



# Mobilités

Dossier thématique n° 5

# L'homme modélisé peut-il anticiper la **mobilité** de demain ?

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

Introduction

Confort, ergonomie et accessibilité

Modèles réactifs

Risques de blessure en cas d'accidents

Réadaptation fonctionnelle

Test virtuels

L'Ifsttar est devenu l'Université Gustave Eiffel  
au 1<sup>er</sup> janvier 2020

# L'HOMME MODÉLISÉ PEUT-IL ANTICIPER LA MOBILITÉ DE DEMAIN ?

Par **Philippe Vezin**,  
Directeur du Laboratoire LBMC<sup>1</sup> (2007-2015)  
Département TS2<sup>2</sup>

**La mobilité est un enjeu de société. Se déplacer est un acte ordinaire du quotidien que chaque citoyen souhaite plus sûr, plus confortable et plus accessible. Se déplacer est également un moyen fort de socialisation permettant à tous d'éviter l'isolement et l'exclusion.**

## Des moyens et systèmes de transports en mutation

Notre quotidien se transforme avec l'apparition de nouvelles modalités de transports, l'arrivée prochaine des voitures automatisées ou autonomes, l'émergence des modes doux et l'accroissement de l'usage des transports collectifs. Savoir accompagner ces changements fait partie des préoccupations des acteurs du secteur, qu'ils soient politiques, industriels ou académiques. La complexité du système à étudier, qui doit absolument prendre en compte l'individu et ses particularités, ne pourra être appréhendée dans son ensemble que par un recours massif à la simulation numérique et la virtualisation que permet la puissance informatique.

## La complexité de l'être humain prise en compte dans les modèles

Modéliser l'homme, au centre de ce système, reste aujourd'hui un réel challenge scientifique, ne serait-ce que dans sa dimension physique et biomécanique<sup>3</sup>. En effet, les différences, les variabilités morphométriques<sup>4</sup>, physiques et mécaniques sont importantes d'un individu à

l'autre. Ces propriétés évoluent également dans le temps sous l'effet de vieillissement voire simplement sous l'effet de la physiologie comme l'état de santé à un moment donné.

De plus, les diverses composantes de la mobilité physique d'un individu, ou les divers événements pouvant ponctuer son déplacement, nécessitent des approches de modélisation multiples. C'est pourquoi aujourd'hui, les chercheurs du LBMC<sup>1</sup> développent différentes approches de modélisation numérique de l'être humain afin de fournir à ceux qui en ont besoin (concepteurs de véhicules, chirurgiens, etc.) des outils d'évaluation et de prédiction du comportement biomécanique de l'humain. La variabilité inter et intra individu est prise en compte dans ces modélisations.

Ces outils permettent de construire des modèles spécifiques représentant le plus fidèlement le patient. Ils viennent ainsi en appui à la chirurgie post traumatique ou pathologique. D'autres approches peuvent être utilisées pour la conception d'un équipement de protection ou d'un habitacle de véhicule (ergonomie) afin que celui-ci soit adapté au plus grand nombre.

## De nouveaux outils pour anticiper les déplacements

Chacune de ces applications requiert son propre modèle. Ceux-ci sont utilisés tout au long du cycle de déplacement et permettent de mieux anticiper celui-ci. De la simple marche, premier mode de déplacement, jusqu'à la réparation post accident, la simulation biomécanique raconte l'histoire de votre déplacement.

Tout d'abord, vous rendre jusqu'au mode de transports choisi, accéder et s'installer dans ce véhicule. Cet acte pourrait être plus ergonomique et confortable grâce à un nouveau design qui inclue également les caractéristiques des individus à mobilité réduite.

Le véhicule et les systèmes embarqués, grâce aux outils de simulations pré crash, pourront également être pensés pour mieux anticiper une collision au cours d'un éventuel accident.

Les modèles de prédiction des blessures permettront le développement de systèmes de protection efficaces et intelligents afin de réduire au maximum la dangerosité du choc.

Enfin, votre modèle patient-spécifique permettra aux chirurgiens une meilleure évaluation pré et post-opératoire pour optimiser l'opération et la rééducation éventuelle.

