Analyse cinématique et dynamique du mouvement d'accessibilité à une automobile

Julien Causse

▶ **To cite this version:**

Julien Causse. Analyse cinématique et dynamique du mouvement d'accessibilité à une automobile. Biomécanique [physics.med-ph]. Université Claude Bernard - Lyon I, 2011. Français. NNT : 2011LYO10117 . tel-03270940

HAL Id: tel-03270940
https://theses.hal.science/tel-03270940

Submitted on 25 Jun 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : 117-2011 Année 2011

THESE

Présentée devant

L'UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1

Pour l'obtention du

DIPLOME DE DOCTORAT
(arrêté du 7 août 2006)

Spécialité :

Mécanique option Biomécanique

Soutenue publiquement le 20 Juin 2011

Par

Julien CAUSSE

Analyse cinématique et dynamique du mouvement d'accessibilité à une automobile

Directeur de thèse : Xuguang Wang, Ifsttar
Co-Encadrant : Lisa Denninger, PSA Peugeot-Citroën

JURY

A. Kheddar	Directeur de recherches, CNRS	Rapporteur
P. Pudlo	Maitre de conférence, LAMIH	Rapporteur
L. Cheze	Professeur, UCBL	Examinateur
L. Denninger	PSA Peugeot-Citroën	Examinateur
X. Wang	Directeur de recherches, Ifsttar	Examinateur

Ce travail a été réalisé au laboratoire de Biomécanique et Mécanique des chocs, unité mixte de recherche de l'IFSTTAR[1] et de l'université Claude Bernard Lyon 1, dans le cadre d'une convention CIFRE[2] avec le constructeur PSA Peugeot-Citroën

[1] Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (anciennement INRETS)

[2] Convention Industrielle de Formation à la Recherche

« L'homme ne se borne pas à voir ; il pense et veut connaître la signification des phénomènes dont l'observation lui a révélé l'existence. Pour cela il raisonne, compare les faits, les interroge, et, par les réponses qu'il en tire, les contrôle les uns par rapport aux autres. C'est ce genre de contrôle, au moyen du raisonnement et des faits, qui constitue à proprement parler, l'expérience et c'est le seul procédé que nous ayons pour nous instruire sur la nature des choses qui sont en dehors de nous »

Claude Bernard, 1865, Introduction à l'étude de la médecine expérimentale

REMERCIEMENTS

Ce travail est le fruit d'une collaboration réussie entre l'IFSSTAR et PSA Peugeot-Citroën. Mes premiers remerciements s'adressent à tous ceux qui ont encadré ce travail, et partagé avec moi leur expérience et leur savoir-faire. Leur soutien et leur confiance ont contribué au bon déroulement de cette thèse. J'espère que le résultat final est à la hauteur de la confiance qui m'a été accordée et de leurs attentes.

Cette thèse qui représente le travail d'une équipe toute entière et d'un doctorant porté par sa famille et ses amis, est l'aboutissement de nombreuses rencontres.

Mes premiers remerciements s'adressent au Dr Xuguang Wang, Directeur de recherche au Laboratoire de Biomécanique et de Mécanique des Chocs LBMC, qui m'a offert l'opportunité de travailler dans un domaine que j'affectionne tout particulièrement à savoir l'ergonomie automobile. Par son encadrement, il m'a transmis sa passion pour la recherche mais aussi son sens du partage scientifique et humain.

Je tiens également à remercier le Dr Lisa Denninger, Responsable prestations d'architecture et ergonomie physique au sein du groupe PSA, qui m'a permis de travailler pour ce groupe prestigieux et qui m'a encadré durant cette thèse, me faisant profiter de son expérience et de ses connaissances.

J'exprime ma gratitude au Pr Kheddar et au Dr Pudlo qui me font l'honneur d'être rapporteurs de cette thèse, ainsi qu'au Dr Cheze qui a accepté d'être président du jury, pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail.

Je souhaite aussi remercier les sujets qui ont accepté de participer aux expérimentations effectuées dans cette thèse et aux personnes qui ont largement contribué à la réussite des essais expérimentaux et qui m'ont permis d'obtenir des mesures expérimentales de qualité. Je remercie donc chaleureusement Sophie Serindat et Jean-Luc Russo, Assistante Ingénieur d'exploitation en techniques expérimentales, Yves Caire, Assistante Ingénieur, Richard Roussillon et Alain Gilibert, Techniciens d'exploitation expérimentale,

Je souhaite également remercier les personnes qui ont géré les aspects administratifs de ce projet, Gaelle Da Silva et Geneviève Vernay.

J'ai une pensée toute particulière pour l'ensemble de mes collègues doctorants et stagiaires que j'ai côtoyé et qui m'ont fait progresser tout au long de ma formation. Je pense notamment à Gilles, Elodie, François, Xavier, Fabien, Philippe, Thomas, Sonia, Julien N, Julien L, Romain, et à tous ceux que j'ai oubliés. Je leur adresse tous mes vœux de réussite dans leur vie future.

Je pense également à ma famille, qui a su se montrer patiente et compréhensive tout au long de ces années.

Et enfin, je remercie Perrine pour sa présence, sa compréhension et sa patience au long de ces dernières années.

AVANT PROPOS

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre d'une convention CIFRE, dans laquelle sont impliqués le Laboratoire de Biomécanique et de Mécanique des Chocs LBMC (IFSTTAR) et le constructeur automobile PSA Peugeot-Citroën.

Le LBMC fait partie des partenaires privilégiés du groupe PSA dans le domaine de la conception ergonomique. En effet, cette thèse fait suite à un précédent partenariat réalisé dans le cadre du projet Realman, qui a permis d'aboutir au développement d'un logiciel de simulation de mouvements RPX. Ces différentes collaborations ont permis d'obtenir des résultats significatifs en simulation et évaluation du confort avec le développement de modèle numérique.

Au cours de ces trois années fructueuses et enrichissantes, j'ai eu la chance et le bonheur de collaborer à un projet ambitieux dont le caractère pluridisciplinaire m'a donné l'opportunité d'explorer les fondamentaux de l'anatomie humaine, la mécanique, la programmation informatique, la mise en place d'expérimentations, les statistiques et l'histoire des sciences.

TABLE DES MATIERES :

REMERCIEMENTS 7

AVANT PROPOS 9

TABLE DES MATIERES 11

INTRODUCTION 13

CHAPITRE 1 – REVUE BIBLIOGRAPHIQUE & ETUDES PRELIMINAIRES 17
1. Introduction 19
2. Revue bibliographique 19
3. Etudes préliminaires 27
4. Conclusion & pistes de travail 30
5. Annexes 32

CHAPITRE 2 – PROTOCOLE EXPERIMENTAL & TRAITEMENT DES DONNEES 37
1. Introduction 39
2. Hypothèse de travail et choix des variables étudiées 39
3. Matériels et méthodes 40
4. Traitement des données expérimentales 51
5. Evaluation de la qualité de la reconstruction des mouvements 56
6. Bilan sur les mesures expérimentales et les données reconstruites 58
7. Annexes 59

CHAPITRE 3 – ANALYSE DU QUESTIONNAIRE D'INCONFORT 79
1. Introduction 81
2. Répétabilité sur la note d'inconfort et sur l'identification des hauteurs de toit 81
3. Analyse des réponses au questionnaire d'inconfort 83
4. Identification des hauteurs de toit 90
5. Discussion 94
6. Conclusion 97
7. Annexes 98

CHAPITRE 4 – ANALYSE BIOMECANIQUE DU MOUVEMENT 111
1. Introduction 113
2. Identification des instants clés et analyse de la chronologie du mouvement 113
3. Interactions du conducteur avec l'habitacle lors de l'entrée dans l'habitacle 124
4. Interactions du conducteur avec l'habitacle lors de la sortie de l'habitacle 134
5. Discussion 144

CONCLUSION GENERALE & PERSPECTIVES 149
1. Principaux résultats 151
2. Limitations de l'étude 152
3. Perspectives de travail 152

REFERENCES 155

COMMUNICATIONS DE L'AUTEUR 161

INTRODUCTION

Dans le domaine de la conception automobile, les besoins auxquels doit répondre l'industrie sont en constante évolution : les exigences des utilisateurs en termes d'esthétique, de performances, de sécurité, trouvent aujourd'hui une réponse, et la demande se porte désormais sur d'autres critères.

Parmi ceux-ci, l'évolution du confort d'utilisation du véhicule, dont entre autres la facilité d'accès, joue un rôle primordial (Wegner et al. 2007). Entrer et sortir d'un véhicule est mouvement complexe. Cette tâche demande une attention aux utilisateurs pour éviter la collision avec les éléments de l'embrasure tout en maintenant leur équilibre. Cette tâche quotidienne devient même particulièrement critique pour les personnes âgées et celles à mobilité réduite, leur demandant en particulier un effort important pour s'extraire du siège (Département des Transports Anglais [DOT_85]). Pour le constructeur, le mouvement d'accessibilité représente le tout premier contact de l'acheteur potentiel avec l'habitacle. Il est donc important de lui donner une bonne impression et de lui permettre d'accéder sans difficulté à l'intérieur de l'habitacle.

