



Rapport combiné sur la méthodologie de préparation des modèles et l'analyse des lésions potentielles

Work Package	<i>WP7 : Étude des impacts de la posture des occupants (conducteur et passagers) en mode autonome sur le risque lésionnel</i>
Responsable du WP, affiliation	<i>Philippe Beillas, LBMC, Univ Eiffel-Univ Lyon 1</i>
Livrable n°	<i>L7.3-4</i>
Version	<i>Version 2</i>
Auteur responsable du livrable	<i>Philippe Beillas, Univ. Gustave Eiffel</i>
Auteurs, affiliations	<i>Philippe Beillas, Cyrille Grebonval, Xuguang Wang, Univ. Gustave Eiffel</i>
Relecteurs, affiliations	<i>Philippe Petit, LAB</i>
Statut du livrable	<i>Final</i>

Veillez citer ce document de cette façon :

Beillas P., Grebonval C., Wang X., Poulard D., Petit P., Trosseille X. (2022), Livrable 7.3-4 Rapport combiné sur la méthodologie de préparation des modèles et l'analyse des lésions potentielles. Projet SURCA, financé par la FSR, p 20.

Historique des versions

Version	Date	Auteurs	Type des changements
Version 1	30/05/2022	Beillas	Rédaction initiale
Version 2	07/06/2022	Beillas	Clarifications et corrections

Remerciements

Le Projet SURCA est financé par la dévolution de la Fondation Sécurité Routière, la Délégation à la sécurité routière et pour moitié par les partenaires du projet.



Résumé du projet Surca

Les questions posées par la cohabitation de véhicules de plus en plus automatisés avec des véhicules conventionnels et des usagers vulnérables, cyclistes, piétons, deux-roues motorisés, sont au cœur des préoccupations des décideurs publics, constructeurs, ou spécialistes de l'infrastructure routière et de la sécurité routière. Tous ont l'espoir que ces nouvelles technologies contribuent à améliorer la sécurité routière. L'objectif global du projet « Sécurité des Usagers de la Route et Conduite Automatisées, SURCA » est de contribuer à une meilleure intégration de la Conduite Automatisée dans la circulation actuelle.

Les partenaires du projet (Ifsttar, DSR, Ceesar, Cerema, Vedecom, Lab), ont ainsi comme objectif d'identifier quelles interactions existent et quelles stratégies pertinentes sont mises en place par les conducteurs pour proposer des recommandations aux concepteurs de véhicules autonomes sur les besoins en termes d'interactions et en termes de comportement du véhicule autonome. Pour cela, il est prévu d'analyser des bases de données existantes sur la conduite des véhicules conventionnels et d'identifier les facteurs qui peuvent expliquer des comportements différents.

Les connaissances issues de ces bases seront utilisables pour simuler l'introduction de la conduite automatisée de niveaux 3, 4 et 5, avec des taux de pénétration faibles. La gestion des interactions avec les autres usagers doit être réalisée dès que le véhicule peut évoluer en autonomie sans supervision du conducteur, quelles que soient la durée et les sections sur lesquelles cette automatisation sera possible. En cas de taux de pénétration très important, d'autres types d'interactions risquent de se mettre en place et devront alors être étudiés.

Ce projet est articulé autour de deux sous-thématiques :

- L'identification des scénarios d'interaction entre véhicules autonomes et autres usagers de la route (véhicules conventionnels, deux roues motorisés, cyclistes, piétons), avec un focus particulier sur les personnes âgées :
 - Étude des situations de négociation où les conducteurs gèrent cette interaction humaine, à partir de bases de données de conduite conventionnelle, et en utilisant des éléments difficilement émis et perçus par les systèmes automatisés (regard, connaissance a priori d'intention, etc.),
 - Étude de la réaction des autres usagers face à un véhicule autonome alors que son conducteur est absorbé dans une tâche annexe,
 - Identification des besoins de communication du véhicule autonome en phase active avec les autres usagers,
 - Analyse des besoins des usagers âgés et acceptabilité sociétale du véhicule autonome.
- L'étude des impacts de la posture des occupants (conducteur et passagers) d'un véhicule en mode autonome sur le risque lésionnel :
 - Choix des scénarios de simulation : positions des occupants, conditions de choc (lors de la réalisation de tâches annexes) et systèmes de retenue,
 - Évaluation des lésions potentielles par simulations numériques en fonction des systèmes de retenue (par ex. déploiement d'air bag),
 - Recommandations en termes de postures acceptables selon les différents systèmes de retenue.

Table des matières

1	INTRODUCTION	5
2	OBJECTIFS ET APPROCHE GLOBALE DE L'ÉTUDE	6
3	MÉTHODOLOGIE	7
4	PRINCIPAUX RÉSULTATS DE SIMULATION	13
5	DISCUSSION ET PERSPECTIVES	18
6	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	20

1 INTRODUCTION

L'automatisation des véhicules pourrait libérer les conducteurs de toute tâche de conduite. Ceci ouvre des perspectives en termes d'activités à bord (ex : se reposer, dormir, travailler) et d'agencement de l'habitacle afin de faciliter ces activités (ex : siège orientable ou inclinable). Des concepts d'agencement ont déjà été publiés par divers constructeurs (ex : Figure 1). Comme les moyens de protection en cas d'accident sont actuellement conçus et évalués pour des postures assises standardisées, de tels changements d'habitables et de postures pourraient affecter la protection des occupants en cas d'accident. Le Work Package 7 s'intéresse aux lésions qui pourraient être associées à ces changements. Une approche prospective par simulation numérique à l'aide d'un modèle d'être humain a été sélectionnée. Une matrice de simulations a d'abord été développée (Livrable 7.1, [1]) suite à une revue des postures plausibles et d'intérêt (Livrable 2.6, [2]). Une méthodologie pour la mise en œuvre des modèles a ensuite été développée en plusieurs étapes, dont la mise au point d'un cockpit générique (Livrable 7.2, [3]), des simulations préliminaires pour raffiner le ciblage des postures d'intérêt, une étude expérimentale sur le confort de postures plausibles, le choix des critères lésionnels, la validation des modèles, etc. Trois campagnes de simulation ont été réalisées permettant de mettre en évidence des tendances lésionnelles en fonction de divers paramètres.

La plupart de ces travaux ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Cyrille Grébonval soutenue en décembre 2021. Son mémoire (*Automatisation des véhicules et nouveaux habitacles : postures de confort et risques associés en cas de choc*) décrit avec de nombreux détails chaque étape des travaux [4]. Plusieurs publications correspondant à des points clé de l'étude ont aussi été réalisées dont :

- Un article résumant les simulations en lien avec de pivotement de siège autour d'un axe vertical (SAE Technical Paper [6])
- Un article avec la première série de simulations avec un siège incliné (PLoS One [7])
- Un article présentant les résultats des travaux expérimentaux sur les postures détaillées (Comfort Conference Proceedings [8]).

Plutôt que de répéter le contenu de ces documents dans les livrables 7.3 (méthodologie de simulation) et 7.4 (analyse des résultats), il a été décidé avec le comité de pilotage du projet SURCA de combiner ces deux livrables dans un court rapport de synthèse reprenant les points clé de l'étude et pointant vers les documents plus détaillés. C'est l'objet de ce document (livrable 7.3-4). Plutôt que de suivre l'ordre chronologique des travaux, le rapport résume (1) les objectifs globaux de l'étude et la description de l'approche (2) la méthodologie de simulations (3) la synthèse des résultats des trois campagnes de simulation (4) leur discussion ainsi que les perspectives.

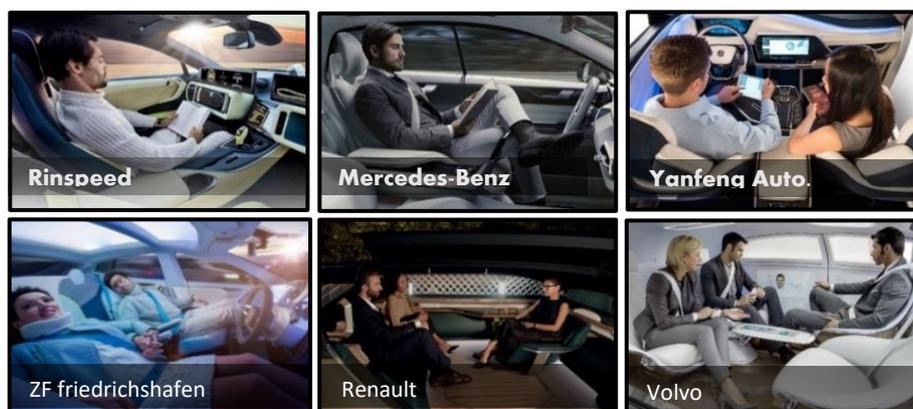


Figure 1: illustration de concepts de futurs habitacles issus de documents de communication de divers acteurs industriels

2 OBJECTIFS ET APPROCHE GLOBALE DE L'ÉTUDE

L'objectif final des travaux est d'étudier les risques lésionnels potentiellement associés à une évolution des postures et habitacles qui pourrait accompagner l'automatisation des véhicules. Les travaux ne visaient bien entendu pas à étudier toutes les configurations possibles ou à concevoir de nouveaux moyens de retenue mais plutôt à examiner les challenges que pourraient poser de nouvelles configurations aux principes de retenue actuellement utilisés (état de l'art). Pour ce faire, une méthode d'évaluation du risque lésionnel utilisable pour ces nouvelles configurations devait être mise en place. Ces travaux méthodologiques avaient pour objectif de mettre en évidence les capacités actuelles des outils d'évaluation, les limites et les besoins de recherche. Une approche science ouverte a été choisie pour ces travaux méthodologiques afin de faciliter la reproductibilité et la réutilisation.