1. LBMC : Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs

Le Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs est une unité mixte de recherche de l'Ifsttar et de l'Université Claude Bernard  
<http://www.lbmc.ifsttar.fr/>

2. TS2 : Département Transport santé sécurité

3. Mécanique du corps humain

4. Mesure des formes

## Vidéo

### Pourquoi modéliser l'être humain ?

Écoutez Philippe Vezin,  
Directeur du Laboratoire LBMC  
Département TS2 (2007-2015)



Contenus textes  
réutilisables

Photo : Ifsttar

# 1 AMÉLIORER LE CONFORT ET L'ACCESSIBILITÉ DES MOYENS DE TRANSPORTS

Par Xuguang Wang,  
 Directeur de recherche  
 Département TS2<sup>1</sup>, Laboratoire LBMC<sup>2</sup>

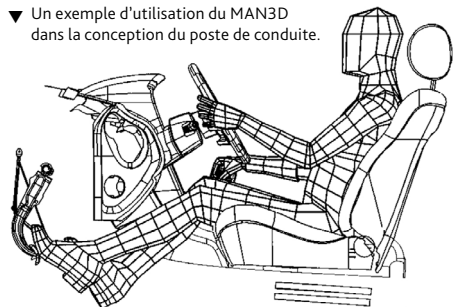
L'équipe « biomécanique<sup>3</sup> pour la simulation ergonomique<sup>4</sup> » du LBMC<sup>2</sup> développe des outils et des méthodes pour observer, comprendre, évaluer et simuler l'activité motrice humaine. Cette activité est principalement étudiée lors de l'utilisation de produits ou de moyens de transports dans la perspective d'améliorer leur confort et leur accessibilité.

Le mannequin numérique, représentation informatisée de l'homme est l'un des outils de simulation, en voie de devenir incontournable, pour évaluer l'ergonomie d'un produit ou d'un poste de travail. Cette évaluation peut être prise en compte dès la phase de conception, réduisant ainsi le cycle de production pour une meilleure compétitivité industrielle.

## Prise en compte de l'ergonomie dans le véhicule

Les mannequins numériques existants, pour la simulation ergonomique, se basent sur un modèle géométrique tridimensionnel qui représente la surface externe du corps et le squelette interne simplifié. Dès la fin des années 80, en collaboration avec le constructeur automobile Renault, le LBMC a développé l'un des premiers mannequins d'Europe, intitulé Man3D. Depuis, de nouvelles collaborations sont apparues avec les constructeurs automobiles (PSA, Renault

▼ Un exemple d'utilisation du MAN3D dans la conception du poste de conduite.

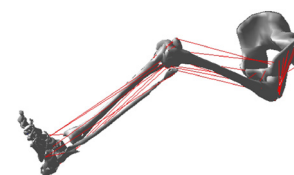
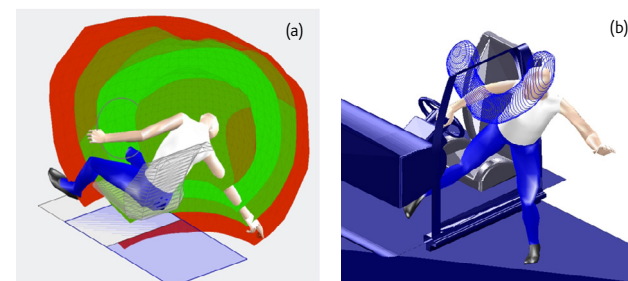


Trucks, et plus récemment Toyota Motor Europe et Ford) dans des projets collaboratifs bilatéraux. À cette occasion, le LBMC a notamment été un acteur majeur pour les deux projets européens d'envergure sur la modélisation numérique de l'humain (REALMAN, 2001-2004 ; DHErgo, 2008-2011, coordination).

## Le mouvement et l'inconfort désormais anticipés

De plus, une nouvelle approche a été développée pour simuler le mouvement et évaluer l'inconfort qui peut lui être associé. À la demande de Renault, cette approche novatrice a été implémentée dans un logiciel nommé RPX<sup>5</sup>. Une importante base de mouvements a alors été constituée, allant du simple geste d'atteinte d'un bouton, sur le tableau de bord, jusqu'à des mouvements d'entrée et de sortie du véhicule. Plus récemment, le modèle numérique du corps humain s'est enrichi de muscles, notamment pour les membres inférieurs. Il peut ainsi estimer des efforts musculaires tels ceux liés à une

action de débrayage. D'autres modèles, actuellement en développement, simuleront une interaction plus précise entre l'humain et son environnement (ex. interférences fesses/siège).



◀ Modèle musculosquelettique du membre inférieur développé au LBMC pour estimer les efforts musculaires lors de débrayage.

◀ Exemples de simulation par le logiciel RPX. (a) Simulation de différentes enveloppes d'atteinte (b) Simulation de mouvement d'entrée et de sortie d'un véhicule avec le volume balayé par un segment du corps.