Pour ces raisons, le rôle de l'ergonomie dans la phase de conception devient essentiel, et il est nécessaire d'intégrer la démarche d'analyse ergonomique au sein du développement, tout comme peut l'être par exemple la sécurité. Jusqu'à présent, les évaluations ergonomiques utilisaient des maquettes physiques grandeur nature et s'appuyaient sur l'expertise des ergonomes et le ressenti d'un panel de testeurs plus ou moins important. Le champ de manœuvre des ergonomes était donc limité par le temps et le coût de fabrication du ou des prototypes et par le fait qu'ils intervenaient dans les dernières phases de développement, une fois le design validé.

La réussite de l'intégration de la démarche ergonomique implique donc de rendre compatibles les outils d'analyse et les outils classiques de CAO. Le biomécanicien assure pour cela le développement de mannequins numériques de l'homme (Digital Human Model en anglais, ou DHM), fidèles à la réalité, capables d'interagir avec un environnement virtuel, et d'évaluer la qualité de cet environnement. Ils sont aujourd'hui notamment utilisés comme indicateurs pour l'évaluation du champ de vision, du volume d'encombrement ou de l'inconfort résultant de l'exécution d'une tâche. En outre, selon Rigel [RIG_06], l'utilisation d'un DHM permet de réduite jusqu'à 50% les couts de conception et de 3 à 5 fois le temps de développement, en comparaison à l'utilisation de maquette physique réelle. Toutefois, leur utilisation n'est pas simple et soulève deux interrogations : comment simuler le mouvement d'un utilisateur donné ? Et comment évaluer l'inconfort qui en résulte ?

Ces interrogations ont d'ores et déjà étaient abordées par de nombreux chercheurs, dont ceux de l'équipe ergonomie du LBMC, qui ont proposé une méthodologie de simulation du mouvement basée sur des mouvements réels observés. Il devient aujourd'hui possible de simuler un mouvement complexe tel que l'entrée et la sortie d'un véhicule par une approche purement cinématique. En revanche l'inconfort ressenti, qui résulte, entre autres, des interactions avec l'environnement et des contraintes biomécaniques internes, n'est abordé que partiellement par l'analyse des angles articulaires sans se soucier des contraintes d'effort. Or nous supposons que l'inconfort est principalement induit par les interactions de l'utilisateur avec l'environnement et les contraintes internes affectant le système musculo-squelettique. Une approche dynamique apparait donc nécessaire pour évaluer l'inconfort.

Cette thèse a donc pour ambition d'approfondir notre compréhension du mouvement d'accessibilité, par l'analyse des interactions entre le conducteur et l'habitacle et de la dynamique du mouvement. La démarche se veut expérimentale. Elle consiste à faire tester diverses configurations de véhicule (sportive, monospace, berline, etc.) à des volontaires de différentes statures et à recueillir le niveau de gêne, la cinématique du mouvement et les efforts externes appliqués sur l'environnement. Le mouvement et le ressenti des volontaires sont alors analysés dans le détail en fonction de la géométrie du véhicule et de l'anthropométrie des volontaires.

A l'issue de ce travail, nous souhaitons fournir aux constructeurs des critères d'inconfort et un certain nombre de recommandations, utiles pour prendre en compte la contrainte de l'accessibilité dans le processus de conception évitant le recours à des expérimentations sur des maquettes réelles.

Le manuscrit est structuré en cinq parties.

Le chapitre 1 traite de l'état de l'art relatif au mouvement d'accessibilité. Depuis une vingtaine d'années, plusieurs équipes scientifiques ont d'ores et déjà travaillé sur ce sujet et ont obtenu un certain nombre de résultats et de concepts faisant aujourd'hui référence. L'analyse bibliographique nous permet de faire le point sur l'évolution de l'état des connaissances actuelles, de manière à identifier les hypothèses de travail.

Le Chapitre 2 décrit le protocole expérimental mis en œuvre et la procédure expérimentale. Il expose également la méthode de reconstruction de mouvements utilisée pour calculer les paramètres biomécaniques tels que les angles et les couples articulaires.

Les données recueillies lors de l'expérimentation décrite dans le chapitre 2 sont analysées dans les deux chapitres suivants.

Dans le troisième chapitre, l'inconfort ressenti par les participants et l'identification des hauteurs de toit sont analysés. Cette étape doit permettre comprendre les sources d'inconfort des utilisateurs et de dégager des hypothèses de travail pour l'analyse biomécanique du mouvement qui suit.

Le quatrième chapitre expose l'analyse de ces paramètres biomécaniques pour comprendre l'influence des paramètres géométriques du véhicule sur le mouvement réalisé et la gêne des conducteurs.

La dernière partie fait le bilan de l'ensemble des travaux, retrace les principaux résultats obtenus et propose des perspectives de travail.

CHAPITRE 1 – REVUE BIBLIOGRAPHIQUE & ETUDES PRELIMINAIRES

1. Introduction **19**
2. Revue bibliographique **19**
2.1. Démarche expérimentale 19
2.2. Analyse du mouvement d'accessibilité 23
2.3. Evaluation de l'inconfort 26
3. Etudes préliminaires **27**
3.1. Localisation des points de contact entre le conducteur et l'habitacle 27
3.2. Paramètres géométriques de l'habitacle influençant l'inconfort 28
4. Conclusion & pistes de travail **30**
5. Annexes **32**

1. Introduction

Cette thèse a pour but de progresser dans la compréhension des mécanismes qui régissent l'inconfort lors de l'entrée/sortie de véhicule. Nous souhaitons dresser ici un état des lieux des principaux travaux relatifs à l'accessibilité automobile, pour mettre en évidence les résultats obtenus d'une part et les moyens et les méthodologies utilisés d'autre part. De plus, deux études préliminaires ont été menées au début de cette thèse pour identifier les paramètres de l'habitacle d'un véhicule ayant un impact sur le mouvement d'accessibilité.

Pour faciliter la lecture de ce document, la Figure 1 présente la nomenclature technique des éléments utilisés pour définir l'habitacle.

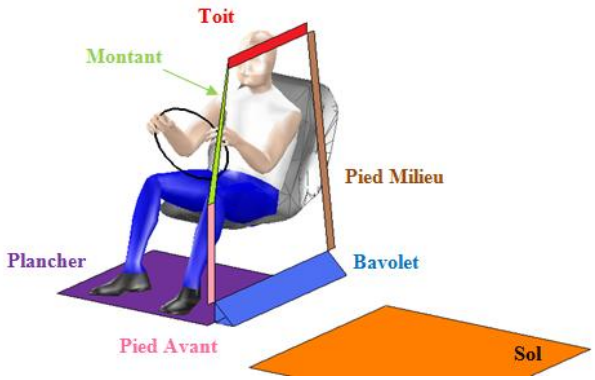


Figure 1 : Définition des éléments caractérisant la géométrie d'un habitacle.

2. Revue bibliographique

2.1. Démarche expérimentale

De manière générale, l'étude du mouvement d'accessibilité fait appel à une expérimentation au cours de laquelle des volontaires reproduisent sur une maquette physique grandeur nature, le mouvement d'entrée et de sortie de véhicule. L'avantage d'une telle expérimentation est de pouvoir faire varier les paramètres géométriques du véhicule, de façon à déterminer leur influence sur le mouvement et l'inconfort perçu. L'objectif ici est de présenter les moyens instrumentaux utilisés lors d'expérimentations précédemment menées, et de montrer leurs intérêts et leurs limites. Le Tableau 7 en Annexes récapitule les caractéristiques des principaux travaux ayant traité de l'accessibilité.

2.1.1. Approche expérimentale

A notre connaissance, deux démarches se démarquent dans la littérature pour l'étude du mouvement d'accessibilité : une étude de configurations particulières existantes et une étude paramétrique par une analyse paramètre par paramètre.

La première approche basée sur des configurations particulières existantes a largement été utilisée par la littérature (Département des Transports Anglais [DOT_85], Gransitzki et al. [GRA_94], Andreoni [AND_04] et Chateauroux et al. [CHA_07]). Elle se veut simple à mettre en place et assure à l'expérimentateur de tester des configurations existantes. L'inconvénient majeur d'une telle approche est qu'il est difficile de généraliser les résultats obtenus et de comprendre l'influence d'un paramètre spécifique sur le ressenti de l'utilisateur ou d'une population en général.

La seconde approche se veut plus explicative, dans le sens où elle tend à comprendre l'influence d'un paramètre spécifique sur l'inconfort. De manière générale, les dimensions des paramètres de l'habitacle sont modifiées les unes après les autres à partir d'une configuration de référence ; c'est

notamment le cas du Département des Transports Anglais [DOT_85], de Petzall [PET_95], de Giacomin et al. [GIA_97], et de Rigel [RIG_06]. Cette seconde approche s'avère toutefois plus difficile à mettre en œuvre car elle nécessite de réaliser un grand nombre d'essais considérant le grand nombre de paramètres potentiels à étudier. Ainsi pour l'accessibilité, Giacomin et al. [GIA_97] identifient 5 paramètres critiques influençant l'inconfort. Si chaque paramètre présente 3 modalités, les participants devront alors tester 243 configurations dans le cas d'un plan factoriel complet. En outre, avec une telle démarche, on ne peut éviter de confronter les participants à des configurations irréalistes dont les résultats ne pourront pas être exploités par les designers.

