

## Apports de modèles statistiques à la prédiction de risque de rupture des ligaments du genou lors d'un accident piéton

Laboratoire académique de rattachement	LBMC, Ifsttar-Université Lyon 1, Bron ( <a href="http://www.lbmc.ifsttar.fr">www.lbmc.ifsttar.fr</a> )
Laboratoire industriel	LAB PSA Renault, Nanterre
Directeur et codirecteur	Philippe Beillas, Yoann Lafon (LBMC)
Encadrant industriel	Xavier Trosseille (LAB)
Discipline, école doctorale et établissement	Mécanique, ED. MEGA, Université Claude Bernard Lyon 1
Employeur du doctorant	Renault s.a.s.
Localisation du doctorant	Principale : LAB (Nanterre) ; Secondaire : LBMC (Bron)
Contact	<a href="mailto:philippe.beillas@ifsttar.fr">philippe.beillas@ifsttar.fr</a>

### Résumé (Description détaillée page 2)

Les avants de véhicules automobiles sont évalués au regard de la protection des piétons lors d'accidents grâce à des essais réalisés dans le cadre de la réglementation ou de protocoles consommateurs (ex : EuroNCAP). La protection du membre inférieur, qui est une des régions les plus fréquemment lésées lors d'accidents, est évaluée à l'aide d'un impacteur instrumenté représentant une jambe simplifiée et qui est projetée sur l'avant du véhicule (Figure 1). Une nouvelle jambe, l'a-PLI (pour *Advanced Pedestrian Legform Impactor*, Figure 2) va être introduite prochainement afin d'améliorer le réalisme de l'essai. Toutefois, la prédiction du risque de lésion des ligaments du genou à partir de tels outils reste problématique, en partie à cause de l'absence de données expérimentales de référence et de la difficulté à prendre en compte la variabilité de la population. L'objectif de la thèse sera donc d'améliorer la prédiction du risque de lésion des ligaments du genou à partir d'approches expérimentales et numériques. Des données biomécaniques expérimentales de référence seront générées grâce à des essais sur pièces anatomiques, et complétées avec des modèles statistiques de forme générés à partir d'imageries médicales. Ces connaissances seront exploitées dans des simulations numériques par éléments finis (EF) afin d'estimer un risque de lésion prenant en compte la variabilité de la population, puis de développer des courbes de risque de lésion des ligaments du genou utilisables avec l'a-PLI.

Ces travaux seront conduits au sein d'une collaboration entre les recherches académique et industrielle dans le cadre d'une thèse CIFRE.

**Mots-clefs** : biomécanique, piéton, crash test, éléments finis, modèle statistique de forme, genou, ligaments croisés et latéraux, courbe de risque lésionnel, expérimentation, pièces anatomiques, jambe a-PLI.



Figure 1: Test Euro NCAP d'évaluation de la protection des piétons ([www.euroncap.com](http://www.euroncap.com))



Figure 2: L'a-PLI désassemblée. ([www.cellbond.com](http://www.cellbond.com))

## DESCRIPTION DÉTAILLÉE

### Contexte

Les lésions des membres inférieurs sont parmi les plus fréquentes lors d'accidents automobiles avec des piétons. Les lésions ligamentaires du genou (ligament croisés et collatéraux, Figure 3) font partie des lésions pour lesquelles il est possible de réduire l'occurrence en travaillant sur la forme de l'avant du véhicule. En réglementation et en tests consommateurs (EuroNCAP), la protection du membre inférieur piéton est évaluée à l'aide d'un impacteur représentant une jambe simplifiée, la Flex-PLI (pour *Flexible Pedestrian Leg form Impactor*). Afin de tenir compte de la différence de cinématique de la Flex-PLI et un piéton lors d'essais avec des véhicules ayant un nez de capot haut, un test additionnel est réalisé avec un impacteur fémur-bassin.



Figure 3 : Ligaments latéral interne (MCL), croisé antérieur (ACL), et croisé postérieur (PCL) du genou.  
(<http://anatomie3d.univ-lyon1.fr/>)

Un nouvel impacteur jambe, l'a-PLI (pour *Advanced Pedestrian Leg form Impactor*) est en cours de développement à l'initiative de la *Japanese Society of Automotive Engineers* (JSAE). L'objectif de son développement est de permettre d'évaluer l'avant de véhicules avec un seul test, quelle que soit la géométrie de l'avant du véhicule. L'a-PLI s'inspire de la Flex-PLI pour sa partie basse. Pour la partie haute, l'a-PLI possède une masse articulée au niveau de la hanche afin de simuler la masse du haut du corps. Elle a été ajustée de sorte à reproduire la cinématique observée avec des modèles EF d'être humain debout.

Les mesures effectuées sur l'a-PLI incluent l'élongation des ligaments croisés (ACL, PCL) et du ligament latéral interne (MCL) du genou et, pour la prédiction du risque lésionnel, la JSAE envisage de transférer les courbes de risques de la Flex-PLI à l'a-PLI. Toutefois, les courbes de risque utilisées sur la Flex-PLI reposent sur très peu de fondements biomécaniques en ce qui concerne les ligaments croisés (peu d'essais, uniquement sur des sujets d'anatomie très âgés). Le changement d'impacteur dans les protocoles d'essais serait une opportunité pour introduire des améliorations en ce qui concerne les courbes de risques de ces structures.

### Objectifs

L'objectif de la thèse sera d'améliorer la prédiction du risque de lésion des ligaments du genou. Ces améliorations seront issues de la combinaison d'approches expérimentales et numériques.