Dès l'origine, il a été décidé de se focaliser sur des postures ou position de siège qui ne sont pas actuellement autorisées dans les véhicules mais qui pourraient être rendues possibles pour un niveau d'automatisation élevé où la reprise en main du véhicule n'est pas attendue de manière urgente. Une revue de la littérature en lien avec les postures et activités d'intérêt a été réalisée dans le Livrable 2.6. Les études revues ont utilisé plusieurs approches dont des questionnaires (demander à des utilisateurs leur intérêt futur) et des observations des pratiques dans des moyens de transport où les occupants sont déjà libérés des tâches de conduite (ex : métro). En combinant cette revue à une autre revue sur les possibles évolutions des accidents dans la période de transition accompagnant l'automatisation progressive de la flotte (Livrable SURCA 7.1), deux classes de postures/positions d'intérêt et configurations d'impact ont été sélectionnées comme illustré en Figure 2 :

- 1) Pivotement, i.e. le pivotement du siège autour d'un axe vertical jusqu'à 30 degrés environ afin de faciliter la discussion entre occupants ou le travail sur ordinateur. Le pivotement d'un angle supérieur (ex : de 45 à 90 degrés) a été écarté car il semblerait difficile à implémenter pour plus d'un occupant dans des largeurs des véhicules actuels¹ et ne serait donc éventuellement introduit que plus tard. De même, afin de limiter l'étendue des travaux, les positions dos à la route ont été écartées en supposant aussi qu'elles seraient aussi introduites plus tardivement. En effet, le retournement d'un siège semble difficile à réaliser alors que le véhicule est en marche à cause des mêmes limitations de largeur.
- 2) Allongement, i.e. l'allongement du dossier afin de faciliter le repos ou même permettre le sommeil. Des angles de dossier jusqu'à 60 degrés éventuellement accompagnés d'un redressement de l'assise ont été étudiés.

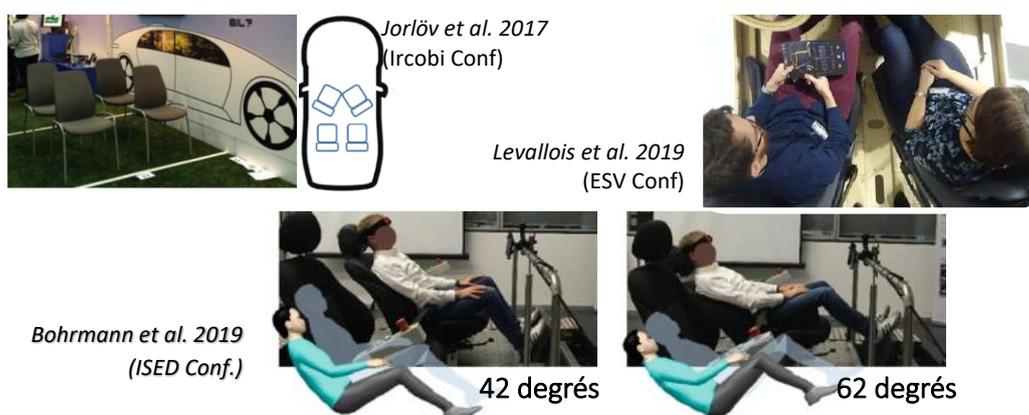


Figure 2: illustrations des deux classes de positions/postures étudiées : pivotement (haut) et allongement (bas).

¹ Cette hypothèse s'est révélée cohérente avec l'étude de Levallois et al. (2019 ESV Conference) publiée après le début des travaux sur le pivotement

Dans les deux cas, seul le cas du choc frontal a été sélectionné car il est supposé qu'il continuerait de survenir, en particulier en lien avec des accidents aux intersections (voir [4] pour les détails). Ce choix a été fait afin de limiter le nombre de simulations tout en permettant de servir de support à l'ensemble des développements méthodologiques. Il pourrait aussi correspondre à la configuration la plus dimensionnante pour les moyens de retenue dans de nombreux cas. Ceci est une limitation de l'étude et il n'est bien entendu pas suggéré que de nouvelles configurations d'habitacle n'auraient pas à être vérifiées en choc latéral ou en choc arrière.

Pour ce qui est du choix global d'approche d'évaluation, les mannequins de choc restent les outils de référence pour l'évaluation de la performance des véhicules et dispositif de retenue à la fois pour la réglementation et les essais consommateurs de type EuroNCAP. Toutefois, les mannequins actuels sont conçus pour être utilisés dans des positions standardisées et ils ne sont pas omnidirectionnels. Leur performance n'est pas établie pour les configurations considérées et même leur positionnement sur un siège incliné est problématique à cause de la raideur de leur colonne vertébrale et de leur bassin. Des efforts d'adaptation sont en cours au niveau international² mais le temps nécessaire à l'évolution d'un mannequin est long et même à ce jour, ces efforts sont loin d'avoir aboutis. Pour ces raisons, le choix d'une approche purement numérique basée sur un modèle humain avait été fait. Les modèles humains détaillés sont aujourd'hui largement utilisés en recherche et développement. Leur niveau de détail anatomique rend possible leur positionnement dans des postures variées. L'évaluation de leur performance au choc est basée sur de très nombreuses configurations d'essais sur sujet d'anatomie au niveau corps entier, régional ou même local. Ce type de modèle est en pratique utilisable pour des chargements dans toutes les directions (frontal, latéral, oblique, arrière, vertical). Le modèle médian du Global Human Body Model Consortium (GHBMC M50), qui est largement utilisé dans l'industrie et la recherche ainsi que par les partenaires du WP7³, a donc été choisi. Sur le plan méthodologique, des travaux spécifiques ont été conduits pour son positionnement dans les postures d'intérêt et pour l'évaluation de sa performance dans des conditions pertinentes pour les nouveaux cas d'études.

3 MÉTHODOLOGIE

3.1 Environnement et conditions de chargement

Afin de favoriser la dissémination et la reproduction des méthodologies, le choix d'un environnement générique représentant les principales fonctions attendues d'une retenue a été fait en lieu et place d'un environnement qui ressemblerait à véhicule réel. Comme seul le choc frontal a été considéré dans ce travail, l'environnement générique est réduit à la représentation d'un cockpit incluant un siège, un airbag et une ceinture 3-points équipée de prétensionneurs et de limiteurs d'efforts. Sa construction est décrite en détail dans d'autres documents [3][4] et le modèle numérique a été publié sous une licence open source et mis en ligne⁴. Il a été considéré comme étant proche de l'état l'art en terme système de retenue pour le choc frontal. Deux profils de décélération ont été utilisés afin de représenter des sévérités différentes. Le premier, qui a été largement utilisé dans des études passées, a une variation de vitesse de 50km/h. Le second, qui est plus sévère, correspond à une variation de vitesse de 56 km/h lors d'un essai EuroNCAP MPDB/XT-ADAC pour une voiture compacte. Une illustration du cockpit ainsi que des deux profils est disponible en Figure 3.

² En particulier sous l'égide de la National Highway Traffic Safety Administration ou de constructeurs de mannequin comme Humanetics.

³ Renault et PSA sont membres du consortium GHBMC et le LBMC de l'Université Eiffel est un des développeurs du modèle depuis 2008.