1. TS2 : Département Transport santé sécurité

2. LBMC : Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs

Le Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs est une unité mixte de recherche de l'Ifsttar et de l'Université Claude Bernard  
<https://lbmc.univ-gustave-eiffel.fr/>

3. « La biomécanique est l'exploration des propriétés mécaniques des organismes vivants ainsi que l'analyse des principes d'ingénierie faisant fonctionner les systèmes biologiques. » Définition Wikipédia

4. « L'ergonomie est « l'étude scientifique de la relation entre l'homme et ses moyens, méthodes et milieux de travail » et l'application de ces connaissances à la conception de systèmes « qui puissent être utilisés avec le maximum de confort, de sécurité et d'efficacité par le plus grand nombre. » Définition Wikipédia

5. Realman Program eXtension, une suite au projet européen REALMAN qui vise à développer un logiciel de simulation de mouvement, réellement utilisable par les ingénieurs de conception de Renault.

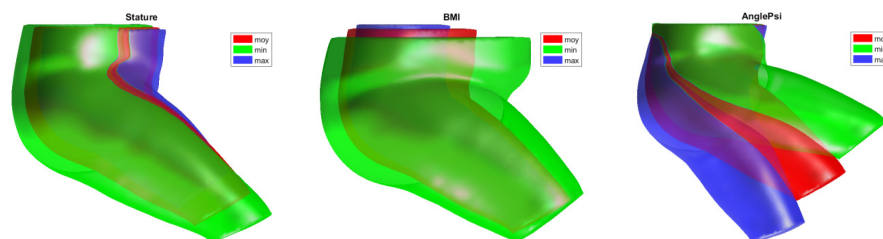


### Modélisation paramétrique du corps humain et l'inconfort d'assise

Comment prendre en compte la variation des dimensions anthropométriques comme la taille et le poids est une des questions posées lors de la conception d'un produit comme le siège automobile ou d'avion. LBMC a développé récemment un modèle paramétrique 3D du complexe bassin-cuisse dans le cadre d'une collaboration avec le fabricant de sièges

d'avions ZODIAC SEAT France. En parallèle du développement du modèle biomécanique du corps humain, LBMC travaille sur les critères d'évaluation ergonomique du siège d'avion dans un projet national financé par DGAC<sup>6</sup> dont l'objectif est de proposer des sièges d'avion du futur plus confortables, plus accessibles et avec un moindre impact environnemental. Un siège expérimental unique a été conçu et fabriqué pour l'étude biomécanique de l'assise.

6. Direction Générale de l'Aviation Civile, projet n°2014 930818



▲ Modèle paramétrique de la surface du complexe bassin-cuisse avec la taille, le poids et l'angle de flexion de la cuisse comme prédicteurs.

### Vidéo

#### Pour aller plus loin

Causse J., 2011. *Analyse cinématique et dynamique du mouvement d'accessibilité à une automobile*. Thèse de doctorat Université Claude Bernard Lyon 1, N° d'ordre 117-2011, Soutenu le 20 juin 2011.

Pannetier R., 2012. *Développement des modèles biomécaniques de l'humain pour l'évaluation ergonomique de commandes automobiles – Application à la pédale d'embrayage*, Thèse de doctorat Université Claude Bernard Lyon 1, N° d'ordre 214 - 2012, Soutenu le 09 Novembre 2012.

Wang X., Barelle C., Pannetier R., Numa J. 2009. *Capacité musculaire des membres inférieur et supérieur appliquée aux commandes automobiles et leur perception d'effort*. Contrat Renault F08-22. 49p.

Wang X., Trabot J. (2011) *Effects of target location, stature and hand grip type on in-vehicle reach discomfort*. *Ergonomics* 54(5), 455-476.

REALMAN: *Integrated Technology for Dynamic Simulation & Advanced Visualization of Human Motion in Virtual Environments*, IST-2000-29357

Savonnet L. Duprey S., Cardoso M., Wang X. *A parametric model of the thigh-buttock complex for developing FE model to estimate seat pressure*. 5th International Digital Human Modeling Symposium, June 26-28, 1017, Bonn, Germany

Beurier, Georges, Michelle Cardoso, and Xuguang Wang. *A New Multi-Adjustable Experimental Seat for Investigating Biomechanical Factors of Sitting Discomfort*. SAE Technical Paper, 2017.

Monnier G., Wang X., Trasbot J., (2009) *RPx: A motion simulation tool for car interior design*. Dans : *Handbook of Digital Human Modeling: Research for Applied Ergonomics and Human Factors Engineering*, ed. Vincent G. Duffy. CRC press Taylor and Francis Group.

Bulle J., 2013. *Étude expérimentale de la variabilité posturale intra-et inter- individus pour la prédiction de la posture de conduite*. Thèse de doctorat Université Claude Bernard Lyon 1, 15 novembre 2013.

DHErgo: *Digital Humans for Ergonomic Design of Products*. European funded Project SCP7-GA-2008-218525

Frayse F., 2009. *Estimation des activités musculaires au cours du mouvement en vue d'applications ergonomiques*, Thèse de doctorat Université Claude Bernard Lyon 1, No d'ordre 338-2009, Soutenu le 15 décembre, 2009.