Le Tableau 1 récapitule les paramètres géométriques ayant été étudiés dans le cas d'une étude paramétrique. Le Tableau 8 en Annexes présente le détail des dimensions des paramètres géométriques étudiées par ces études. On constate que la hauteur de toit, la hauteur de bavolet et la hauteur d'assise ont été quasi systématiquement étudiées.

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des paramètres géométriques de l'habitacle étudiés.

	Hauteur d'assise	Hauteur toit	Hauteur plancher	Hauteur bavolet	Largeur bavolet	Distance pied-avant	Distance pied-milieu
DOT_85B	x	x	x	x	x	x	x
PET_95	x	x		x		x	
GIA_97	x	x		x			
RIG_06		x		x	x	x	x

2.1.2. Echantillons des volontaires étudiés

Par principe, une voiture se doit de satisfaire à la fois l'usager particulier et la population dans sa globalité. En effet, considérant le fait qu'un modèle automobile peut être vendu à des millions d'exemplaires, il est donc important de tenir compte de la grande variabilité entre les individus, variabilité inhérente à leurs caractéristiques anthropométriques mais également motrices. Il convient ainsi d'étudier, de la manière la plus exhaustive possible, toutes les catégories de population (individus jeunes ou âgés, personnes à mobilité réduite, hommes, femmes, etc.).

Tableau 2 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des participants ayant participé à des expérimentations sur l'entrée/sortie de véhicule.

	Conducteur	Passager	Jeune & sain	Agées et à mobilité réduite	Fauteuil Roulant
DOT_85	x			x	x
PET_95		x		x	x
GIA_97		x	x		
AND_04	x		x		
DUF_05	x		x		
Handiman [a]	x		x	x	
LEM_06	x		x		
PUD_06	x		x		
RIG_06	x		x		
CHE_06	x		x		

a : [CHA_07], [AIT_06], [DEB_07] et [AIT_08] utilisent les données récoltées pour le projet Handiman.

Dans la littérature, les études ont privilégié une analyse tenant compte (cf. Tableau 2) :

- soit de la stature, en balayant une population jeune et saine (sans trouble musculo-squelettique) pouvant aller du 5ème percentile femme au 95ème percentile homme en taille. Cela concerne plus des deux tiers des études sur l'accessibilité que nous avons recensé ;
- soit des capacités motrices, en étudiant les effets de l'âge et/ou d'un handicap moteur (on parle alors de personnes à mobilité réduite) sur le comportement et les difficultés rencontrées. Ce type de population est en effet plus susceptible de rencontrer de difficultés pour s'insérer et s'extraire de l'habitacle.

On constate également que les premières études se sont intéressées à l'entrée/sortie du passager avant (Petzall [PET_95]) et arrière (Giacomin et al. [GIA_97]), mais pas au conducteur.

2.1.3. Dispositifs de mesure

Le Tableau 3 répertorie les moyens utilisés par des études traitant de l'accessibilité automobile.

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des dispositifs de mesure utilisés par des études s'intéressant à l'entrée/sortie de véhicule.

	Véhicule réel	Confor-mateur	Caméra vidéo	Système opto-électronique	Capteurs d'effort	Questionnaire d'inconfort
DOT_85	x	x	x			
GRA_94	x		x			
PET_95		x	x			x
GIA_97		x		x		x
AND_04		x		x		
DUF_05	x		x	x		x
Handiman	x		x	x	x	x
LEM_06		x		x		
PUD_06		x		x		
RIG_06		x	x	x		

- **Environnement**

Dans le cadre d'une étude sur le mouvement d'accessibilité, deux types d'instruments peuvent être envisagés pour représenter l'environnement : un véhicule réel, ou une représentation simplifiée et paramétrable d'un véhicule, communément appelée conformateur (cf. Tableau 3).

Les **véhicules réels** sont généralement choisis pour leurs dimensions géométriques particulières et pour le réalisme dont ils font preuve. Toutefois, leur utilisation est confrontée à certaines limites ayant une influence directe sur l'analyse du mouvement et de l'inconfort, à savoir :

- qu'ils engendrent d'importantes pertes de marqueurs lors de la capture de mouvement si un système optoélectronique est utilisé;
- qu'ils ne permettent pas d'étudier l'influence d'un paramètre en particulier sur le mouvement et le ressenti de l'utilisateur.

Pour pallier ces limites, la littérature semble désormais privilégier **l'utilisation d'un conformateur** à géométrie variable, ne représentant que les éléments essentiels de l'habitacle. Cet instrument offre la possibilité de réaliser une étude paramétrique permettant de faire varier les dimensions de l'ensemble des paramètres géométriques de l'habitacle et ce :

- soit pour simuler, à partir d'un unique instrument, aussi bien les dimensions d'un véhicule de petit gabarit, de type Smart, que celles d'un véhicule plus imposant, comme les SUV ;
- soit pour étudier l'influence d'un paramètre de conception en particulier (hauteur d'assise, hauteur de bavolet, largeur d'embrasure, etc.).

En outre d'après Giacomin et al. [GIA_97] et Sternini [STE_95], la représentation simplifiée du conformateur a peu d'incidence sur le réalisme du mouvement réalisé par les utilisateurs. En effet, lors de l'étude de Sternini [STE_95], 90% des sujets n'ont ressenti aucune différence entre le conformateur et le véhicule réel correspondant ; information confirmée par celle de Giacomin et al. [GIA_97], dans laquelle 94% des sujets ont répondu que le conformateur leur semblait suffisamment réaliste (les 6% restants étant gênés par le mécanisme de réglage de la hauteur d'assise qu'ils considéraient comme trop visible).

- **Capture du mouvement**

L'environnement mis en place, l'étape suivante est d'enregistrer le mouvement pour pouvoir l'analyser. Deux approches ont été identifiées dans la littérature : une approche **qualitative** utilisant des caméras vidéo (VHS ou numérique) et une approche **quantitative** à partir notamment d'un système optoélectronique (cf. récapitulatif dans le Tableau 3).

La méthode dite **qualitative** se caractérise par une analyse purement visuelle du mouvement à étudier. Elle consiste à filmer le mouvement de volontaires à partir d'une ou de plusieurs caméras vidéo. Une telle approche a l'avantage d'être simple à mettre en place, peu contraignante (pas de calibration, ni d'installation d'instruments sur le sujet) et de permettre l'enregistrement en extérieur. Cette approche a notamment été utilisée pour les premiers travaux s'intéressant à l'accessibilité (Département des Transports Anglais [DOT_85], et Petzall [PET_95] et Gransitzki [GRAN_94]).

Plus récemment, une étude **quantitative** a été privilégiée, pour étudier l'évolution des trajectoires des segments corporels et des paramètres cinématiques au cours du mouvement. La capture du mouvement est communément réalisée à partir d'un système de mesure optoélectronique, qui enregistre à chaque instant la position de marqueurs installés sur la peau du participant. A partir d'une méthode de reconstruction adaptée, il est alors possible d'animer un mannequin numérique dans son environnement virtuel afin de visualiser les mouvements réalisés et de connaître l'évolution des angles articulaires pendant le mouvement. La principale difficulté à l'utilisation d'un système optoélectronique est qu'un marqueur doit être visible par au moins deux caméras pour pouvoir calculer sa position en trois dimensions. Or, la complexité de certains mouvements, tels que l'accessibilité, peut entraîner le masquage d'un ou de plusieurs marqueurs. C'est pourquoi, un nombre suffisant de caméras est nécessaire pour limiter au maximum la perte de marqueurs. Le système ne permet donc pas d'effectuer des expérimentations avec une maquette trop encombrée ou en extérieur.

En outre, pour une étude de **la dynamique du mouvement** et donc des couples articulaires développés, il faut enregistrer les efforts de contact. La mesure de ces derniers peut s'effectuer à partir de plates-formes de force (pour le sol notamment) et de capteurs de force (p.e. le volant). En effet, les travaux du Département des Transports Anglais [DOT_85], de Petzall [PET_95] et de Chateauroux [CHA_09] ont démontré l'importance des contacts entre les mains et l'environnement. Chateauroux [CHA_09] a ainsi remarqué une forte sollicitation des éléments de l'habitacle (volant, siège, et portière) et suggère que ces contacts aident à la conservation de l'équilibre lors de la phase qui précède l'assise dans le siège. A notre connaissance, aucune étude s'intéressant à l'accessibilité, n'a équipé l'environnement de capteurs pour évaluer l'interaction entre l'habitacle et l'utilisateur et comprendre son rôle sur le mouvement.

