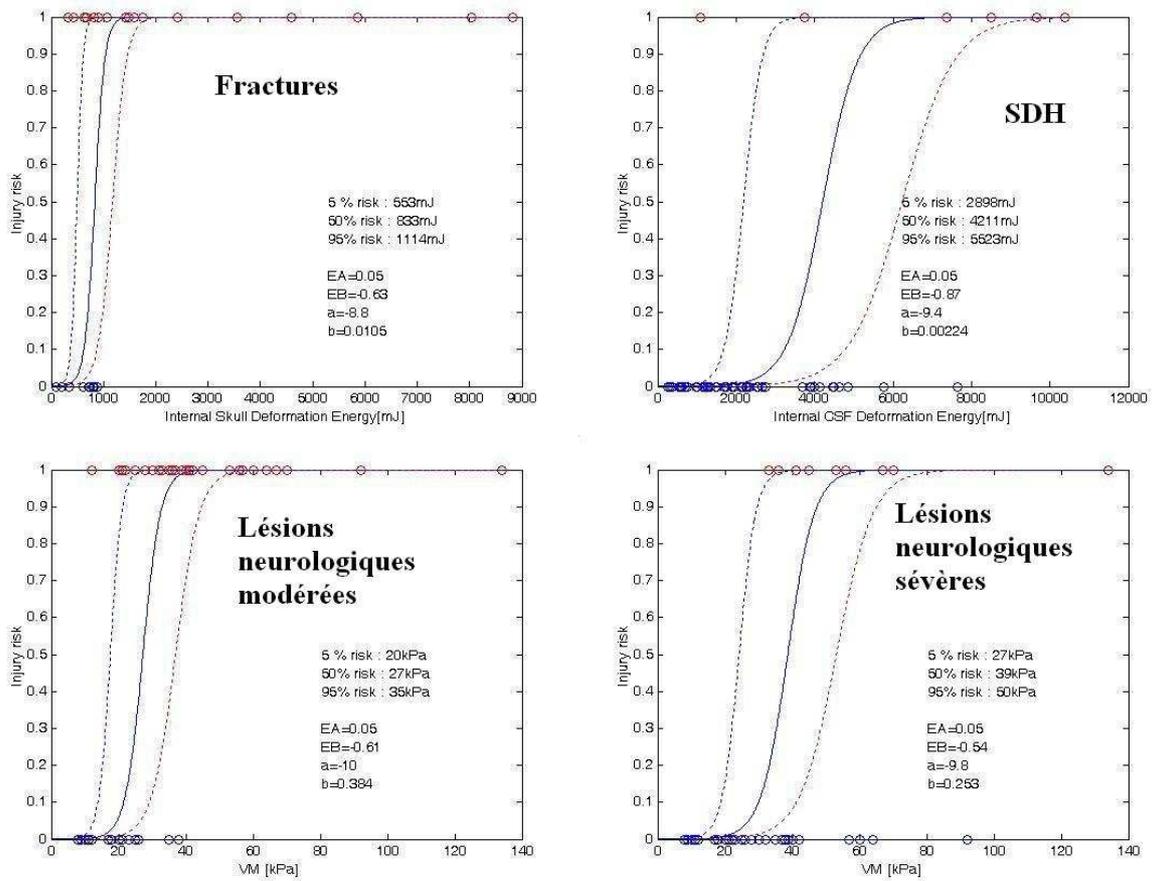


Figure 7 Critère de lésion et courbes de risque relatif à chaque mécanisme de lésion (Marjoux *et al.*, 2006)

4) Apport de l'outil

Les apports du projet au niveau de l'amélioration de la protection des usagers vulnérables se déclinent de deux façons. D'abord une évaluation de l'outil numérique par rapport aux outils existant dans le monde automobile, ensuite l'utilisation de l'outil pour l'amélioration du casque de motocycliste. Pour évaluer l'outil dans un environnement automobile, un choc piéton et un choc latéral expérimental ont été effectués avec un mannequin et le risque lésionnel a été chiffré au moyen du critère HIC. Le champ d'accélération tridimensionnelle a ensuite été appliqué au modèle éléments finis de la tête pour révéler une prédiction plus fine du risque de blessure de la tête. Dans un avenir proche il sera par conséquent envisagé de coupler la tête de mannequin au modèle numérique de la tête en considérant les accélérations enregistrées lors de l'essai comme conditions initiales du modèle éléments finis qui sera à son tour à même de prédire le risque lésionnel spécifique à chaque mécanisme de lésion. La validité de cette approche a été vérifiée conformément à la méthodologie de la figure 8 et s'est avérée réaliste dans la gamme des chocs rencontrés dans le monde du transport. Cependant l'ergonomie du modèle, à savoir l'automatisation de certaines tâches dans le post-traitement des résultats devra encore être amélioré.