# 2 PRENDRE EN COMPTE LA RÉACTION DES PERSONNES FACE À UN RISQUE

Par **Thomas Robert**,  
Chargé de recherche  
Département TS2<sup>1</sup>, Laboratoire LBMC<sup>2</sup>

Dans la plupart des cas, une personne face à un risque imminent (déséquilibre, impact à venir, etc.) a le temps de le percevoir et de réagir.

En effet, lorsqu'un accident de la route se produit, le conducteur voit généralement arriver le danger. Il a ainsi le temps d'essayer de freiner pour éviter l'accident ou au moins de se raidir pour mieux encaisser le choc. De même, une personne debout dans le métro peut se retrouver déséquilibrée lors d'un freinage d'urgence. Dans la plupart des cas, elle aura le temps d'essayer de rattraper son équilibre ou bien de tenter de limiter l'impact de cette chute.

Ces réactions, lorsqu'elles sont appropriées, permettent d'éviter l'accident ou d'en limiter les conséquences. En revanche, elles peuvent aussi avoir l'effet inverse et générer un risque supplémentaire. Cela peut notamment se produire lorsqu'un dispositif d'évitement de piétons<sup>3</sup> se déclenche en urgence, alors que celui-ci aurait pu être évité, et qu'il n'entraîne un sur-accident.

L'étude de ces réactions et leur intégration dans les modèles numériques de l'homme est donc un enjeu majeur. Ainsi, le LBMC mène plusieurs recherches afin de mieux identifier les situations à risque mais aussi de mieux protéger les personnes.

## Analyse du mouvement en situations de pré-crash

Comment réagit un piéton, jeune ou âgé, lorsqu'au court d'une traversée de rue surgit un véhicule à grande vitesse menaçant de l'impacter ? Et quelles peuvent être les conséquences de cette réaction ?

Pour répondre à cette question, l'Ifsttar a mis au point l'expérimentation suivante :

Des sujets jeunes et âgés évoluent, à tour de rôle, dans un environnement virtuel qui simule une rue dans laquelle circule un flot de véhicules. Au cours de l'une des traversées piétonnes, le simulateur fait apparaître un véhicule, circulant à vive allure, accompagné d'un bruit d'accident. La réaction des personnes est enregistrée à l'aide d'un dispositif d'analyse du mouvement similaire à ceux utilisés

dans l'industrie des jeux vidéo ou du cinéma d'animation.

Il résulte notamment, de cette expérimentation, un recueil d'informations sur la posture des sujets au moment de l'impact ainsi que leur activité musculaire<sup>4</sup>. Ces informations sont ensuite intégrées aux différents modèles de prédiction de lésion afin d'estimer si ces réactions tendent à diminuer ou à augmenter le risque encouru par le piéton.

## Modélisation des mécanismes du maintien et de l'équilibre

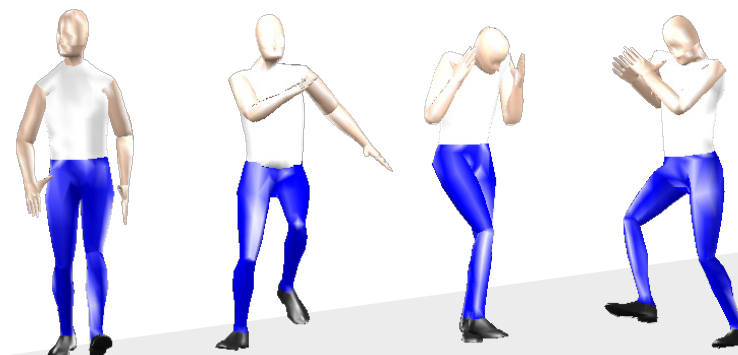
Le maintien de l'équilibre en position debout est une tâche relativement difficile. C'est notamment le cas lorsqu'un individu se situe dans un environnement perturbé tel qu'un véhicule de transport en commun.


Les chutes y apparaissent en effet comme l'une des causes de blessure les plus courantes. La peur de chuter peut également être citée, par les séniors, comme l'un des freins à leur utilisation. Ce constat engendre de nombreuses questions : Quel est le risque de chute encouru par une personne en fonction de ses capacités et de la perturbation d'équilibre qu'elle subit ? Peut-elle se rattraper et de quelle manière ?

Pour y répondre, le LBMC travaille depuis quelques années à la modélisation des mécanismes du maintien et du rattrapage d'équilibre. Les modèles développés sont constitués d'une représentation mécanique du corps humain et de contrôleurs qui déterminent les actions de rattrapage à entreprendre<sup>5</sup>. Ils sont ensuite testés sur des données expérimentales préalablement recueillies lors d'expérimentations sur sujets volontaires.