⁴ Licence de type General Public License v3. Disponible https://gitlab.com/piper-project.org/misc_models/-/tree/master/Environment/SURCA_ENV

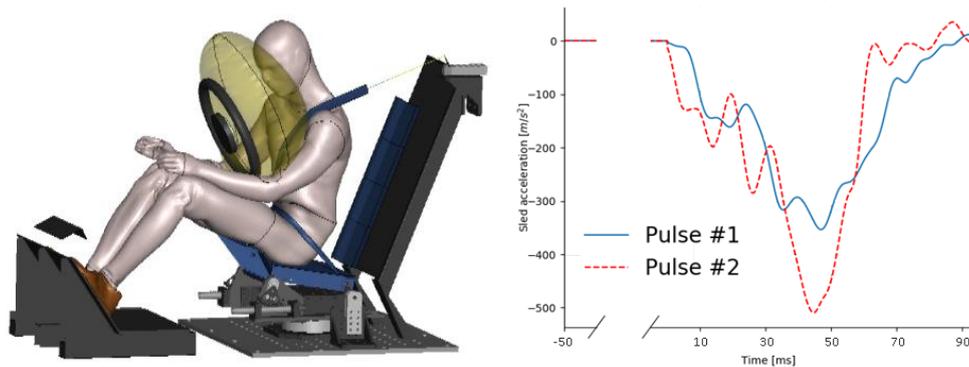


Figure 3: Cockpit générique (gauche) et profils de décélération (pulse, droite). Le modèle générique de cockpit inclut un siège avec une assise articulée pour représenter les fonctions principales et raideurs d'un siège, une ceinture 3-point et un airbag pré gonflé.

3.2 Modèle humain et validation

Le modèle humain utilisé est le GHBMCM50-O, qui est un modèle d'occupant de taille proche du 50^{ème} percentile homme. C'est un modèle dit détaillé, c'est-à-dire représentant sous forme déformable la plupart des structures anatomiques (squelette, organes internes, etc.). La version utilisée a évolué au cours de l'étude afin de bénéficier des améliorations et corrections publiées au fil de l'eau (version 5.0, puis versions 5.1.1 et 6.0 afin de mieux analyser la réponse de la colonne lombaire dont le modèle avait été amélioré entre temps).

Tous les changements de posture du modèle ont été réalisés à l'aide du logiciel open source PIPER⁵. Les détails du processus ont été documentés et les paramètres de définitions posturale calculés par le logiciel (ex : angle articulaire) publiés pour faciliter la reproduction des postures par d'autres utilisateurs de modèle ou leur standardisation (ex : [7]). Les métadonnées nécessaires pour les versions récentes du modèle avec l'outil PIPER ont été mises à jour et publiées sous licence open source dans le cadre de ces travaux⁶.

Pour le scénario de pivotement de siège, il a été supposé que la validation de base du modèle serait suffisante pour une utilisation en choc frontal y compris avec de petits angles. Cette validation inclut diverses configurations en choc frontal et latéral ainsi des configurations vérifiant la stabilité du modèle en choc oblique⁷. L'effort de validation s'est donc porté sur le cas de l'allongement et des mécanismes pouvant contribuer à la réponse. Si aucune donnée de référence en position allongée n'était disponible quand les travaux ont débuté, des résultats ont été publiés au cours de l'étude par University of Virginia puis University of Michigan. Un autre axe de validation a été le comportement en sous marinage qui est potentiellement important pour la configuration allongée comme il sera vu plus tard. Le sous-marinage est un phénomène où la partie de la ceinture qui retient normalement le bassin glisse au-dessus du bassin et comprime l'abdomen, résultant en une faible retenue de la région et potentiellement des lésions des organes internes. En définitive, sept conditions de simulation d'essais sur sujets d'anatomie ont été ajoutées : deux configurations sur siège rigide pour évaluer le sous-marinage, une configuration sur le siège du cockpit pour vérifier le comportement du siège en interaction avec le modèle, deux configurations sur le siège du cockpit correspondant aux conditions de sous-marinage ou non, et deux configurations avec un dossier autour de 40 degrés correspondant aux résultats d'University of Virginia et University of Michigan. L'ensemble des références et des détails des simulations est disponible dans [4] et des illustrations sont en Figure 4.

⁵ www.piper-project.org

⁶ Publication sous license Creative Commons Attribution CC-BY-4.0 sur www.piper-project.org

⁷ GHBMCM50 v6.0 User manual (2021). Elemance LLC.

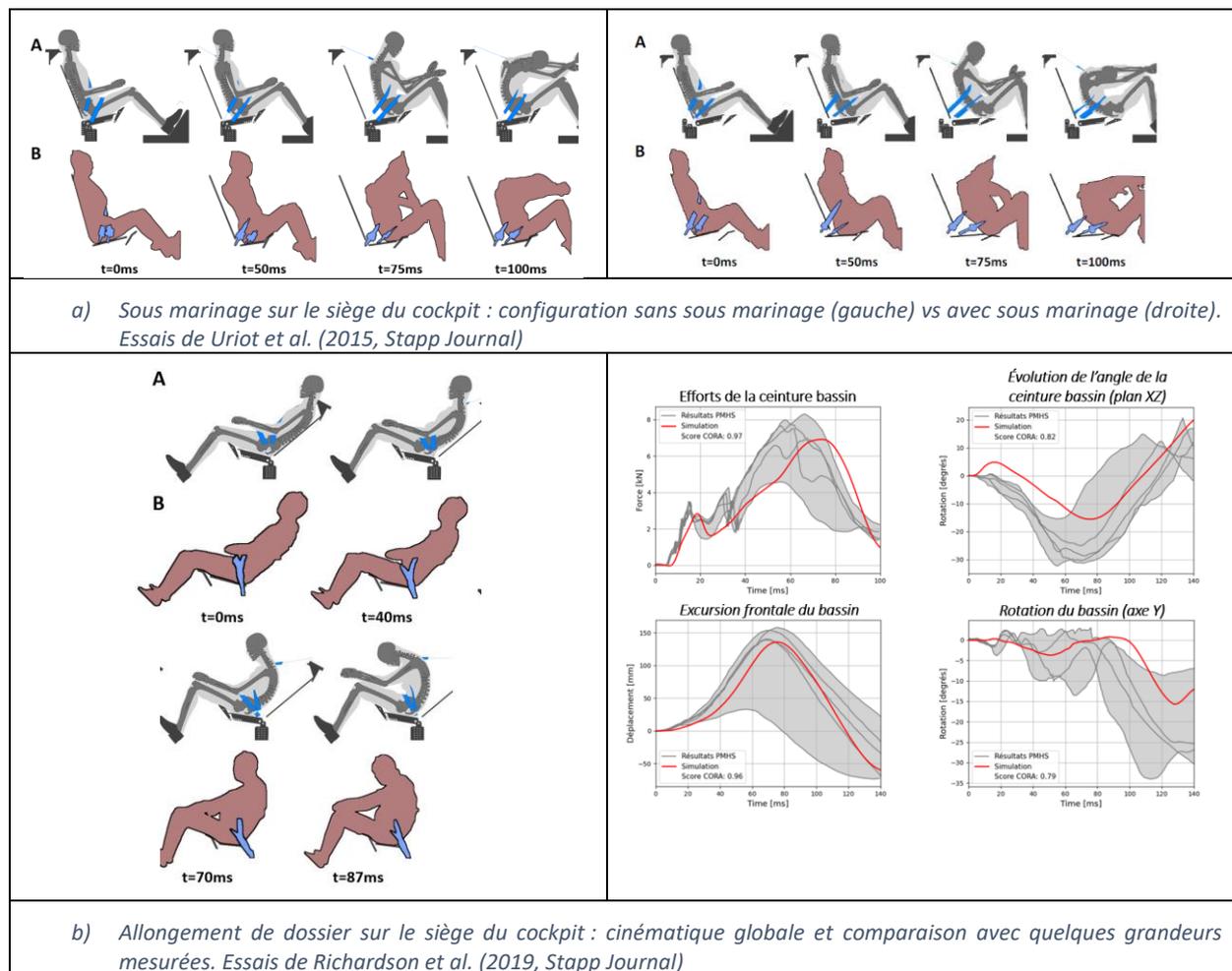


Figure 4: Illustration des simulations de validation ajoutées pour la configuration allongée du modèle. A représente le modèle et B la silhouette d'un sujet d'anatomie. Le modèle a toujours approché la réponse cinématique

Dans l'ensemble, le modèle s'est révélé capable d'approcher les comportements observés lors des essais de la littérature, incluant la réponse cinématique globale y compris l'occurrence ou non du sous-marinage, ainsi que les efforts décrivant les interactions avec les moyens de retenue. Les principaux critères lésionnels considérés (déflexion thoracique et risque de lésion abdominale basé sur l'énergie interne dans les organes) semblent cohérents avec les risques relatifs entre configurations. Les fractures, qui sont aussi explicitement observables dans le modèle, ont aussi été analysées. Si les tendances relatives entre des configurations semblent aussi bien prédites (ex : une configuration conduit à plus de fractures de côtes qu'une autre), le nombre de fractures prédit par le modèle pour les côtes et surtout pour la colonne lombaire semble sous-estimé (Tableau 1). Cette limitation, qui pourrait en partie être liée au fait que le modèle n'est pas spécifiquement conçu pour représenter des sujets âgés tels que souvent utilisés dans les essais sur sujet d'anatomie, sera à garder en mémoire lors de l'analyse. Dans l'ensemble, ces résultats, qui ont été obtenus sans modification du modèle autre que sa posture, ont été considérés comme encourageants. L'évaluation devra bien entendu se poursuivre et être raffinée quand de nouvelles données seront publiées.