- **Relevé de l'inconfort**

La mesure de l'inconfort et l'étude des sources de gêne sont également effectuées au cours de l'expérimentation. Pendant longtemps, les chercheurs ont défini l'inconfort comme étant le « manque de confort », considérant l'inconfort et le confort comme deux entités que l'on peut opposer ; c'est notamment le cas avec l'échelle GCR (« General Comfort Rating scale ») proposée par Shackel et al. [SHA_69] pour évaluer le confort d'un siège. Mais, Zhang et al. [ZHA_96] ont soutenu au contraire que le confort et l'inconfort sont deux entités distinctes. La sensation de confort est notamment provoquée par un facteur psychologique (de bienêtre par exemple). Alors que l'inconfort est associé aux facteurs biomécaniques qui génèrent des sensations telles que la gêne, la pénibilité, la douleur ou la fatigue. L'absence de gêne ne conduit ainsi pas toujours à une sensation de confort. Dans la démarche d'une évaluation objective de l'inconfort, le rôle du biomécanicien se limite à la compréhension la sensation d'inconfort, sans se préoccuper de celle du confort.

Dans le cas du mouvement d'accessibilité, l'utilisation d'un questionnaire a été privilégiée pour relever la perception de l'inconfort. Il est généralement demandé aux volontaires d'**attribuer une note reflétant l'inconfort** ressenti à partir d'une échelle de notation. Par exemple, Petzall [PET_95] demandait aux participants d'évaluer leur inconfort à partir d'une échelle à trois niveaux après être

entrés et sortis du conformateur. Giacomin et al. [GIA_97] ont quant à eux utilisé une échelle à cinq niveaux allant de « très confortable » à « très inconfortable ». Ils utilisent cette échelle pour évaluer non seulement le mouvement réalisé, mais également la gêne sur quatre parties corporelles (tête/cou, bras, dos et jambes). Enfin, pour le projet Handiman, les volontaires devaient attribuer une note pour le mouvement global, pour l'entrée et pour la sortie à partir d'une échelle allant de 0 pour un « inconfort minimal » à 10 pour un « inconfort maximal ». Il n'existe donc pas de méthode bien établie pour l'accessibilité. On peut toutefois noter que Shen et Parsons [SHE_97] ont comparé six échelles couramment utilisées pour l'évaluation de l'inconfort lié à la pression du siège. Il ressort que l'échelle CP-50 (Category Partition Scale) s'avère la plus fiable et la plus répétitive. Chevalot et Wang [CHE_04] ont proposé une version améliorée de cette échelle, qu'ils ont appliquée au geste d'atteinte. Ainsi, au lieu de demander aux volontaires de donner une note numérique allant de 0 à 50, ils leur ont proposé de choisir dans un premier temps une catégorie de réponses parmi les six proposées, puis d'affiner leur réponse avec une note allant de 1 à 10 à l'intérieur de cette catégorie (cf. Figure 2).

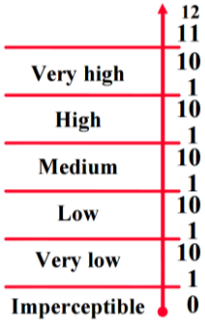


Figure 2 : Echelle CP-50 modifiée utilisée par Chevalot et Wang [CHE_04].

En dehors de l'attribution d'une note d'inconfort, les participants peuvent avoir à **répondre à une série de questions ouvertes ou fermées** concernant les parties du conformateur qui les ont le plus gênés, et les parties de leur corps qui ont été sources de leur gêne. Ceci a été notamment le cas des études de Giacomin et al. [GIA_97] et pour le projet Handiman. Giacomin a ainsi demandé aux volontaires d'identifier « la partie du conformateur qui a été la plus gênante » et « la partie du corps qui a bougé avec le moins de confort ». Dans le projet Handiman, il était demandé d'indiquer par une croix sur une figure représentant un homme de face et de dos « la ou les zones corporelles où une gêne a été ressentie » et de faire de même sur une figure représentant un habitacle pour « les zones de l'habitacle gênantes ».

On peut enfin noter que Cherednichenko et al. [CHE_06] et Chateauroux [CHA_09] précisent que l'évaluation subjective par un questionnaire nécessite une familiarisation pour être utilisée au mieux. Un apprentissage de l'utilisation d'un tel questionnaire s'avère nécessaire en début d'expérimentation.

2.2. Analyse du mouvement d'accessibilité

L'analyse des stratégies de mouvement est le point de départ de la compréhension de l'accessibilité et plus tard de la simulation de mouvement. L'objectif est de référencer les stratégies de mouvement pouvant être utilisées par les utilisateurs et ce qu'ils soient jeunes, âgés ou à mobilité réduite.

2.2.1. Identification des stratégies de mouvement

Deux stratégies principales peuvent être utilisées par le conducteur pour l'entrée et la sortie de l'habitacle (Chateauroux et al. [CHA_09], Ait El Menceur et al. [AIT_08]) :

- la « stratégie à un pied ». Elle est celle qui est principalement utilisée, et ce quelles que soient la configuration et la population étudiée ;
- et la « stratégie à deux pieds » ou « stratégie deux jambes ensemble », qui est privilégiée par les personnes à mobilité réduite, de grande taille, ou parfois pour une assise trop haute.

Ainsi pour le mouvement d'entrée, le Département des Transports Anglais [DOT_85] remarque que 66% des sujets sains, pouvant s'insérer en partant d'une position debout, utilisent une stratégie à un pied. Par ailleurs, Ait El Menceur et al. [AIT_08] constatent que cette stratégie ne peut être utilisée que par des personnes dont la capacité physique leur permet de contrôler leur équilibre pendant leur mouvement. Ils supposent donc que les capacités physiques de l'utilisateur ont une influence sur le choix de la stratégie adoptée. Chateauroux et al. [CHA_11] et Ait El Menceur et al. [AIT_08] remarquent que la stratégie à deux pieds est privilégiée par les personnes âgées.

Pour la sortie de l'habitacle, la stratégie à un pied est également privilégiée par les utilisateurs : la totalité des sujets jeunes et sains d'Andreoni et al. [AND_97], et 73% des participants âgés et à mobilité réduite de Ait El Menceur et al. [AIT_08], l'ont utilisée. La stratégie à deux pieds, qui consiste à pivoter dans un premier temps dans le siège et à sortir lorsque les deux pieds sont posés au sol, est privilégiée dans les études de Chateauroux et al. [CHA_11] et Ait El Menceur et al. [AIT_08] par des personnes à mobilité réduite (p.e. personnes âgées) et/ou de grande taille.

Partant de ces deux stratégies principales, la stratégie de mouvement peut encore être identifiée plus finement en partitionnant le mouvement en sous-stratégies. En effet, au sein d'une même stratégie, de nombreuses différences peuvent encore exister. L'identification de ces sous-stratégies s'appuie sur la position et l'orientation des segments corporels par rapport à l'environnement. Chacune des stratégies et des sous-stratégies proposées pour l'entrée/sortie par Ait El Menceur et al. [AIT_08] sont décrites dans le détail dans le Tableau 9 en Annexes. La Figure 3 illustre les deux stratégies principales identifiées par Chateauroux et al. [CHA_11] pour le mouvement de sortie

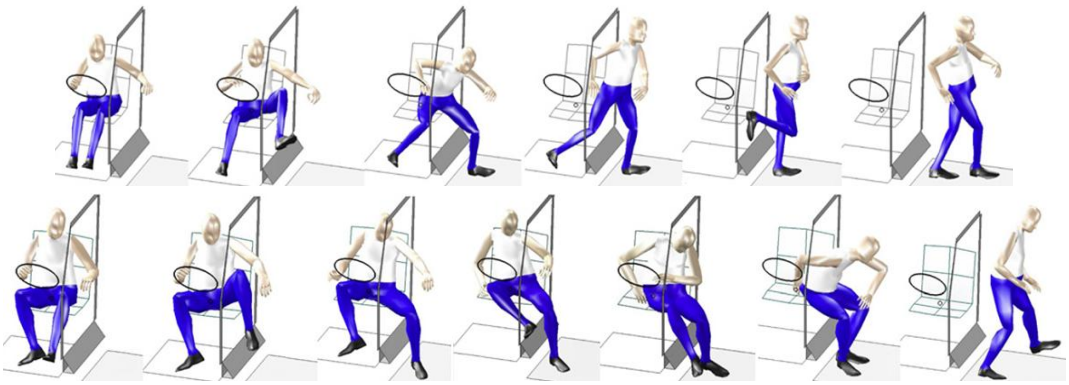


Figure 3 : Illustration des stratégies « jambe gauche en premier » (1ère ligne) et « deux jambes ensemble » (2ème ligne) identifiées par Chateauroux et al. [CHA_11] pour la sortie.

Se rendant compte de la grande quantité de stratégies pouvant être utilisées par le conducteur, certains auteurs ont choisi de segmenter le mouvement en plusieurs phases, pour identifier des stratégies propres à chacune de ces phases. A partir des travaux de Gransitski [GRA_94] et de Petzall [PET_95], trois phases pour l'entrée ont été identifiées:

- Phase 1 : l'ouverture de la portière, qui va contraindre la posture d'entrée de l'utilisateur ;
- Phase 2 : l'insertion dans l'habitacle, qui commence dès lors que la portière est ouverte et se termine lorsque le pied gauche décolle du sol. Gransitski [GRA_94] propose de dissocier deux stratégies au cours de cette phase selon que le sujet fléchisse le dos pour ajuster sa posture suivant la hauteur de brancard (majoritairement privilégiée par les sujets (48%) ou qu'il fléchisse le genou (38% des sujets) pour passer la tête sous le toit ;
- Phase 3 : le positionnement dans le siège quand l'utilisateur positionne sa jambe à l'intérieur de l'habitacle et se met en posture de conduite.