1. TS2 : Département Transport santé sécurité
2. LBMC : Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs
3. Exemple du système développé par Toyota
4. Anurag Soni, Thomas Robert, Frédéric Rongieras, and Philippe Beillas. Observations on pedestrian pre-crash reactions during simulated accidents. *Stapp car crash journal*, 57:157-183, 2013.
5. Zohaib Aftab, Thomas Robert, and Pierre-Brice Wieber. Predicting multiple step placements for human balance recovery tasks. *Journal of Biomechanics*, 45:2804 - 2809, 2012.

▼ Exemple de différentes postures observées au moment de l'impact virtuel.



 Contenus textes réutilisables

Illustrations : Ifsttar



▼ Modélisation des mécanismes du maintien et de l'équilibre



# 3 RISQUES DE BLESSURE EN CAS D'ACCIDENTS

Par David Mitton,  
Directeur du Laboratoire LBMC<sup>1</sup>  
Département TS2<sup>2</sup>

Dès le début des années 2000, le Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs (LBMC) a été impliqué dans des projets européens visant à développer des modèles du corps humain.

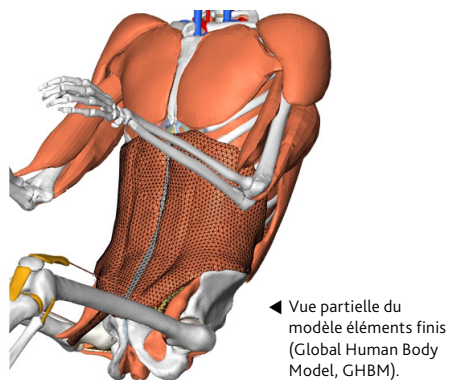
Depuis, l'effort de recherche sur ces modélisations a été porté au niveau mondial avec la mise en place d'un consortium (Global Human Body Model consortium, GHBM) réunissant la plupart des constructeurs automobiles mondiaux. Ce consortium a sollicité des centres de recherches académiques pour développer des parties du corps humain et assembler un modèle de la tête au pied. Reconnu comme « Abdomen Center of Excellence », le LBMC a développé la partie abdominale du modèle.

La première version complète du modèle représente un homme de taille moyenne. Depuis 2013, une licence de ce modèle est disponible gratuitement pour toutes les institutions académiques. Les phases suivantes du projet visent à développer les modèles pour d'autres catégories de la population, afin de couvrir tous les individus (enfants compris).

## Des modèles basés sur les images médicales

Pour construire un modèle du corps humain (intégrant les organes internes comme les os, le cœur, le foie, etc.), les chercheurs se basent sur des images médicales. De cette manière, des modèles morpho-réalistes peuvent être construits. Certaines modalités d'imagerie médicale permettent aussi d'étudier l'influence de la posture des sujets sur la forme et la position des organes internes (Lafon *et coll.* 2010).

Pour les applications liées aux accidents des transports, des modèles type « masculin moyen » sont généralement utilisés. Cependant, afin de représenter différentes catégories de la population, des modèles spécifiques doivent être développés (Poulard *et coll.* 2012). Des recherches, au niveau européen, visent à développer des outils de personnalisation et de mise en position des modèles du corps humain (par ex. projet PIPER). Ils permettront la



◀ Vue partielle du modèle éléments finis (Global Human Body Model, GHBM).

modélisation des corps d'enfants de différents âges et d'adultes de différentes tailles. L'effet de l'âge, au cours de la croissance, puis du vieillissement devront également être pris en compte. Des méthodes non-destructives ayant le potentiel d'explorer cet effet sont évaluées (Mitton *et coll.* 2014).

Être capable de créer des modèles spécifiques est aussi une nécessité pour les recherches dans le domaine de la santé. En effet, les modèles

basés sur l'imagerie médicale facilitent leur personnalisation, pour un patient donné. Il s'agit de l'un des thèmes de recherche du Laboratoire d'Excellence<sup>3</sup> PRIMES (Physique Radiobiologie Imagerie Médicale et Simulation) regroupant 16 laboratoires de recherche de Lyon, Saint-Étienne, Grenoble et Clermont-Ferrand, dont le LBMC.

## Des modèles avancés pour prédire le risque de blessure

Une fois les modèles construits, leur comportement doit être validé sous divers chargements. La réponse des modèles est tout d'abord comparée à des expérimentations sur segments isolés menées en laboratoire (Vezin *et coll.* 2009). Ces confrontations permettent de valider le comportement externe de certaines parties du corps.

Au-delà du comportement externe, des évaluations internes et locales (Helfenstein-Didier *et al.* 2016) sont nécessaires pour évaluer le réalisme des modèles. Les réponses du modèle, en termes de contraintes ou de déformations locales, peuvent être comparées avec les données expérimentales. Cette phase complexe peut permettre, entre autres, de définir des critères de blessures. Les données restent cependant limitées.