Tableau 1: comparaison entre résultats sur sujets d'anatomie (PMHS) et modèle (Simu) pour le sous marinage et les lésions au thorax, lombaire, bassin et foie (score AIS). Les simulations ont été réalisées avec le modèle non âgé pour les lombaires.

Essais		Sous-mar.	Thorax	Lombaire	Bassin	Foie
Luet et al. 2012	PMHS	3/3	-	-	2/3 AIS2	-
	Simu.	Oui	-	-	Aucune	-
Trosseille et al. 2019	PMHS	0/4	4/4 AIS3	2/4 AIS2	3/4 AIS2	1/4 AIS2+
	Simu.	Non	AIS1	Aucune	AIS2	< 5% AIS2+
Uriot et al. 2015 Avant	PMHS	0/4	4/4 AIS4	3/4 AIS2	Aucune	3/4 AIS2+
	Simu.	Non	AIS3	Aucune	AIS2	15% AIS2+
Uriot et al. 2015 Arrière	PMHS	4/4	4/4 AIS4	2/4 AIS2	4/4 AIS2	1/4 AIS4
	Simu.	Oui	AIS4	Aucune	AIS2	62% AIS2+
Richardson et al. 2020	PMHS	1/5	5/5 AIS2+	3/5 AIS2	4/5 AIS2	Aucune
	Simu.	Non	AIS2	Aucune	AIS2	< 5% AIS2
Zaseck et al. 2021 Standard	PMHS	?/3	3/3 AIS3+	Aucune	1/3 AIS2	Aucune
	Simu.	Non	AIS2	Aucune	AIS2	< 5% AIS2
Zaseck et al. 2021 Incliné	PMHS	?/2	2/2 AIS4+	Aucune	1/2 AIS2	Aucune
	Simu.	Non	AIS3	Aucune	AIS2	< 5% AIS2

3.3 Postures et conditions de simulation

3.3.1 Pivotement de siège

Le pivotement a été simulé en conservant la position standard d'assise du modèle (« baseline ») et deux positions additionnelles : (1) une position dite conducteur de fourgonnette (« van driver ») qui est plus verticale que la position standard et proche d'angles observés sur des chaises de bureau et (2) une position dite utilisateur d'ordinateur (« laptop user ») qui est similaire avec seulement des petits changements au niveau du cou et des bras. Il est à noter que la posture VAN correspond approximativement à un véhicule réel de type Renault Trafic. Des simulations ont été effectuées avec le siège pivoté de 10 à 30 degrés. L'ordinateur n'a pas été simulé et l'airbag a été utilisé pour toutes les simulations. Certaines des simulations incluaient un repose pieds. Des illustrations des postures et de la position initiale sont en Figure 5.

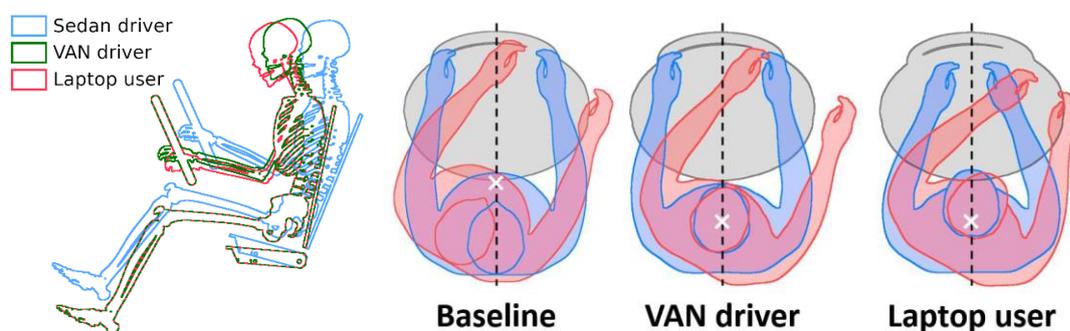


Figure 5: Positions initiales utilisées pour le pivotement de siège. Vue latérale à gauche et vue de dessus avec 0 et 30 degrés de pivotement (droite).

3.3.2 Allongement du dossier

La problématique s'est révélée beaucoup plus complexe dans le cas de l'allongement du dossier que du pivotement. En plus de l'angle dossier, l'angle d'assise peut varier pour des raisons de confort (angle de confort jambes / thorax). L'angle de bassin (qui provoque la cambrure) peut aussi varier entre une position très avachie (dite « slouched », bassin en avant) et très droite (dit « upright » avec le dos très droit). De premières simulations ont pointé vers une sensibilité importante de la réponse du modèle à des variations d'angle d'assise et d'angle de bassin. La définition de paramètres réalistes à partir de données de sujets volontaires est donc apparue comme importante à la fois pour vérifier le réalisme des conditions de simulation ou d'essais sur sujets d'anatomie, et éventuellement pour servir de base à de futures études ou procédures. Une étude sur volontaires a été conduite afin de (1) mesurer les angles d'assise que des participants sélectionneraient pour un angle de dossier imposé (2) documenter avec une précision suffisante la posture (en particulier l'angle bassin) choisie par chaque participant soit après avoir sélectionné un angle d'assise, soit avec un angle d'assise imposé. Dans tous les cas, les participants avaient pour instruction de s'asseoir « confortablement ».

Tous les détails sur le protocole⁸, la méthodologie d'analyse, sa validation et les résultats d'analyse sont disponibles dans [4] et [8]. Le processus et les principaux types de résultats sont illustrés en Figure 6 et Figure 7. L'étude a été conduite sur 18 participants. Un siège expérimental dont le réglage d'assise, de dossier (angle, position, forme) et la position du repose pieds pouvaient être ajustés interactivement par le participant, a été utilisé. Le siège était aussi équipé de capteurs d'efforts et d'un capteur de pression d'assise pour estimer la position des tubérosités ischiatiques. La détermination de la posture a fait l'objet de développements spécifiques : un modèle cinématique personnalisé du participant était d'abord construit en position debout puis repositionné en position assise à l'aide de la position de marqueurs réfléchissants et de points anatomiques palpés dans l'espace. Le modèle incluait un modèle cinématique simplifié de la colonne vertébrale ainsi qu'un modèle surfacique articulé du fémur et du bassin. Ce modèle surfacique était construit à l'aide d'un modèle statistique de forme et de mesures de points osseux par échographie afin de s'affranchir des artéfacts de tissus mous. Après mise en position, le modèle cinématique permettait de calculer des angles posturaux.

Les essais ont mis en évidence une très large gamme d'angles d'assise considérés comme confortable par les participants (Figure 7a). L'angle bassin semble aussi varier avec l'angle d'assise mais de manière beaucoup moins importante et des variations interindividuelles significatives sont aussi observables (Figure 7b). Les postures qui avaient été choisies pour les simulations préliminaires se sont révélées proches de ces gammes de variations. Les résultats expérimentaux ne remettent donc pas en cause la plausibilité des résultats préliminaires. Un outil simplifié de prédiction des angles (qui pourra être utilisé par d'autres), a finalement été développé et des simulations complémentaires ont été conduites avec des angles moyens. In fine, des simulations ont été conduites avec des angles de dossier entre 22 et 60 degrés, des angles d'assise entre 5 et 45 degrés, et pour chaque combinaison simulée, trois angles bassin correspondant à des positions dites « upright », « slouched » et standard (entre les deux) ainsi que l'angle moyen observé expérimentalement.

En plus de toutes ces variations posturales, des analyses complémentaires ont inclus quelques variations de système de retenue (simple vs. double prétension) ainsi que l'utilisation de tolérances de sujets âgés pour la colonne lombaire (avec le GHMBC v6) et un modèle à géométrie obèse.

⁸ Le protocole a été approuvé par le Comité de recherche impliquant la personne humaine (CRPH) de l'Université Gustave Eiffel.