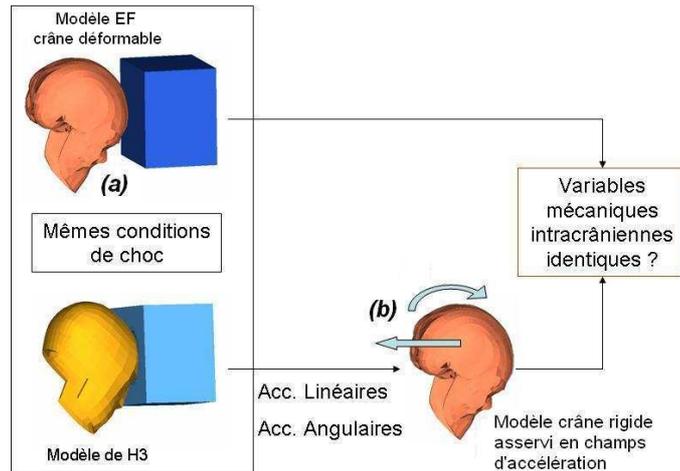


Figure 8 : Illustration de la méthodologie utilisée pour procéder au couplage de la tête de mannequin au modèle numérique. La réponse expérimentale de la tête de mannequin constituera les conditions initiales du modèle numérique qui à son tour exprimera le risque de lésion cérébrale.

L'étude de l'amélioration du casque de motocyclistes proposée dans la dernière étape de ce projet utilise très largement l'outil de prédiction de lésion que constitue le modèle de la tête et ses critères. La modélisation éléments finis d'un casque intégral constitué d'une calotte en polystyrène expansé et d'une coque en polycarbonate a été effectuée et un modèle d'une fausse tête rigide y a été introduite dans le but de valider le modèle du casque en configuration de choc normatif, comme illustré en figure 9. Pour l'optimisation de ce casque quatre paramètres mécaniques ont été modifiés (le module d'Young et la limite d'élasticité de la coiffe, ainsi que le module d'Young et l'épaisseur de la coque) en les augmentant et en les diminuant de 30%. Ceci a conduit à 16 casques fictifs qui ont ensuite été évalués vis-à-vis du critère HIC et des critères biomécaniques proposés plus haut après couplage de la tête humaine avec le casque (figure 10). Une analyse en composantes principales a permis d'établir un grand nombre de corrélations et de non corrélations entre les paramètres mécaniques du casque et la réponse des têtes de mannequin et humaine. Les principaux résultats présentés en figure 11 sont d'abord qu'une optimisation vis-à-vis du HIC conduit à un choix de meilleur casque différent qu'une optimisation vis-à-vis de critères biomécaniques et qu'une solution existe pour qu'aucun des critères de lésions ne soit atteint pour un choc normatif frontal à une vitesse initiale de 7.5 m/s.

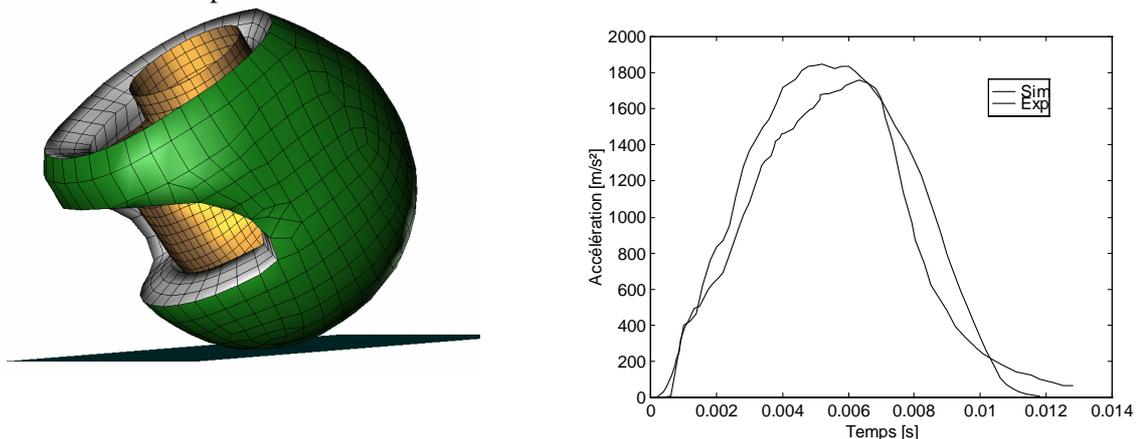


Figure 9 : Configuration d'impact normatif ($v=7.5\text{m/s}$) dans la phase de validation de l'ensemble casque-fausse tête vis-à-vis de l'accélération du centre de gravité de la fausse tête.