Des recherches se poursuivent, au niveau international, pour faire avancer le pouvoir prédictif de ces modèles. L'objectif étant, à terme, de prédire les blessures en cas d'accident et servir d'outils d'évaluation pour différents systèmes de protection.

1. LBMC : Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs
2. TS2 : Département Transport santé sécurité
3. Labex : Outils de financement de la recherche issus des Investissements d'Avenir mis en place par le gouvernement.

## Pour aller plus loin

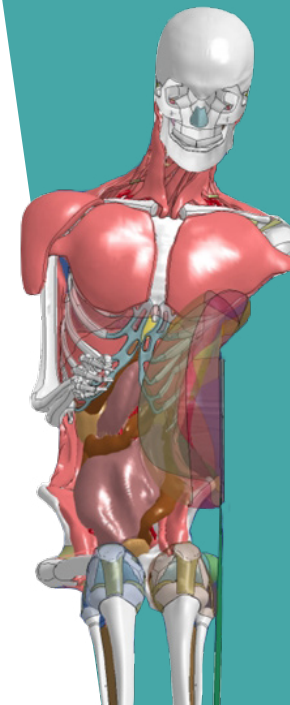
Helfenstein-Didier, C., Rongieras, F., Gennisson, J.-L., Tanter, M., Beillas, P., 2016. A new method to assess the deformations of internal organs of the abdomen during impact. *Traffic Injury Prevention* 17(8):821-6.

Lafon Y., Smith F.W., Beillas P., (2010) Combination of a model-deformation method and a positional MRI to quantify the effects of posture on the anatomical structures of the trunk. *Journal of Biomechanics* 43(7):1269-78.

Mitton D., Minozio J.-G., Talmant M., Ellouz R., Rongieras F., Laugier P., Bruyère-Garnier K., (2014) Non-destructive assessment of human ribs mechanical properties using quantitative ultrasound. *Journal of Biomechanics* 47(6):1548-53.

Poulard D., Bermond F., Dumas R., Bruyère-Garnier K., (2012) Geometrical personalization of human FE model using palpable markers on volunteers. 37<sup>e</sup> Congrès de la Société de Biomécanique, Toulouse, France, 16-19 octobre. Dans *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* 15(S1):298-300.

Vezin P., Berthet F., (2009) Structural characterization of human rib cage behaviour under dynamic loading. *Stapp Car Crash Journal* 53:93-125.



▲ Risques de blessure en cas d'accidents. Simulation d'un choc latéral contre un airbag (Global Human Body Model, GHBM)



# 4 OPTIMISER LA RÉADAPTATION FONCTIONNELLE

Par **Raphaël Dumas**,  
Directeur de recherche  
Département TS2<sup>1</sup>, Laboratoire LBMC<sup>2</sup>

La recherche internationale actuelle et en particulier européenne s'est lancée depuis quelques années dans les défis du patient virtuel et de la médecine numérique<sup>3</sup>. Les modèles biomécaniques<sup>4</sup> du corps humain sont personnalisables à partir de l'imagerie médicale et permettent une meilleure prise en charge des patients. Ces modèles peuvent représenter le squelette, les organes, les cellules avec différents niveaux de complexité.

Pour la médecine physique et de réadaptation, notamment dans le cadre de la récupération d'une fonction motrice optimale suite à un accident des transports, les modèles du système musculo-squelettique constituent le meilleur atout. Ces modèles biomécaniques viennent en support de l'analyse du mouvement, qui est un examen clinique reconnu par l'assurance maladie<sup>5</sup>. Ils favorisent alors une médecine de plus en plus individualisée et une meilleure évaluation du service médical rendu.

Cela peut être le cas pour une personne amputée ou blessée au niveau de la moelle épinière. En effet, le choix et le réglage les plus adaptés de la prothèse ou du fauteuil roulant<sup>6</sup> conditionnent fortement le retour à la mobilité et à l'autonomie dans les activités de la vie quotidienne et professionnelles.