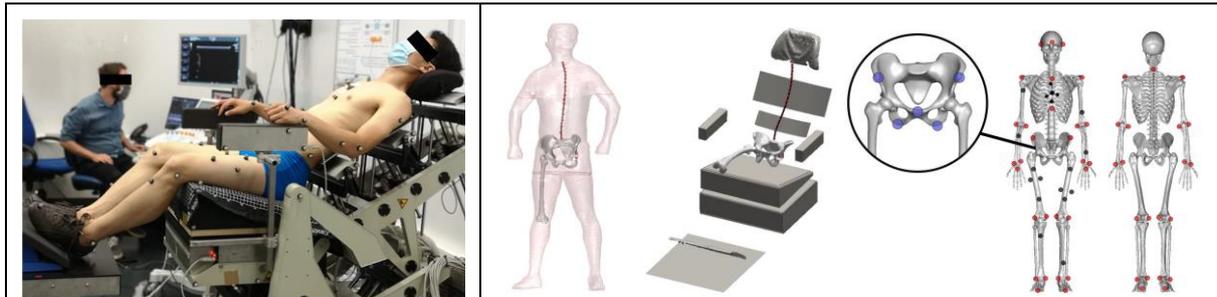


Figure 6: Illustration du protocole expérimental. Gauche : Les mesures ont été effectuées dans un siège multi-ajustable. Droite : Un modèle personnalisé du participant debout (gauche) était ensuite repositionné sur le siège (centre) à l'aide de marqueurs réfléchissants et de points palpés (droite). Le modèle permettait alors de déterminer les angles posturaux.

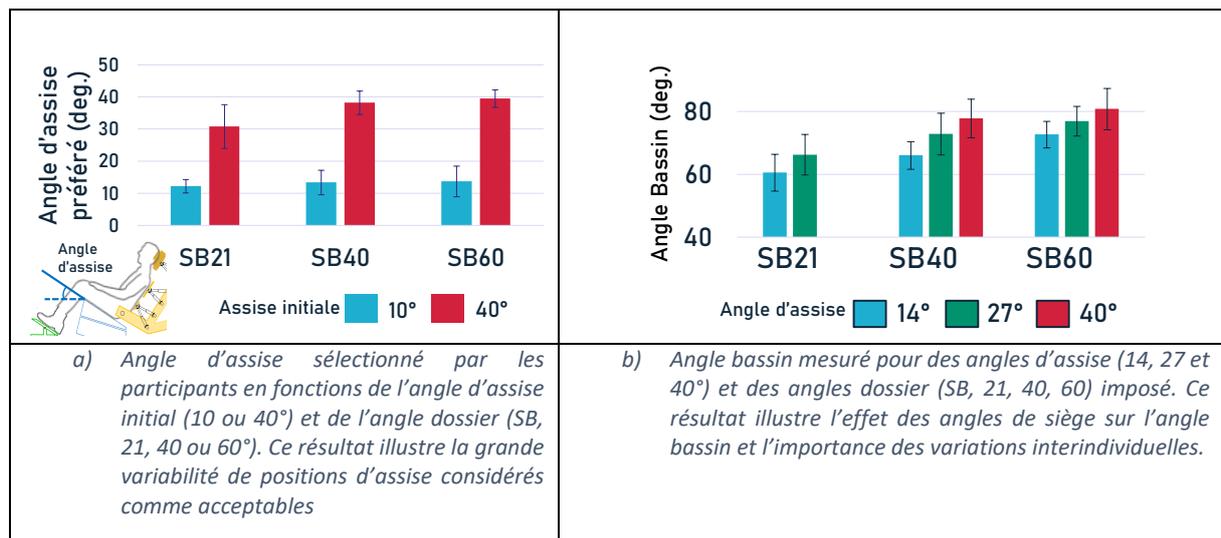


Figure 7: Illustration du protocole et exemple de résultats

4 PRINCIPAUX RÉSULTATS

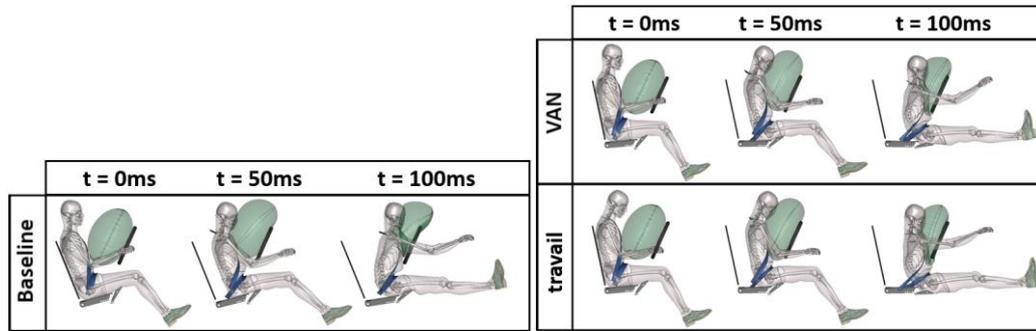
4.1 Pivotement du siège

L'ensemble des résultats des simulations réalisées pour l'étude du siège pivoté sont publiés dans [6] avec des figures et explications additionnelles dans [4]. Ceci inclut les principaux paramètres posturaux nécessaires à la reproduction de la posture. Lors des simulations, la réponse du modèle s'est révélée à la fois sensible à la posture et à l'angle de pivotement (cinématique, critères lésionnels, fractures). Le sous-marinage n'est survenu dans aucune des simulations même si l'excursion du bassin étaient plus grandes pour les postures VAN et travail (Figure 8a). Ceci est en lien avec l'assise plus horizontale

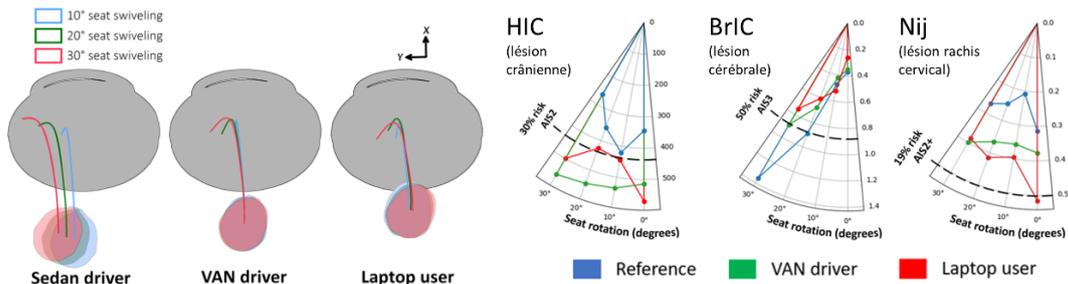
Le choix de l'axe de pivotement et la posture ont affecté la position initiale de la tête et son interaction avec l'airbag. En particulier, la tête s'est retrouvée décalée par rapport au centre de l'airbag dans la posture de référence conduisant à un quasi échappement vers la gauche (Figure 8b). Ceci était associé à une forte augmentation du BrIC, qui est un critère visant à prédire le risque de lésion cérébrale proposé par la NHTSA mais encore en discussion. Un simple ajustement latéral de la position de l'airbag (Figure 8c) permet de réduire la composante latérale de la trajectoire ainsi que l'augmentation du critère BrIC. Si un axe de rotation plus proche de la tête aurait permis de conserver cet alignement, il aurait aussi augmenté l'espace occupé au centre du véhicule par l'occupant, rendant plus difficile la présence de deux passagers. D'autres solutions pourraient être implémentées si nécessaires comme par exemple un déplacement du support de l'airbag ou un plus grand volume d'airbag. Les autres variations de critères étaient plus limitées, avec des valeurs un peu élevées pour les positions VAN et travail que référence, peut être en lien avec la distance à l'airbag.

Un autre point marquant des simulations a été la présence systématique de petites fractures au niveau des ailes iliaques du bassin. Le réalisme de ces fractures peut sembler discutable (voir [6]) mais une augmentation du volume fracturé est clairement visible à 30 degrés (Figure 8d). Ceci a été attribué au chargement asymétrique et avec une composante latérale du bassin par la ceinture. Le siège simplifié utilisé a été conçu pour un chargement purement frontal : son assise est plate et n'inclut aucun support latéral. Ici aussi, un ajout de support latéraux très simplifiés permet de supprimer la tendance observée. Le phénomène pourrait donc être un artéfact lié à la simplification du siège utilisé.