Le thèse inclura la collection des données biomécaniques à partir de différentes sources telles que l'expérimentation sur sujets d'anatomie, l'imagerie médicale, la bibliographie, ou la simulation numérique par éléments finis (EF). Leur synthèse conduira au développement de courbes de risque pour les ligaments du genou qui prennent en compte certaines des variations interindividuelles telles que l'âge, la taille, le sexe. Ces courbes de risque devront être applicables tant au modèle de genou EF utilisé pour les simulations numériques qu'à l'a-PLI.

### Approche

Après une revue bibliographique sur les données expérimentales disponibles, un protocole expérimental sur sujet d'anatomie sera défini en vue de caractériser la réponse mécanique et le seuil lésionnel des ligaments croisés du genou. Le verrou principal sera de garantir un chargement des faisceaux ligamentaires conforme à celui subi lors d'un choc piéton, tout en assurant une mesure précise de leur élongation *in situ*. Une fois le banc d'essais et son instrumentation réalisés, le CEESAR, association qui collabore de manière régulière sur ces thématiques avec le LAB, sera en charge de la réalisation des essais sur environ 36 genoux.

En parallèle des essais, un modèle statistique de forme du genou, intégrant les ligaments d'intérêt et les muscles stabilisateurs sera développé à partir d'imageries médicales cliniques (IRM ou CT). Après avoir déterminé le volume de données nécessaires au regard des variables d'intérêt ainsi que les modalités d'imageries les plus appropriées, les imageries seront collectées dans le cadre de la convention entre le LBMC et les Hôpitaux de Lyon. Elles seront segmentées à l'aide des outils de registration développés par Anatoscope ([www.anatoscope.com](http://www.anatoscope.com)) basés sur la déformation d'un maillage de référence. Le processus de traitement statistique exploitera les travaux d'un doctorant ayant soutenu début 2018. Les défis principaux de cette partie seront la prise en compte dans le même modèle

statistique, de paramètres liés aux tissus mous et osseux, ainsi qu'à l'effet de la posture. Le modèle pourra être enrichi à partir de données de la littérature par exemple sur les laxités ligamentaires.

Un modèle EF de genou sera développé (ou adapté de l'existant). Après une vérification de son comportement à partir de données de la littérature, le modèle sera personnalisé sur chacun des genoux testés expérimentalement. La variance expérimentale expliquée par le modèle avant et après personnalisation sera examinée afin de quantifier l'effet de la géométrie sur la réponse. Une première série de courbes de risque sera développée à partir des élongations ligamentaires prédites par le modèle. Cette étude sera complétée par une étude de sensibilité sur les paramètres non mesurés et qui pourraient affecter la réponse (exemple : laxité ligamentaire).

Une étude paramétrique sera conduite afin d'étudier la variabilité de la réponse pour la population complète en situation de choc piéton, i.e. au-delà de la population testée en laboratoire. Cette étude s'appuiera sur le modèle EF précédemment validé, le modèle statistique géométrique, et la prise en compte d'autres paramètres tels que la laxité ligamentaire ou les efforts musculaires. Une attention particulière sera portée au paramètre d'extension du genou : en effet, l'a-PLI représente un genou en extension complète, ce qui ne correspond qu'à 6% du cycle de marche. Les courbes de risques seront mises à jour sur la base de cette exploration de la population et des conditions de chargement, puis adaptées à l'a-PLI.

Un plan de publication sera établi dès le démarrage de la thèse et réactualisé au cours de la thèse, pour valoriser les travaux de recherche tant au niveau des méthodes mises en œuvre pour lever les principaux verrous de l'étude que sur les résultats intermédiaires et finaux.

### **Candidat**

La principale discipline abordée pendant la thèse sera la mécanique, avec une forte orientation biomécanique. Les aspects expérimentation et simulation numériques seront largement présents. L'imagerie médicale, la segmentation et les statistiques de forme viendront en support de la démarche.

Le candidat idéal aura une formation en Mécanique, avec si possible une première expérience en simulation numérique par éléments finis, et un fort intérêt pour la biomécanique. Dans la mesure où l'étude fera intervenir plusieurs disciplines complémentaires, la curiosité et l'ouverture d'esprit seront des qualités importantes pour le candidat.

### **Expérience acquise**

Les travaux de thèse permettront d'acquérir des compétences techniques en modélisation statistique, expérimentation en biomécanique, modélisation et simulation EF, traitement d'images médicales et génération de courbes de risque. Ces thèmes sont largement transversaux en biomécanique pour la sécurité, le confort, la santé, etc. Ils ont aussi de nombreuses applications hors de ces domaines.

À l'issue de ce projet de thèse, le candidat aura acquis une expérience à la fois industrielle et universitaire, ainsi qu'une expérience de la recherche collaborative.

### **Environnement et encadrement**

Cette thèse sera effectuée en CIFRE avec RENAULT. Le doctorant sera principalement accueilli au Laboratoire d'Accidentologie, de Biomécanique et d'étude du comportement du conducteur PSA-Renault (LAB) situé à Nanterre. Il effectuera un certain nombre de séjours au Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs (LBMC, UMR\_T 9406, Ifsttar - Université Lyon 1, site de Bron), au sein des équipes *Biomécanique des chocs* et *Biomécanique et orthopédie*. Il sera codirigé par Philippe Beillas et Yoann Lafon (LBMC), et Xavier Trosseille (LAB).

Les travaux sur sujets d'anatomie seront sous-traités au Centre Européen d'Etudes de Sécurité et d'Analyse des Risques (CEESAR) à Nanterre.