Ces dernières années, il a également été proposé d'identifier les instants clés (Monnier et al. [MON_06] et Chateauroux [CHA_09]). Ils correspondent aux instants pendant lesquels les contraintes cinématiques et dynamiques sont modifiées (p.e. l'instant où l'utilisateur saisit la portière crée un nouveau contact). Il est alors possible de classer les stratégies utilisées et de décomposer les mouvements réalisés, en tenant compte non seulement des trajectoires des segments corporels mais

aussi des interactions avec l'environnement. Chateauroux [CHA_09] propose alors de considérer le mouvement comme une succession de sous-mouvements identifiés à partir des interactions entre le conducteur et l'habitacle. Pour identifier les instants clés, Monnier et al. [MON_06], Chateauroux [CHA_09] et Lempereur [LEM_06] proposent d'utiliser la position des extrémités du corps humain (pieds, mains, tête) et du bassin. Il peut s'agir par exemple pour la sortie (cf. Figure 4) : quand le pied gauche quitte le plancher (2), quand la cheville passe dans le plan de l'embrasure, quand le pied gauche atteint le sol (4) ou encore quand la main prend appui sur le volant.

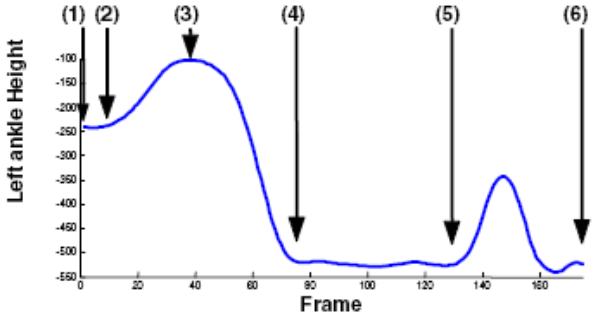


Figure 4 : Identification des instants clés en fonction de la coordonnée verticale du pied gauche pendant la sortie de véhicule (Monnier et al. [MON_06]).

2.2.2. Facteurs influençant le mouvement

Les stratégies identifiées, les chercheurs se sont alors questionnés sur les facteurs géométriques de l'habitacle et anthropométriques du conducteur qui influencent le mouvement. Lempereur [LEM_06] et Pudlo et al. [PUD_06] identifient **l'anthropométrie comme facteur important** dans le choix de la stratégie adoptée. De plus, en s'intéressant au mouvement de la tête et du tronc, Andreoni et al. [AND_04] montrent l'importance de l'anthropométrie sur le mouvement d'accessibilité (Tableau 4) :

- lors de l'entrée, plus le sujet est grand, plus il a tendance à fléchir la tête. A contrario, un sujet de petite taille étend le cou pour éviter de se cogner la tête à l'avant du brancard ;
- lors de la sortie, les grands privilégient une flexion de la tête vers l'intérieur et l'avant. Les petits fléchissent uniquement la tête vers l'intérieur.

Tableau 4 : Orientation de la tête par rapport au tronc de 10 sujets « sains » pour l'entrée/sortie d'une ALPHA ROMEA 155 (Andreoni et al. [AND_04]).

	Entrée	Sortie
Petite Taille	Extension (-25 → -60°)*	Flexion (0 → 6°) + Rotation latérale droite (-14 → -28°)
Grande Taille	Flexion (20 → 42°)	Flexion (31 → 52°) + Rotation latérale gauche (-13 → 12°)

* : - extension + flexion. La position debout étant choisie comme posture de référence.

Le deuxième facteur affectant la stratégie de mouvement d'accessibilité est la **capacité fonctionnelle de l'utilisateur**. Chateauroux et al. [CHA_09] observent que les sujets ont tendance à adapter leurs stratégies de mouvement en fonction de leurs capacités physiques et remarquent par exemple qu'une personne avec une prothèse de la hanche aura tendance pour s'extraire du siège à utiliser une stratégie « fesses en premier » et/ou à s'aider en s'appuyant sur un élément de l'habitacle.

En plus des caractéristiques de l'utilisateur, la géométrie de l'habitacle du véhicule contraint fortement leur mouvement et les obligent à modifier leur stratégie. Elle peut ainsi intervenir de deux manières :

- d'une manière « négative », gênant le conducteur et lui demandant de modifier son mouvement pour éviter la collision avec l'embrasure (p.e. passage de la tête sous le toit) ;
- d'une manière « positive », le conducteur peut en effet faciliter son mouvement en s'appuyant sur l'un des éléments de l'habitacle (p.e. le volant, le siège, la portière).

De nombreux facteurs géométriques peuvent donc intervenir et contraindre le mouvement. Pour définir les plus critiques pour l'entrée/sortie, Giacomin et al. [GIA_97] ont demandé à des volontaires jeunes et sains de tester différentes configurations d'habitacle, et d'identifier pour chacune d'elles les éléments de l'habitacle qui ont perturbé leur mouvement. De ce relevé, ils ont pu classer les éléments en fonction du nombre de fois où ils ont été cités. Les résultats obtenus mettent en avant la hauteur d'assise, la hauteur de toit et la largeur de bavolet comme contraignantes pour le mouvement.

Enfin, les ergonomes chez PSA Peugeot-Citroën ont également identifié la position du pied milieu, la hauteur d'assise et la largeur de bavolet comme critiques pour l'accessibilité et en particulier pour les participants de grande stature. Leur expertise s'appuie sur des enquêtes de satisfaction clients récoltées dans les années qui suivent l'achat d'un véhicule de la marque. Le Tableau 8 en Annexes présente également les variables indépendantes et leurs modalités étudiées lors des travaux sur l'accessibilité.

2.3. Evaluation de l'inconfort

Dans le cas du mouvement d'accessibilité, l'évaluation de l'inconfort se fait généralement par des analyses sur les effets des paramètres géométriques (hauteur de toit, largeur de bavolet, hauteur d'assise, etc.) caractérisant l'enveloppe de l'habitacle ou/et sur les paramètres biomécaniques s'appuyant sur les données cinématiques (angles articulaires) et dynamiques (couples articulaires).

Parallèlement à leur analyse des stratégies de mouvement, certaines études (le Département des Transports Anglais [DOT_85], Petzall [PET_95], Giacomin et al. [GIA_97] et Chateauroux [CHA_09]) ont regardé l'influence d'une modification de la dimension des paramètres tels que la hauteur du toit ou la largeur d'embrasure sur la gêne ressentie. Ils ont finalement proposé des dimensions de l'habitacle, les moins susceptibles de gêner l'utilisateur dans son mouvement. Giacomin et al. [GIA_97] ont ainsi proposé de corréler l'inconfort avec des paramètres géométriques (hauteur du toit, du bavolet et de l'assise). Le Département des Transports Anglais [DOT_85] a choisi de s'intéresser aux personnes qui risquent d'être les plus susceptibles de souffrir de gêne, à savoir les personnes âgées et à mobilité réduite. L'approche du Département des Transports Anglais [DOT_85] s'appuie sur un retour d'informations de l'impression des sujets et sur une analyse visuelle des films réalisés. Nous pouvons par exemple retenir que l'ouverture de la portière a non seulement une influence sur l'espace pour s'insérer et s'extraire, mais également sur son utilisation en tant que support et sur la proximité de la poignée pour fermer aisément la portière.

Petzall [PET_95] a quant à lui proposé de corréler l'inconfort avec le temps mis pour effectuer le mouvement d'entrée et de sortie du passager avant. Il suppose que plus le mouvement demande du temps, plus le sujet le réalise avec difficulté, et par conséquent plus il est inconfortable. L'auteur identifie finalement les dimensions des paramètres qui engendrent le mouvement le plus rapide et de ce fait, le moins inconfortable (cf. Tableau 10 en Annexe). Toutefois, cette étude présente quelques limites. Nous pouvons nous interroger sur l'influence de l'insertion côté passager par rapport à une entrée côté conducteur, où le passager n'est pas gêné par les instruments de conduite. De plus, la définition du temps utile pour effectuer le mouvement et la précision des résultats dépendent de l'interprétation de l'examinateur et de la façon dont il va définir les différentes phases du mouvement.

Enfin, Chateauroux [CHA_09] a comparé le mouvement des conducteurs âgés avec celui des jeunes. L'expérimentation a été complétée par une série de tests servant à définir les caractéristiques motrices et fonctionnelles des sujets (test Womac, test Romberg, test Fukuda et mesure iso-cinétique). En particulier, l'auteur montre que l'inconfort est influencé par les capacités fonctionnelles du conducteur, et que les volontaires ajustent leur mouvement pour diminuer cette gêne (comme par exemple pour sortir le pied gauche de l'habitacle, les conducteurs basculent le bassin en arrière pour limiter la contrainte due à la flexion de la hanche). Elle remarque une plus grande difficulté des personnes âgées pour s'extraire du véhicule que pour y rentrer. Elle s'intéresse finalement au problème de la subjectivité des réponses d'inconfort des volontaires et propose de prendre le temps de calibrer ces réponses avec des configurations connues, comme pour certaines études sur des mouvements d'atteinte (Dickerson [DIC_05]).