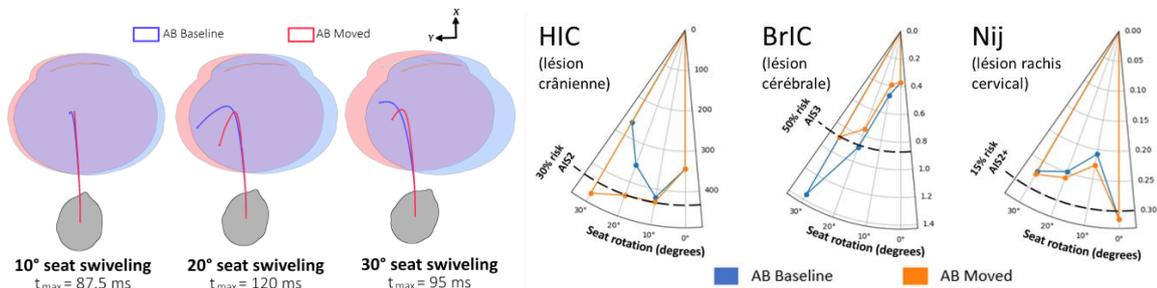
Dans l'ensemble, il a semblé possible de détecter des effets de la posture et du pivotement sur la réponse du modèle (sensibilité). Les effets sont apparus comme étant assez limités (absence de forte variation de la protection) sauf dans deux cas pour lesquels des ajustements assez simples des hypothèses initiales ont réduit les effets négatifs du changement (alignement airbag et support latéral de siège). Si l'approche présente des limitations à la fois en lien avec la validation du modèle (absence de validation dédiée) et la simplification de l'environnement, les résultats ne mettent pas en évidence de changement fondamental des mécanismes de chargement.



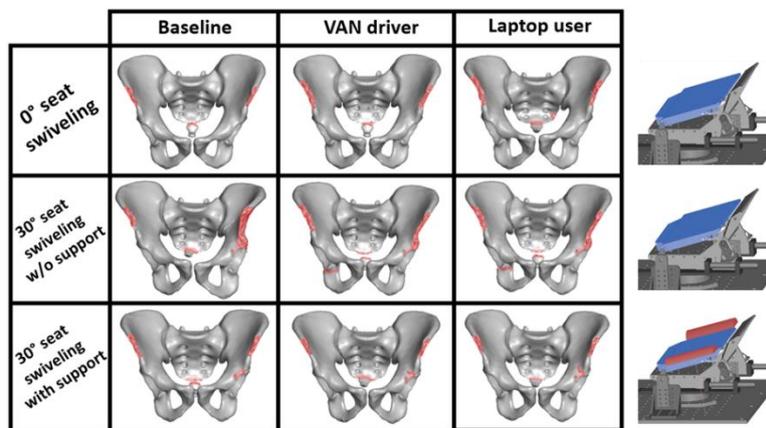
a) Comparaison de la cinématique pour les trois postures sans pivotement.



b) Effet de la posture et du pivotement avec l'axe de rotation choisi : trajectoires (gauche) et valeurs de critères lésionnels pour la tête et le cou (droite). On peut noter une forte augmentation du BrIC associée au quasi échappement de la tête en position sedan/reference.



c) Effet de la posture et du pivotement pour la position standard : un simple ajustement de la position de l'airbag limite l'excursion latérale (AB Moved, droite) et réduit l'augmentation du BrIC à 30 degrés (droite)



d) Fractures de bassin observables sur le modèle. La taille de la zone concernée (rouge) s'accroît avec l'angle (1^{ère} vs. 2^{ème} ligne), ce qui est attribué à la composante latérale du chargement de la ceinture. Le simple ajout de support latéraux (3^{ème} ligne) à l'assise supprime cet effet en contribuant à la retenue du bassin.

Figure 8: Effet du pivotement sur la réponse du modèle (Baseline=Standard=Sedan=Reference)

4.2 Allongement du siège

Si aucun changement significatif des mécanismes de retenue n'a été observé pour le pivotement aux petits angles, la situation est très différente pour l'allongement. Des effets ont été observés sur les mécanismes de retenue (occurrence de sous marinage) ainsi que sur l'équilibre des chargements entre régions anatomiques et les évolutions des critères lésionnels et fractures. Si les observations ont été faites lors de différences campagnes de simulations et que les tendances ont pu être affinées au fur et à mesure de l'avancée des travaux, une grande consistance est présente entre les différentes campagnes. L'ensemble des résultats est donc synthétisé Figure 9 et les mécanismes et résultats associés vont être décrits ci-après.

En premier, le phénomène de sous marinage a été observé dans de nombreuses configurations. Il est favorisé par trois paramètres : (1) un angle bassin avachi (slouched) (2) un angle d'assise faible et un angle de dossier élevé (3) un profil de décélération sévère. Les résultats de simulations sont consistants entre eux et on peut parler d'une zone de régime de sous-marinage définie à partir de ces paramètres (Figure 9 et illustration plus détaillée Figure 10). Le sous-marinage, qui n'est pas considéré comme acceptable dans les procédures d'évaluation actuelles, est associé à une augmentation du risque de lésion d'organes internes et une augmentation du risque de fractures de côtes (Figure 11).

Pour tous les angles dossiers, il existe au moins une configuration pour laquelle le bassin est mieux retenu et le sous marinage ne survient pas. Ceci semble attribuable à un angle d'assise élevé ou une double prétension. Ces mécanismes génèrent de nouveaux types de chargement qui peuvent eux aussi générer des lésions. Un angle de dossier élevé combiné à un angle d'assise élevé pour prévenir le sous marinage augmente les efforts transmis par le bassin à la colonne lombaire, ce qui peut résulter en des fractures à 60 degrés, voire à 40 degrés d'angle d'assise. Une illustration de fracture est fournie en Figure 12. Ainsi, dans les simulations préliminaires à 60 degrés, si l'on exclut le sous-marinage et les fractures lombaires (Figure 9), il ne reste qu'une configuration (bassin upright, 35 degrés d'angle d'assise). Les fractures lombaires semblant sous estimées par le modèle de base (cf. section sur la validation), des propriétés de lombaires correspondant à un modèle de 75 ans ont aussi été utilisées pour les simulations complémentaires et elles résultent en des fractures lombaires pour tous les cas de chargement à 60 degrés (Figure 9). L'équilibre entre les deux mécanismes (sous marinage vs. fracture lombaire) semble donc délicat à trouver pour l'environnement utilisé. Une retenue plus active du bassin grâce à une double prétension comme dans l'étude d'University of Virginia semble prévenir le sous-marinage dans certains cas mais peut aussi générer des fractures de bassin dans le modèle (Figure 13 pour illustration, Figure 9 pour liste) qui semblent plus significatives que celles observées lors de l'étude du pivotement. Pour le cas du modèle obèse, l'inclinaison du dossier à 40 degrés semble augmenter l'excursion du bassin, le modèle étant proche d'échapper du siège (Figure 14).

Ainsi, les résultats des simulations suggèrent que la retenue des occupants lors de l'allongement du siège fait intervenir des facteurs antagonistes (risque de sous marinage, risque de fracture lombaire, risque de fracture de bassin) pour lesquels un équilibre devrait être trouvé pour atteindre une retenue satisfaisante. L'allongement à 60 degrés semble poser un challenge particulièrement difficile à cause du recouvrement des facteurs dans les simulations et, même pour 40 degrés, des adaptations significatives des moyens de retenue et la prise en compte des préférences individuelles pour l'assise (position slouched) pourraient être nécessaires. Si le modèle semble capable de prédire des tendances consistantes et que son comportement a été trouvé acceptable dans les conditions de validation testées, les données de référence disponibles ne permettent pas de calibrer de manière fine la réponse du modèle en termes d'équilibre entre risques de sous-marinage, fracture lombaire et fracture de bassin. Des travaux complémentaires seront donc nécessaires quand de telles données seront disponibles pour confirmer ces tendances.