## La modélisation biomécanique pour mieux diagnostiquer les capacités fonctionnelles...

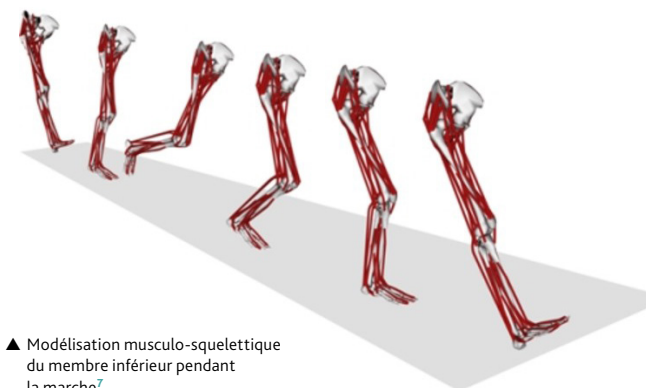
Dans ce contexte, les modèles du système musculo-squelettique donnent accès à un très grand nombre d'informations. Celles-ci ne peuvent pas être directement mesurées mais sont estimées par la modélisation. Ces informations peuvent guider l'équipe de réadaptation (médecins rééducateurs, appareilleurs, kinésithérapeutes, ergothérapeutes, etc.) dans leur diagnostic et dans le suivi d'une personne en situation de handicap moteur.

Le corps humain est ainsi modélisé par un ensemble de segments rigides, de liaisons mécaniques et de câbles. Les informations issues de ces modèles biomécaniques permettent notamment d'illustrer la dépense d'énergie nécessaire pour se déplacer et les efforts auxquels sont soumis les os, les articulations, les ligaments, les tendons<sup>7</sup>. Ces informations apportent ainsi un éclairage unique sur les capacités fonctionnelles d'une personne et, en particulier, celles qui ont été lésées puis restaurées après un accident.

## ... et mieux pronostiquer le retour à la mobilité

L'analyse du mouvement et les modèles du système musculo-squelettique aident donc à optimiser la récupération de la fonction motrice en évaluant de façon objective l'effet immédiat d'un programme de rééducation ou la mise en place d'un appareillage.

Cet examen clinique et la modélisation biomécanique peuvent révéler à cette occasion, les compensations et sur-contraintes dans les membres non lésés, qui provoquent à terme des troubles musculo-squelettiques secondaires. Cette même évaluation, conduite dans les activités de la vie courante les plus contraignantes (comme, par exemple, le déplacement en pente ou en dévers et le passage de seuil), contribue à bien cerner les conditions du retour à la mobilité.



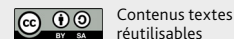
▲ Modélisation musculo-squelettique du membre inférieur pendant la marche<sup>7</sup>.

1. TS2 : Département Transport santé sécurité
2. LBMC : Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs
3. L'Ifsttar est membre du VPH Institute qui promeut à l'échelle européenne la recherche biomédicale intégrée.
4. « La biomécanique est l'exploration des propriétés mécaniques des organismes vivants ainsi que l'analyse des principes d'ingénierie faisant fonctionner les systèmes biologiques. » Définition Wikipédia
5. Fiche d'acte abrégée sur l'Analyse tridimensionnelle de la marche sur plateforme de force.
6. Le Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs a participé à un projet de recherche national financé par l'ANR. Cette initiative a conduit à l'édition d'un livre sur les choix et les réglages du fauteuil roulant manuel. Plus d'infos sur ce livre.
7. Un modèle musculo-squelettique du membre inférieur a été développé au Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs par Florent Moissenet, Laurence Cheze, et Raphaël Dumas et validé avec des mesures sur patients portant une prothèse de genou instrumentée.

### Pour aller plus loin

- Cheze, L. *Biomécanique du mouvement et modélisation musculo-squelettique. Techniques de l'Ingénieur, MED8050, 2014.*
- Cheze, L., Moissenet, F., Dumas, R., 2015, *State of the art and current limits of musculo-skeletal models for clinical applications, Movement and Sports Sciences - Science et Motricité, 90, EDP SCIENCES, pp. 7-17*
- Moissenet F., Cheze, L., Dumas, R., 2014. *A 3D lower limb musculoskeletal model for simultaneous estimation of musculo-tendon, joint contact, ligament and bone forces during gait. Journal of Biomechanics 47(1): 50-58.*
- Moissenet, F., Cheze, L., Dumas, R., 2017. *Individual muscle contributions to ground reaction and to joint contact, ligament and bone forces during normal gait. Multibody System Dynamics, 40(2), 193-211.*

“ Le corps humain est ainsi modélisé par un ensemble de segments rigides, de liaisons mécaniques et de câbles. ”



Illustrations : Ifsttar

Article mis à jour en septembre 2017



# 5 ADOPTER LES TESTS VIRTUELS

Par Jean-Pierre Verriest,  
Chercheur émérite  
Département TS2<sup>1</sup>, Laboratoire LBMC<sup>2</sup>

“Les modèles numériques de l'être humain ont atteint désormais un stade de développement satisfaisant.”