De ces différentes études, on se rend compte que même si les modèles basés sur les paramètres de conception sont aisés à mettre en place et qu'ils permettent d'obtenir des résultats rapidement, ils se révèlent cependant insuffisants pour expliquer les sources d'inconfort et pour obtenir des critères ergonomiques généralisables à d'autres véhicules que ceux testés.

Andreoni [AND_04] est le premier à utiliser les paramètres cinématiques pour comprendre la gêne pour le mouvement d'accessibilité. Il s'est intéressé à l'interaction tête/toit et a calculé l'angle de flexion/extension de la tête pour différentes statures de participants pour une configuration donnée.

Dans le cadre du projet européen Realman, le concept de mouvement neutre a été proposé pour évaluer l'inconfort d'une tâche comme le mouvement d'accessibilité (Dufour et Wang [DUF_05]). L'idée est d'identifier expérimentalement les mouvements les moins contraints et de les comparer avec d'autres plus contraints en contrôlant les paramètres de conception. Il s'agit alors de définir des corridors des mouvements de moindre inconfort pour chaque degré de liberté, de telle manière qu'une variation en dehors du corridor suppose une source probable d'inconfort. Dans le passé, le concept du mouvement neutre a été appliqué uniquement aux angles articulaires.

Le Tableau 8 en Annexe présente les variables indépendantes et leurs modalités étudiées par les travaux sur l'accessibilité identifiés dans la littérature et le Tableau 10 fournit les dimensions de l'habitacle préconisées par différents auteurs pour obtenir des configurations sans ou avec peu d'inconfort.

3. Etudes préliminaires

Pour compléter la revue bibliographique, deux études préliminaires ont été réalisés en début de thèse. Elles avaient pour objectif d'identifier 1/ les zones de contact entre le conducteur et l'habitacle afin de savoir comment instrumenter un environnement pour permettre une étude dynamique et 2/ les paramètres géométriques de l'habitacle affectant l'inconfort pour définir ceux à étudier en premier lieu lors d'une expérimentation.

3.1. Localisation des points de contact entre le conducteur et l'habitacle

La première étude avait pour objectif d'identifier les principales interactions entre le conducteur et le véhicule, de manière à définir comment instrumenter un conformateur pour relever tous les efforts de contact. Pour cela, 18 volontaires (4 femmes et 14 hommes) ont été filmés entrant et sortant de leur propre véhicule, sur le parking de l'Ifsttar. Les véhicules ont été sélectionnés pour couvrir autant que possible les différentes configurations d'habitacle disponibles actuellement sur le marché automobile français : une mini-micro (Fiat Pandat), cinq citadines (VW Polo, Renault Clio, Peugeot 206 et 306 et une Ford Ka), deux compactes (Renault Scenic et Renault 19), deux familiales (Peugeot 807 et break Ford) et deux SUV (Mercedes ML et Aixam Crossline).

Il était demandé aux volontaires d'entrer et de sortir naturellement quatre fois de leur véhicule : deux fois avec la portière fermée et deux fois avec la portière demi-ouverte bloquée. Les deux configurations de portières ont été testées pour identifier l'influence de l'appui sur la portière sur la stratégie de mouvement.

Le contact entre la main et l'habitacle a été déterminé visuellement sur les enregistrements vidéo. L'objectif était d'identifier les contacts dits « actifs », qui tendent à simplifier le mouvement. Ils étaient identifiés en comparant de manière imaginaire un mouvement avec et sans appui de la main. Il faut évidemment tenir compte du fait que cette analyse se base sur une interprétation subjective de l'examinateur sur le rôle des forces de contact.

La Figure 5 illustre les principaux contacts entre la main/bras et l'habitacle. Le Tableau 5 résume le nombre d'essais présentant un contact actif des volontaires avec l'habitacle (portière, volant et siège).

Tableau 5 : Utilisation des éléments de l'habitacle pendant le mouvement d'entrée/sortie (en pourcentage de tous les éléments capturés).

	Entrée		Sortie	
	Porte ouverte	**Porte fermée**	**Porte ouverte**	**Porte fermée**
Volant	79	65	94	70
Portière	50	79	50	87
Siège	0	0	9	9

Figure 5 : Principales interactions observées entre le conducteur et l'habitacle pendant la première étude préliminaire.

Un nombre important de contacts entre le volant et la main a ainsi été observé (> 65% des observations). Aucun contact de la main avec le bavolet et l'embrasure n'a été trouvé dans cette étude. L'appui de la main sur ces derniers est généralement observé dans la littérature pour les personnes âgées et à mobilité réduite (p.e. Département des Transports Anglais [DOT_85]).

Par ailleurs, on relève que les contacts main/véhicule ont été différents entre les deux configurations portière fermée et portière à demi-ouverte. Dans le cas où ils devaient ouvrir la portière, les participants en ont profité pour prendre appui dessus. Ainsi, dans le cas de la configuration portière fermée, une augmentation 29% et 37% du contact main/portière est observée respectivement pour l'entrée et la sortie (cf. Tableau 5). D'un autre côté, une diminution de l'utilisation du volant est également remarquée : 14% pour le mouvement d'entrée et 24 % pour la sortie

Nous avons également essayé de distinguer comment les volontaires ont utilisé les éléments de l'habitacle pour faciliter leur mouvement. Deux types d'appui de la main ont été proposés : avec et sans force. Les mêmes vidéos ont été analysées par trois observateurs différents. D'importantes différences ont été notées entre les observations. Il apparait donc impossible d'évaluer le rôle des contacts par inspection visuelle. Une approche dynamique apparait donc nécessaire pour comprendre le rôle des contacts sur le contrôle du mouvement.

3.2. Paramètres géométriques de l'habitacle influençant l'inconfort

Une seconde étude préliminaire a été réalisée pour définir les paramètres critiques influençant le mouvement d'entrée/sortie et l'inconfort perçu. Cinq volontaires (1 femme et 4 hommes) ont été filmés entrant et sortant de 27 véhicules de segments et de marques différentes, pendant le salon automobile de Genève. Les volontaires étaient des employés de l'Ifsttar et sont familiarisés aux

expérimentations biomécaniques et à l'évaluation de l'inconfort. Les véhicules testés étaient une mini/micro, huit citadines, quatre compactes, 4 familiales, deux voitures de sports, cinq SUV et trois utilitaires. Les segments des véhicules ont été définis en fonction de leur longueur et de leur forme.

Il était également demandé aux participants de tester les véhicules avec la portière fermée et la portière demi-ouverte bloquée. Après plusieurs essais, le mouvement d'entrée et de sortie et les commentaires des participants sur le véhicule ont été enregistrés avec une caméra vidéo. Les commentaires concernaient 1/ l'impression générale des participants sur le véhicule et 2/ les éléments de l'habitacle (hauteur d'assise, largeur de bavolet, etc.) qu'ils jugeaient responsables de leur inconfort.

L'influence des éléments de l'habitacle sur l'inconfort a été évaluée à partir des commentaires des volontaires. La Figure 6 illustre les principales difficultés rencontrées par les volontaires pendant le mouvement d'entrée/sortie. La Figure 7 présente les cinq éléments de l'habitacle les plus cités comme source probable d'inconfort pour l'entrée/sortie. Le Tableau 5 résume trois des cinq éléments les plus cités en fonction des segments des véhicules

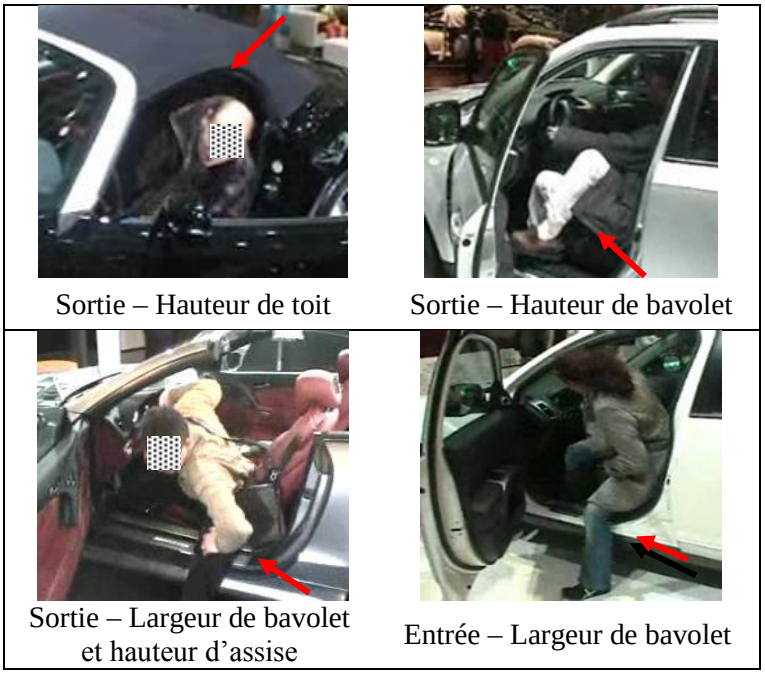


Figure 6 : Principales difficultés rencontrées par les volontaires pendant la seconde étude préliminaire.