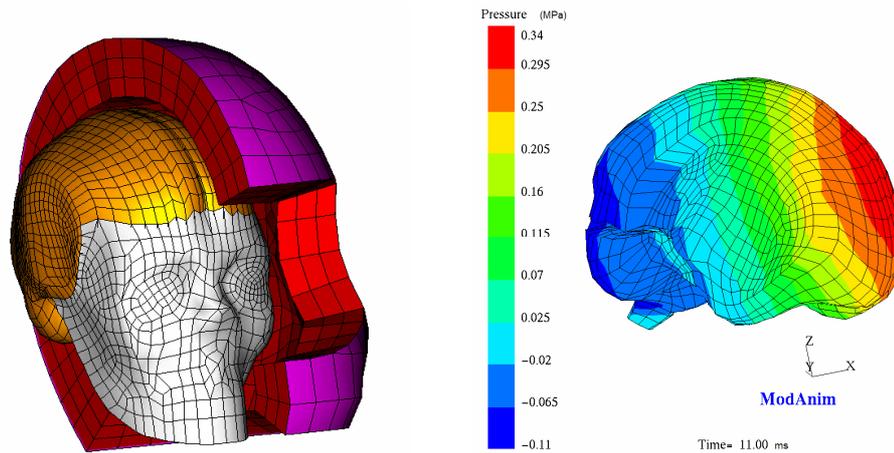


Figure 10 : Couplage du modèle du casque avec le modèle de la tête humaine et champ de pression intra-cérébral calculé dans une configuration de choc normatif ($v=7.5$ m/s)

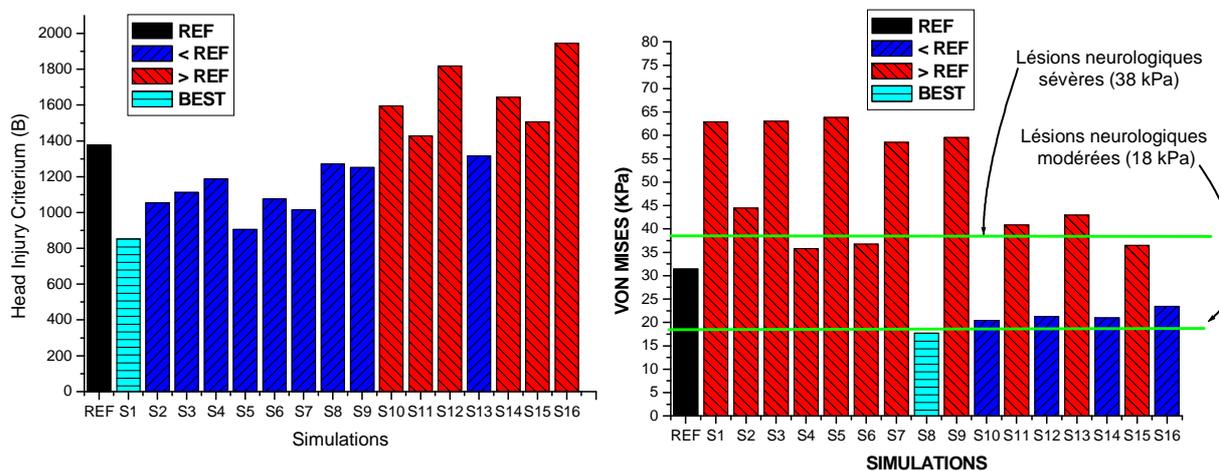


Figure 11 : Valeurs du critère HIC et du critère de contraintes de cisaillement intra cérébral calculés en situation de choc frontal ($v=7.5$ m/s) pour 16 casques fictifs couplés respectivement à la fausse tête rigide et le modèle de la tête humaine. Il apparaît clairement que le choix du meilleur casque dépend du critère retenu

5) Conclusions et développements

Pour tenter d'aller au-delà du simple critère HIC (Head Injury Criteria) calculé à partir de l'accélération linéaire d'une tête de mannequin, l'ambition de ce projet aura été de proposer un outil numérique de prédiction de lésions crânio-cérébrales en cas de choc. L'analyse de la littérature et une caractérisation des propriétés mécaniques de la structure crânienne ont permis de faire le point sur l'état de l'art dans le domaine de la modélisation éléments finis de la tête humaine et de proposer des modèles validés capables de reproduire es différents mécanismes de lésion de la tête.

Pour l'établissement de critères biomécaniques relatifs à chaque mécanisme de lésion de la tête, des traumatismes crâniens ont été simulés à partir de l'analyse théorique de la cinématique de la victime qui a chiffrée les conditions initiales du choc de la tête contre l'obstacle. Les lésions répertoriées lors de l'analyse détaillée de l'accident ont été corrélés aux paramètres mécaniques intra cérébraux pertinents calculé au moyen du modèle de la tête. Cette étape, complétée par des études antérieures, a permis d'établir des critères pour des lésions aussi différentes que la fracture du crâne, l'hématome

sous dural ou encore les lésions neurologiques, transformant ainsi le modèle numérique de la tête en véritable outil de prédiction de traumatisme crânien.