## Des tests réglementaires et consommateurs nécessaires

Un test a pour objet de s'assurer de la conformité d'un produit à un ensemble de spécifications de sécurité et/ou de qualité décrites dans une norme ou un règlement<sup>3</sup>. En matière de protection des personnes, les tests réglementaires consistent par exemple à soumettre un véhicule à des conditions d'accident et à vérifier que le risque encouru par les victimes potentielles est inférieur à une limite spécifiée par la réglementation. Les tests consommateurs (type EuroNCAP) permettent eux de mesurer la performance de protection et d'attribuer des scores (étoiles) aux produits testés. Pour les véhicules automobiles, les tests en vraie grandeur sont destructifs (« crash tests ») et représentent un coût non négligeable. Pour les avions, les tests sur véhicule complet ont un coût totalement rédhibitoire et d'autres méthodes de test sont ainsi développées.

## Les avantages de la simulation numérique

Les progrès de la modélisation mathématique, et surtout le développement continu de la capacité de calcul des ordinateurs, permettent

aujourd'hui de simuler le comportement d'objets de plus en plus complexes, pour des temps de calcul qui restent abordables.

La simulation numérique présente des intérêts, notamment en termes de frais. En effet, ceux-ci concernent essentiellement le développement du modèle du produit testé. Dès lors qu'il est disponible, chaque simulation est réalisée à moindre coût, permettant de tester de très nombreuses situations sans accroissement notable du budget. En revanche, pour les tests physiques, chaque nouvel essai nécessite le même investissement financier.

La simulation numérique est utilisée depuis des années dans l'industrie automobile pour tester les produits en cours de conception. Elle est présente à tous les stades du processus depuis de simples composants jusqu'au véhicule entier en passant par les sous-ensembles. Pour les étapes les plus importantes, des tests réels permettent de valider les résultats de simulation.

Dans la phase de conception, la simulation permet ainsi de réduire notablement le nombre de tests physiques. Les coûts liés à la fabrication de prototypes, destinés à être détruits, sont ainsi limités.

## Quelle place pour l'homme virtuel ?

Jusqu'à présent, un modèle numérique du mannequin mécanique anthropomorphe (utilisé en tests réels) était associé à ce type de simulation.

Les modèles numériques de l'être humain ont atteint désormais un stade de développement satisfaisant<sup>4</sup>. Ils remplaceront donc progressivement les modèles numériques de mannequin mécanique. Cependant, leur validation<sup>5</sup> est beaucoup plus difficile que pour un objet inerte tel un mannequin.

Dans un contexte réglementaire, leur utilisation n'est pas envisagée avant une dizaine d'années<sup>6</sup>. Il faudra auparavant que la simulation numérique avec des modèles de mannequins ait prouvé sa faisabilité et son avantage économique.

1. TS2 : Transport santé sécurité

2. LBMC : Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs

3. Un règlement est une obligation légale qui s'impose à tous tandis que l'adhésion à une norme est une démarche volontaire qui garantit un certain niveau de qualité ou de performance.

4. Un projet mondial réunissant l'ensemble des constructeurs automobiles et des centres de recherche d'excellence a permis de développer la toute dernière génération de modèle numérique du corps humain : <http://www.ghbmc.com/>

5. Le laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs, Unité mixte entre l'Ifsttar et l'Université Claude Bernard Lyon 1, a développé l'abdomen de ce modèle.

6. La validation d'un modèle est basée sur la comparaison de résultats de simulation aux résultats d'essais réels.

7. Un projet européen en collaboration entre des constructeurs automobiles, des éditeurs de logiciels de calcul et des centres de recherche, dont le Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs a récemment permis de poser les bases d'une procédure de tests virtuels.





# Simplifions nous la SCIENCE

Qu'apporte la science à notre société ?

Découvrez les contributions des scientifiques dans nos dossiers thématiques.

**reflex**  
**science**

<https://reflexscience.univ-gustave-eiffel.fr>



Dans une logique d'ouverture à la société, nous avons choisi d'apposer à certains de nos textes la « Licence Creative Attribution - Partage dans les Mêmes Conditions 3.0 non transposé » (CC BY-SA 3.0) afin qu'ils puissent être partagés librement et réutilisés selon certaines conditions.

Service Diffusion des savoirs et ouverture à la société  
Vice-Présidence Recherche  
25, avenue François Mitterrand,  
Cité des mobilités, F-69675 Bron Cedex  
[reflexscience@univ-eiffel.fr](mailto:reflexscience@univ-eiffel.fr)

Retrouvez tous nos contenus  
multimédias sur



<https://reflexscience.univ-gustave-eiffel.fr>

L'Ifsttar est devenu l'Université Gustave Eiffel  
au 1<sup>er</sup> janvier 2020



**Contact :**

Service diffusion des savoirs et ouverture à la société (DSOS)  
Campus de Lyon  
25, avenue François Mitterrand  
Case24  
F-69675 Bron Cedex • FRANCE

**email :** [reflexscience@univ-eiffel.fr](mailto:reflexscience@univ-eiffel.fr)