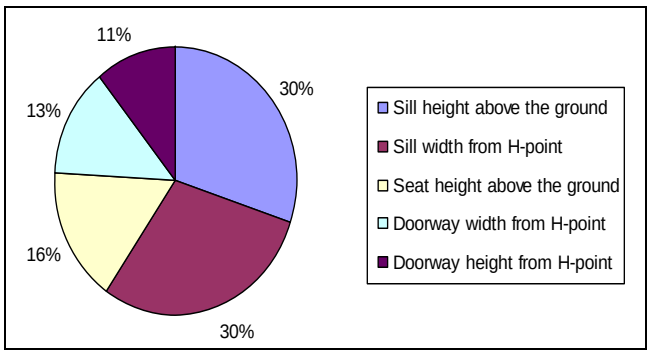


Figure 7 : Importance relative des 5 éléments du véhicule les plus cités affectant l'inconfort du mouvement d'entrée/sortie de véhicule.

On relève que la hauteur et la largeur de bavolet apparaissent comme étant critiques (cf. Figure 7). Ils sont les éléments les plus fréquemment cités par les volontaires ; ensuite viennent la hauteur d'assise, la largeur de bavolet et de la hauteur de toit. Par exemple, sur la Figure 6 (en bas à gauche), on peut voir l'influence combinée d'une importante largeur de bavolet et d'une faible hauteur d'assise sur la stratégie de mouvement pendant la sortie d'une sportive. Enfin, le Tableau 6 montre que l'accessibilité pour une configuration donnée ne peut pas être simplifiée à l'analyse d'un élément de l'habitacle unique. Notons que les résultats sont cohérents avec ceux de Giacomin et al. [GIA_97].

Ces études préliminaires confirment également la nécessité de faire une analyse dynamique pour affiner notre compréhension du rôle des interactions entre le conducteur et l'habitacle pendant le mouvement d'entrée/sortie de véhicule.

Tableau 6 : Les trois éléments de l'habitacle les plus cités comme source possible d'inconfort pour entrer et sortir (ordre décroissant).

Segment véhicules	Longueur véhicules (cm)	Nombre véhicules	Eléments gênants
Mini/micro	250<L<360	1	/
Citadine	360<L<405	8	Hauteur de bavolet Largeur embrasure Largeur de bavolet
Compact	405<L<450	4	Largeur de bavolet Hauteur d'assise Hauteur de toit
Familial	450<L<500	4	Largeur de bavolet Hauteur de bavolet Hauteur d'assise
Sportive	/	2	Hauteur de bavolet Hauteur d'assise Largeur de bavolet
SUV	/	5	Hauteur de bavolet Largeur de bavolet
Utilitaire	/	3	Largeur de bavolet Largeur embrasure Largeur de marche

4. Conclusion & pistes de travail

L'étude du mouvement d'accessibilité à une automobile suscite, depuis une vingtaine d'années, un vif intérêt, preuve en est les nombreux travaux réalisés en la matière. Les différentes études menées jusque là, ont permis de comprendre de manière globale la façon dont se déclinent le mouvement d'accessibilité et l'inconfort qui lui est associé. Néanmoins, si ces investigations ont permis de progresser dans la compréhension du mouvement d'accessibilité pour sa simulation, les effets des paramètres de l'habitacle sur le mouvement et notamment sur l'inconfort restent toujours mal compris. À travers ce rapport, nous avons mis en évidence une carence dans la compréhension des sources d'inconfort et dans la prise en compte des interactions entre le conducteur et l'habitacle.

Pour que l'étude soit complète, nous considérons qu'il nous faut relever les efforts de contact avec l'environnement et calculer les couples articulaires développés par le conducteur. En effet, l'analyse du mouvement a révélé que le mouvement d'entrée et de sortie dépend des caractéristiques anthropométriques et fonctionnelles du conducteur qui influencent grandement les postures adoptées et de l'interaction du sujet avec son environnement. A titre d'exemple, nous avons constaté l'importance des appuis pour l'extraction des conducteurs de l'habitacle et en particulier pour les personnes à mobilité réduite. Toutefois, nous ne connaissons toujours pas le rôle de ces appuis. Dans la mesure où le volant, la portière et le siège ont été identifiés comme les principaux contacts entre le conducteur et l'environnement, il nous semble utile de mesurer les efforts sur ces éléments.

En outre, Nous pensons que les paramètres biomécaniques et notamment les couples articulaires sont plus pertinents pour expliquer la gêne ressentie. En effet, le mouvement étant généré par la contraction des muscles et influencé par l'interaction entre l'utilisateur et l'environnement, les paramètres cinématiques (angles articulaires) seuls ne permettent pas d'expliquer complètement l'inconfort ; Une approche dynamique (couples articulaires) nous semble nécessaire pour comprendre l'inconfort perçu. Une étude pilote [CAU_09] a d'ores et déjà montré l'influence de la modification de la géométrie sur le comportement dynamique, mais ne l'a toutefois pas corrélée avec l'inconfort.

Il semble également pertinent de poursuivre dans la voie du concept de « mouvement neutre ». Une idée serait d'utiliser ce concept en laissant la possibilité au sujet de définir librement la configuration pour laquelle il ressent le moins d'inconfort, et par la suite, de le placer dans des configurations pour lesquelles on est certain qu'il ressentira de l'inconfort. Cette approche présente plusieurs intérêts :

- Tout d'abord, nous sommes certains d'analyser pour tous les participants des configurations qu'ils jugent peu ou fortement gênantes, ce qui n'est pas le cas avec une approche expérimentale basée sur des configurations réelles par exemple.
- En outre, lors de l'analyse des résultats, il sera plus aisé d'identifier l'effet d'une modification de la dimension d'un paramètre géométrique sur la cinématique du mouvement puisqu'on pourra directement comparer les deux situations.

5. Annexes

Tableau 7 : Tableau récapitulatif des études ayant traité le thème de l'accessibilité à une automobile.

Etude	Mouvement étudié	Participants Type	Participants Nb	Participants Particularité	Moyens expérimentaux Environnement	Moyens expérimentaux Instruments de mesure
[DOT_85]	Entrée + Sortie Conducteur anglais	Agée et à mobilité réduite	34 Hommes 30 Femmes	11 en FR [b] 53 à MR [c]	6 véhicules [d]	Caméras VHS
[DOT_85]	Entrée + Sortie Conducteur anglais	Agée et à mobilité réduite	63 Hommes 37 Femmes	20 en FR 80 à MR	Conformateur	Caméras VHS
[GRAN_94]	Entrée	/	/	/	Voiture compacte	3 Caméras VHS
[PET_95]	Entrée Passager avant	Agée et à mobilité réduite	10 Hommes 7 Femmes	6 en FR 11 à MR	Conformateur	2 Caméras VHS + questionnaire inconfort
[GIA_97]	Entrée + Sortie Passager arrière	Jeune et sans handicap	36 personnes	Large étendue de stature	Conformateur : Alpha Roméo 155	Système optoélectronique + questionnaire inconfort
[AND_04]	Entrée + Sortie Conducteur	Jeune et sans handicap	6 Hommes 4 Femmes	Large étendue de stature	Conformateur : Alpha Roméo 155	Système optoélectronique
[DUF_05]	Entrée + Sortie Conducteur	Jeune et sans handicap	23 personnes	/	Conformateur : 4 configurations	Système optoélectronique + questionnaire inconfort
Projet Handiman [a]	Entrée + Sortie Conducteur	Agée et à mobilité réduite	27 Hommes 14 Femmes	26 âgées 17 à MR	Conformateur : 4 configurations	Système optoélectronique + questionnaire d'inconfort [e] + 2 plates-formes de force + machine iso cinétique
[LEM_06]	Entrée Conducteur	Jeune et sans handicap	21 Hommes 1 Femmes	Moyenne proche du 50ème percentile	Conformateur	Système optoélectronique
[RIG_06] Etude prélimin.	Entrée + Sortie Conducteur	Sans handicap	195 Hommes 30 Femmes	âgée entre 22 et 68ans	Véhicule des sujets	Caméra VHS
[RIG_06] & [CHE_06]	Entrée + Sortie Conducteur	Sans handicap	/	Large étendue de stature	Conformateur : 3 configurations	Système optoélectronique + questionnaire inconfort
[KAW_07]	Entrée Conducteur	/	/	/	Conformateur : 4 configurations [f]	Système optoélectronique

a : [CHA_07], [AIT_06], [DEB_07] et [AIT_08] ont utilisé les données récoltées lors du projet Handiman. Les configurations testées s'appuient sur les dimensions d'une Renault Kangoo, d'une Renault Megane, d'une Ford Fiesta, et d'une Peugeot 806.
b : FR - Fauteuil roulant c : MR - mobilité réduite.
d : Ford Escort, Volvo 343, Austin Metro, Honda Accord, Renault 5, Vauxhall Cavalier.
e : questionnaire à échelle, et identification de la zone corporelle sur laquelle la gêne est ressentie.
f : Configurations testées s'appuient sur les dimensions d'une voiture de sport, d'une berline et d'un SUV.