Les apports de cet outil ont été évalués en situation de choc piéton et latéral en comparant les prédictions de lésions et en envisageant une possibilité de coupler la réponse expérimentale de la tête de mannequin à la simulation numérique du choc, une méthodologie qui peut être transférée en bureau d'étude. Dans une dernière étape, l'étude de l'amélioration du casque de motocyclistes utilise très largement l'outil élaborée dans ce projet puisqu'elle envisage un couplage du modèle de la tête à un modèle du casque. Les principaux résultats à ce niveau sont d'abord qu'une optimisation vis-à-vis du HIC conduit à un choix de « meilleur casque » différent qu'une optimisation vis-à-vis de critères biomécaniques et qu'une solution existe pour qu'aucun des critères de lésion ne soit atteint pour un choc normatif frontal à une vitesse initiale de 7.5 m/s.

Les résultats émanant de PROTEU ont également initiés de nouveaux projets tant fondamentaux qu'appliqués. Au niveau biomécanique des études sont en cours pour améliorer encore la modélisation de l'os spongieux, de l'espace sous-arachnoïdien et de la matière cérébrale. Un effort est en cours également pour tenter d'établir une corrélation entre le taux de minéralisation osseuse, sa densité et ses propriétés mécaniques.

Enfin il est nécessaire de poursuivre des analyses détaillées d'accidents de piétons et de deux roues à la foi pour consolider les critères de lésions mais aussi pour initier des recherches de solution optimales pour la protection de la tête de ces usagers vulnérables. Si pour le motocycliste un projet dans ce sens a été initié par le PREDIT dans le cadre du projet BIOCASQ, le pendant pour le piéton est à souhaiter.

6) Valorisation

Les travaux conduits dans le cadre de PROTEUS ont donné lieu aux publications suivantes. D'autres projets de publications sont encore en cours.

- Revues avec comité de lecture

DELILLE R., LESUEUR D., POTIER P., RAMBAUD F., DRAZETIC P., MARKIEWICZ E. (2005). Identification protocol of skull human bone using a mono-layer law. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, Vol 8, pp69-70.

DELILLE R., DRAZETIC P., MARKIEWICZ E. (2005). Geometrical and mechanical parameters necessary for the reconstruction of pedestrian accidents. *Mécanique & Industries : Vol 6- N°3*, pp. 349-35.

- Conférences avec actes (avec ISBN) et comité de lecture

DELILLE R., LESUEUR D., POTIER P., RAMBAUD F., DRAZETIC P., MARKIEWICZ E. (2005). Identification protocol of skull human bone using a mono-layer law. In *XXXème Congrès de la Biomécanique*, Bruxelles, Belgique.

DELILLE R., DRAZETIC P., MARKIEWICZ E. (2005). Paramètres géométriques et mécaniques nécessaires à la reconstruction d'accidents piétons. In *XVIIème Congrès Français de Mécanique*, Troyes, France.

DELILLE R., LESUEUR D., POTIER P., DRAZETIC P., MARKIEWICZ É. (2006). Experimental study of the bone behaviour of the human skull bone for the development of a physical head model. *International Crashworthiness Conference*, Athens, Greece.

DECK C, WILLINGER R : Multidirectional optimisation against biomechanical criteria of a coupled head-helmet model. *Proceed of the Int. Crashworthiness Conf*, Athens, July 2006.

MARJOUX D, BAUMGARTNER D, DECK C, WILLINGER R : Head injury prediction capability of HIC, HIP, SIMON and ULP criteria. Proceed. of the International Research Council on Biokinetics of Impacts : IRCOBI 2006, 143-158

- Thèse

D. MARJOUX : Critères de lésion de la tête humaine en situation de choc. ULP Strasbourg, Décembre 2006

7) Contact & Partenaires

Pilote :

Remy WILLINGER
Professeur des Universités
Equipe des Systemes Biomecaniques
Institut de Mecanique des Fluides et des Solides
Universite Louis Pasteur - UMR CNRS 7505
2 rue Boussingault, 67000 Strasbourg - France
E-mail : willi@imfs.u-strasbg.fr

Partenaires :

- Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis,
Laboratoire d'Automatique, et de Mécanique et d'Informatique Industrielles et Humaines, UMR CNRS 8530 (LAMIH)
- Laboratoire d'Accidentologie et de Biomécanique (LAB)
132, rue des Suisses
92000 NANTERRE
- Société SHARK
110, route de la Valentine
13396 Marseille cedex 11
- Centre Européen d'Etudes de Sécurité et d'Analyse des Risques (CEESAR)
132, rue des Suisses
92000 NANTERRE