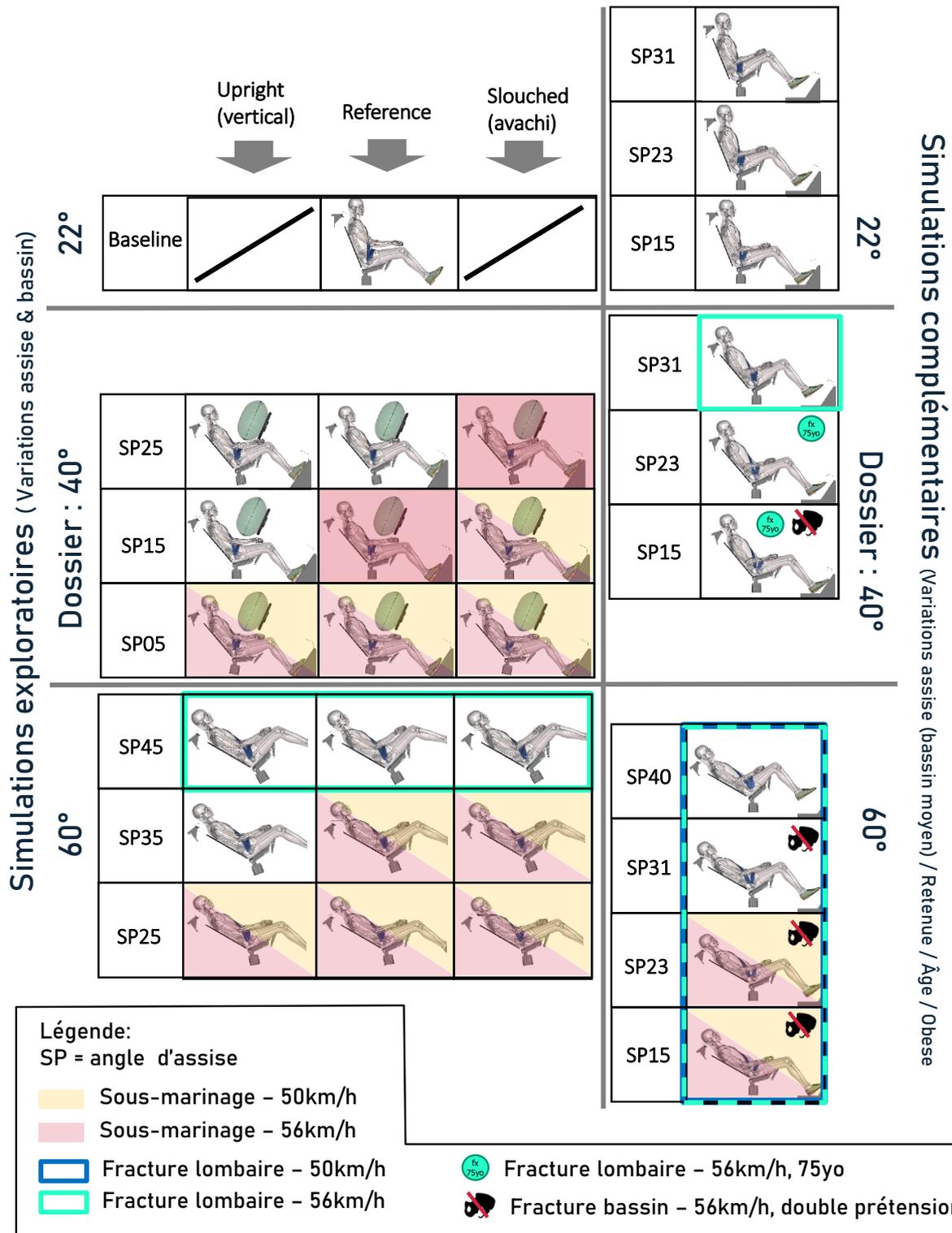


Figure 9: Vue d'ensemble des résultats de simulations. À gauche : simulation préliminaires (avec trois angles de bassin supposés par angle d'assise). À droite : simulations complémentaires avec un angle bassin (moyen issue des essais), de la double prétension pour la ceinture bassin (retenue), un modèle à la colonne lombaire âgée (propriété pour 75 ans), et un modèle obèse. Se référer au texte et aux figures suivantes pour des illustrations des mécanismes et des lésions.

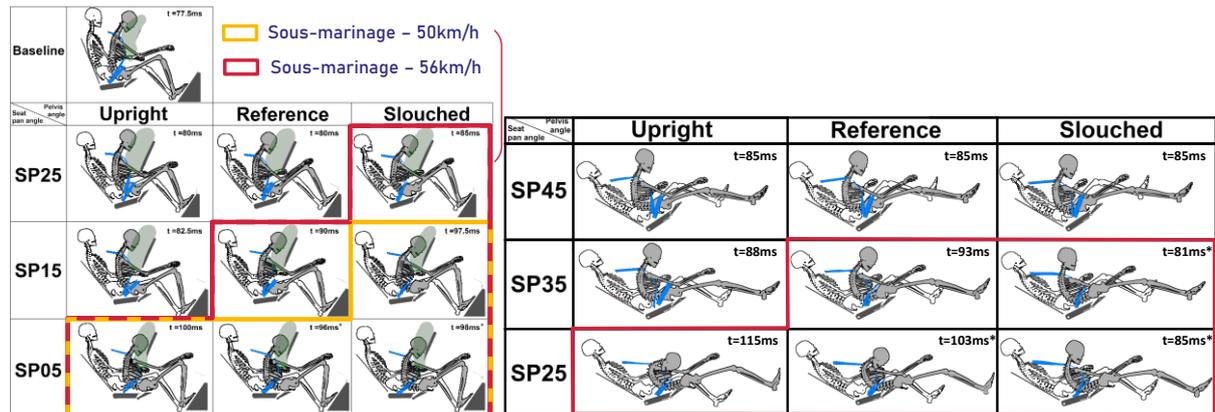


Figure 10: Position initiale et finale dans les simulations préliminaire et indication du sous-marinage (détaillé par profil de décélération pour 40 degrés d'angle dossier). À gauche : 40 degrés d'angle dossier. À droite : 60 degrés.



Figure 11: Prédiction du risque lésion au foie et aux côtes pour les simulations préliminaires à 40 degrés d'angle dossier. Les conditions de sous marinage sont hachurées.

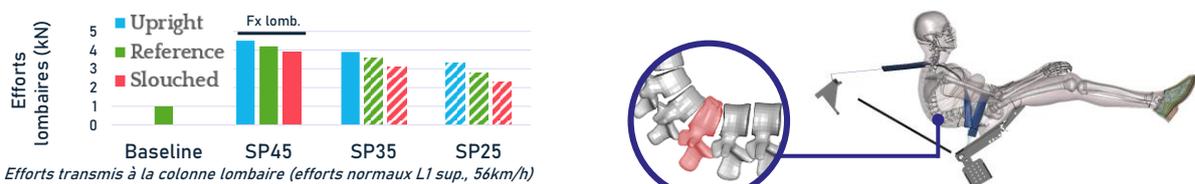


Figure 12: Chargement appliqué aux lombaires en fonction des angles d'assise à 60 degrés d'angle dossier (gauche) et exemple de fracture lié à un mécanisme de compression et flexion (droite). Les conditions de sous marinage sont hachurées.

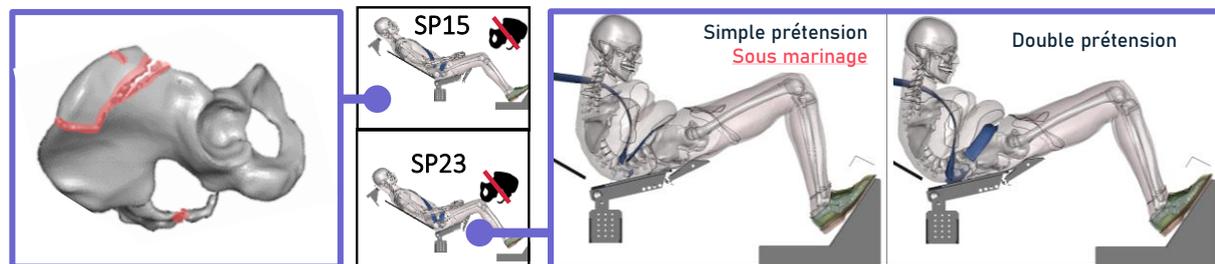


Figure 13: Exemple d'effet du double prétensionneur sur des simulations complémentaires à 60 degrés. Si la double prétension permet parfois d'empêcher le sous marinage en améliorant la retenue du bassin, elle peut aussi générer des fractures du bassin

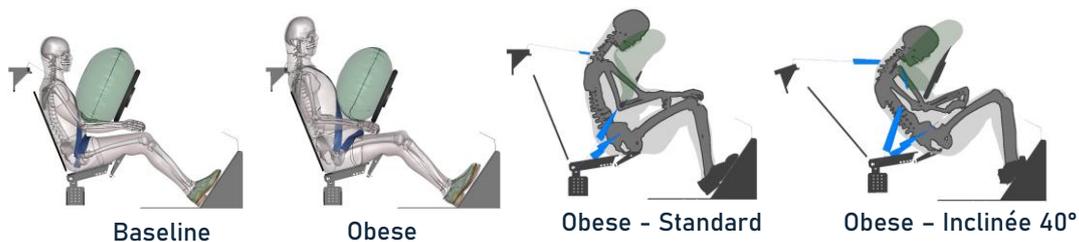


Figure 14: Exemple de simulation avec modèle obèse. L'inclinaison du dossier résulte en un accroissement de l'excursion du bassin (qui est proche de tomber du siège, à droite)

5 DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Les travaux ont permis d'étudier par approche numérique les changements, en termes de mécanismes de retenue et de lésions potentielles, qui pourraient résulter de l'introduction de nouvelles postures et habitacles. Les travaux étaient focalisés sur la rotation axiale de petite amplitude et l'allongement de grande amplitude du siège en choc frontal. La méthodologie mise en place pourrait être appliquée à d'autres configurations. Une procédure numérique a été développée et mise en œuvre. Elle combine un modèle humain détaillé, une approche de positionnement basée sur des outils open source et un cockpit générique publié en open source dans le cadre du projet. Une approche ouverte a été utilisée afin de faciliter la reproductibilité, les comparaisons entre études et la réutilisation dans d'éventuelles procédures.

Pour l'allongement, une étude sur volontaire a permis définir des plages de réglage de siège, des postures de confort et un prédicteur postural qui pourront aussi servir de référence pour d'autres travaux. Les résultats suggèrent que de larges gammes d'angle d'assise pourraient être acceptables en termes de confort. Ceci inclut des réglages pouvant avoir des conséquences lésionnelles très différentes lors d'un choc, et donc des questions de choix pour la conception. Il faudrait toutefois confirmer le confort des postures sur des durées plus longues. La variabilité de position du bassin observée pour un même réglage de siège pourrait aussi avoir à être prise en compte car elle affecte la réponse au choc (risque de sous marinage).

Des travaux de validation du modèle ont été conduits pour l'allongement du dossier. Les principaux mécanismes en jeu (ex : sous marinage) ont été abordés, y compris en utilisant des données en position allongée apparues au cours de l'étude. Le modèle s'est montré capable d'approximer la réponse globale (cinématique, interaction avec les moyens de retenue) sans avoir besoin de modification. Toutefois, sur le plan lésionnel, si les tendances relatives entre conditions de chargement semblent appropriées, les fractures de côtes et lombaires semblent moins fréquentes dans les simulations que dans les données de référence. La prise en compte de l'âge sur la colonne lombaire dans les simulations finales semble réduire l'écart. À l'opposé, des fractures de bassin qui pourraient être des artefacts sont parfois présentes. Ceci sera à étudier/raffiner dans le futur en particulier en mieux considérant les différences entre la population représentée par le modèle et les sujets d'anatomie (âge, etc.).

En se basant sur les résultats des différentes campagnes de simulations, l'approche semble sensible aux variations de position, posture et sévérité du chargement. Une grande consistance peut être observée entre simulations. Des tendances claires peuvent donc être mises en avant.

Pour le pivotement du siège, les effets sont limités. Les principaux changements (dégradation de critère tête et fracture bassin) peuvent être grandement réduits par des modifications simples de l'environnement (support latéral du siège, position airbag). Le cas ne semble donc pas critique.

Pour l'allongement du siège, les effets sont beaucoup plus importants. Les mécanismes de chargement sont affectés et les risques de sous-marinage, de fracture lombaire et de fracture bassin doivent être équilibrés pour une retenue satisfaisante. En effet, une forte retenue du bassin grâce à une double prétension peut conduire à des fractures de bassin, alors qu'une forte retenue du bassin grâce à une assise plus relevée peut conduire à des fractures de lombaires. A contrario, une retenue insuffisante du bassin peut conduire au sous marinage. Le phénomène est exacerbé par la sévérité de la décélération et la position relaxée du bassin. Pour 40 degrés d'angle dossier, il semble exister des combinaisons de paramètres équilibrant ou presque les trois phénomènes. Pour 60 degrés, aucune combinaison satisfaisante de paramètres ne semble émerger dans les conditions de l'étude. Ceci est illustré Figure 15. D'autres solutions de retenue pourraient être nécessaires dans ce cas.

Dans tous les cas, l'équilibre entre mécanismes lésionnels semble assez subtil et les conditions de validation du modèle devraient être raffinées afin de vérifier si le modèle est capable de décrire cet équilibre avec suffisamment de précision. L'absence de données de référence n'a pour l'instant pas permis une telle vérification. Des travaux sont en cours en particulier dans le projet privé ENOP⁹ où l'effet d'angles dossier et assise sera étudié lors d'essais sur sujets d'anatomie. Les résultats posturaux obtenus sur volontaires seront utilisés pour positionner les sujets.

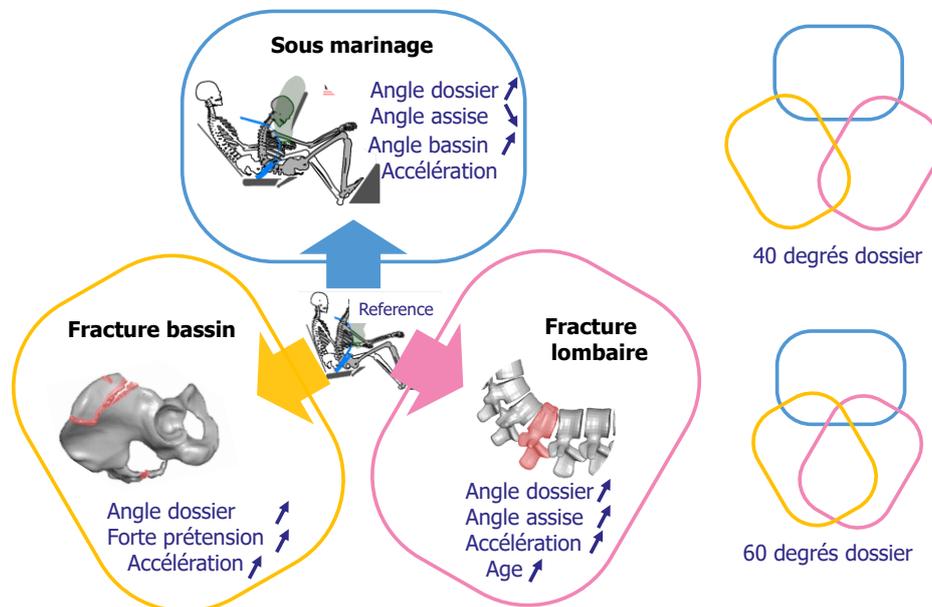


Figure 15: Représentation schématique des mécanismes observés lors des simulations. Divers paramètres étudiés peuvent conduire à l'occurrence de sous-marinage, fracture bassin ou fracture lombaire. L'augmentation de l'angle dossier conduit à réduire l'espace des paramètres pour lequel aucun de ces phénomènes survient et aucune condition n'a été trouvée qui permet d'éviter les trois pour 60 degrés d'angle dossier. Ces résultats sont spécifiques à l'environnement (siège, moyens de retenue) et au modèle utilisé (GHBMC M50).

⁹ Enable New Occupant Positions. Coordonné par le LAB Peugeot Renault.

6 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Des listes de références complètes sont disponibles dans les documents listés ci-après.

- [1] Grébonval, C., (2020), Livrable numéro 7.1 « Scénarios et matrice de simulations sur l'effet de la posture », Projet SURCA, financé par la FSR, 24 p. Disponible sur le site du projet SURCA.
- [2] Grébonval, C., Beillas, P., (2019) Livrable L2.6 Activités adoptées par les occupants de véhicules autonomes, WP2, Projet Surca, financé par la FSR et la DSR, 19 p. Disponible sur le site du projet SURCA.
- [3] Poulard, D., Grébonval, C., Trosseille X. (2020), Livrable L7.2 « Modèle de cockpit générique », Projet SURCA, financé par la FSR, 13 p. Disponible sur le site du projet SURCA. Modèle sous licence open source disponible en ligne https://gitlab.com/piper-project.org/misc_models/-/tree/master/Environment/SURCA_ENV
- [4] Grébonval C. (2021) Automatisation des véhicules et nouveaux habitacles : postures de confort et risques associés en cas de choc. Thèse de doctorat en Mécanique de l'Université de Lyon. Soutenue le 17/12/2021.
- [5] Grébonval, C., Trosseille, X., Petit, P., Wang, X., and Beillas, P. 2019. Occupant response in frontal crash, after alterations of the standard driving position. Proceedings of the International Research Conference on the Biomechanics of Impact, IRCOBI, Florence, Italy, 11th –13th September. IRC-19-57.
- [6] Grébonval, C., Trosseille, X., Petit, P, Wang, X., and Beillas, P. 2020 The Effects of Small Seat Swiveling Angles on Occupant Responses During a Frontal Impact. SAE Technical Paper No. 2020-01-0571. DOI: 10.4271/2020-01-0571
- [7] Grébonval, C., Trosseille, X., Petit, P., Wang, X., and, Beillas P. 2021. Effects of seat pan and pelvis angles on the occupant response in a reclined position during a frontal crash. PLoS ONE. DOI: 10.1371/journal.pone.0257292
- [8] Grébonval, C., Beillas, P., and Wang, X. Experimental investigation of preferred seating positions and postures in reclined seating configurations. Comfort Congress 2021, 2nd – 3rd September.