Tableau 8 : Dimensions des paramètres de l'habitacle testées lors des expérimentations sur l'inconfort.

Paramètres étudiés	[DOT_85] [a]	[PET_95] [a]	[GIA_97] [b]	[RIG_06] [c]	[CHA_06 – AIT_06] [a]			
					FORD FIESTA	RENAULT MEGANE	RENAULT KANGOO	PEUGEOT 806
Largeur d'embrasure (mm) [d]	770-850-950-1150	Jusqu'a 1000	/	-80, 0, +80	760	800	830	790
Distance du pied avant au siège (mm)	340-400-450-500	/	74.5 (distance siège avant siège arrière)	-80, 0, +80	/	/	/	/
Hauteur du siège par rapport au sol (mm)	470-510-550-585	540 (19 paliers de 12mm)	560 (0 et ±20mm)	/	530	520	660	790
Hauteur du bavolet par rapport au sol (mm)	240-275-300-330-390	/	360 (0 et ±20mm)	-80, 0, +80	360	375	430	440
Hauteur du bavolet par rapport au plancher (mm)	50-75-100	0-45-90-135	/	/	125	140	145	0
Hauteur du plancher par rapport au sol (mm)	180-230	300	/	/	/	/	/	/
Hauteur du brancard par rapport au sol (mm)	1260-1560 par palier de 100mm	1230-1630 par palier de 50mm	1324 (0, ±20mm et ±40mm)	-40, 0, +40	1180	1185	1510	1550
Angle des dossiers par rapport à la verticale (°)	/	/	23	/	/	/	/	/
Angle d'ouverture de la portière (°)	45-90	>90	70	/	/	/	/	/

a : Sujets à mobilité réduite : personnes âgées et/ou avec un handicap moteur.
b : Sujets jeunes et « sains ».
c : Etude sur un conformateur à géométrie variable. 3 configurations de référence : sportive (BMW Z3), berline et SUV (BMW X5).
d : Correspond à la distance entre le pied avant et le pied milieu.

Tableau 9 : Stratégies identifiées pour le mouvement d'entrée et de sortie par Ait El Menceur et al. [AIT_08].

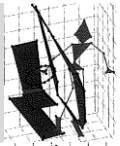
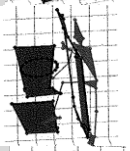
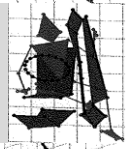
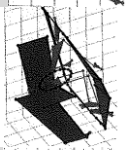
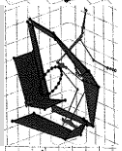
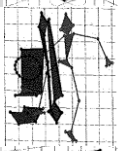
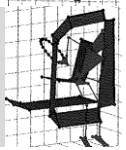
Stratégie utilisée			Ait El Menceur et al. [AIT_08]		Remarques
Entrée		Glissement latéral		- 51% des mouvements - privilégiée par les personnes âgées, car nécessitant peu d'effort	- Insertion de la jambe droite par inclinaison du tronc, et flexion et abduction de la hanche - Insertion dans l'habitacle, associée à une inclinaison et une rotation de la tête vers la droite - insertion de la jambe gauche, une fois assis
	Stratégie à 1 pied	En arrière		- 25% des mouvements - privilégiée par les jeunes, car nécessite de bonnes capacités physiques	- Insertion de la jambe droite par rotation externe de la hanche - Rotation sur la gauche du tronc - Assise dos à l'habitacle avec une rotation sur la droite du tronc
		En avant		- 3% des mouvements - privilégiée sur les véhicules de grand gabarit	- Insertion tête la première dans l'habitacle => le pied droit vient directement se positionner à proximité de la pédale d'accélérateur - Insertion dans l'habitacle, en courbant le dos
	Stratégie à 2 pieds	Tronc en avant		- 14% des mouvements - généralement associée à un appui sur le brancard pour les personnes âgées	- Commence par se mettre dos à l'habitacle - Courbure du dos et assise simultanées - Insertion des 2 jambes, en même temps ou l'une après l'autre
		Tronc en arrière		7% des mouvements	- Commence par se mettre dos à l'habitacle - Extension du tronc et assise simultanées - Insertion des 2 jambes, en même temps ou l'une après l'autre
Sorite	Stratégie à 1 pied	Tête en avant		- 57% des mouvements - privilégiée par les jeunes	- Pivotement dans le siège et extension du tronc - Extraction de la jambe gauche et de la tête - Elévation du bassin, une fois les pieds au sol => le sujet se retrouve finalement dos au véhicule
		Parallèle au véhicule		- 16% des mouvements - Utilisée avec la stratégie par glissement latéral lors de l'entrée	- Extraction de la jambe gauche et placement du pied parallèlement au véhicule - Extension de la jambe gauche et élévation du bassin => le sujet se retrouve finalement face au véhicule
	Stratégie à 2 pieds	Stratégie à 2 pieds		- 27% des mouvements - Privilégiée par les personnes à mobilité réduite et de grande taille	- Pivotement dans le siège sur la gauche et extraction des deux pieds simultanément - Elévation du bassin avec soit un glissement dans le siège, soit une extension des jambes

Tableau 10 : Dimensions les moins inconfortables pour les paramètres de l'habitacle – Etudes réalisées sur des personnes à mobilité réduite (Département des transports Anglais [DOT_85], Petzall [PET_95]), et jeunes et saines (Giacomin [GIA_97] et une étude préliminaire [CAU_09]).

Paramètres	[DOT_85]	Petzall [PET_95]		Giacomin et al. [GIA_97]	Etude Préliminaire
Hauteur siège – sol (mm)	500 (90%) [a]	/	/	- Préconise 560 mm. - Plus le siège est haut, plus il est inconfortable - Beaucoup plus d'incidences sur les sujets grands - Doit être suffisamment haut pour limiter les efforts à développer et suffisamment bas pour ne pas gêner l'entrée des petites tailles	Elle constitue le paramètre de référence, ayant une influence sur toutes les autres dimensions. Un coupé cabriolet a une assise très basse, et un SUV une assise beaucoup plus haute
Hauteur brancard – sol (mm)	>1450 (100%)	>1380 (+100=>17%) [b]	Demande plus de temps, si elle diminue. Demande de plus courber le dos ou de pencher leur tête pour éviter le toit	- Préconise 1364 mm - Plus le brancard est bas, plus il faut se voûter pour passer la tête et le cou sans se heurter - Le niveau de gêne est contraint par la stature	Elle a une influence directe sur le comportement de l'ensemble tronc/tête
Hauteur bavolet – sol (mm)	<250 (100%)	<350 (+100 =>16%)	Plus il est haut, plus la durée est importante (nécessité de plus lever les jambes)	- Préconise 340 mm - Plus le bavolet est haut, plus il faut lever la jambe pour la faire passer lors de l'entrée - Quand elle diminue, les grands ressentent plus de gêne et les petits moins	Elle affecte le passage des jambes lors de l'entrée et notamment la flexion de la hanche et du genou
Distance assise – bavolet (mm)	<150 (100%)	/	/	/	Avec un bavolet trop large, appui du mollet contre celui-ci, ce qui suivant sa forme peut entraîner de la gêne
Hauteur bavolet – Plancher (mm)	50 – 100	50 – 90	/	- Plus le bavolet est haut, plus il faut lever la jambe pour la faire passer lors de la sortie	Elle a une grande influence lors de la sortie. Pour des véhicules type 4X4, elle peut être nulle
Distance pied avant – assise (mm)	>500 (100%)	>350 (-180 =>12%)	Plus le siège est avancé, plus le temps nécessaire pour entrer augmente. Elle doit être suffisamment large pour laisser passer les jambes	- Si la distance est trop faible, les sujets ont tendance à se cogner la tête - Plus la distance est grande, plus il y a de place pour laisser passer les jambes - La gêne est d'autant plus importante que le brancard est bas et l'assise du siège haute	Si elle n'est pas adaptée, la gêne est rapidement identifiée par les utilisateurs et apparaît comme très perturbante
Dist. pied avant – pied milieu (mm)	>1150 (100%)	>900 (-100 =>6%)	Plus l'embrasure est étroite, plus le temps nécessaire est important	/	L'inconfort lié à une trop faible largeur d'embrasure n'est pas toujours bien évalué et peut être confondu avec l'impression d'un bavolet trop haut
Angle ouverture de portière (degré)	70 (90%)	70	/	- A 60°, l'accès est un peu trop étroit, et à 90°, la poignée est trop éloignée pour être utilisée.	Il contraint énormément le mouvement, en plaçant l'utilisateur dans une posture plus ou moins de profil pour s'insérer

a : Pourcentage d'acceptation de la dimension par les sujets.

b : (+100 =>25%) : pour une augmentation de 100mm, le temps mis pour effectuer le mouvement d'entrée/sortie augmente d'environs 25%.

CHAPITRE 2 – PROTOCOLE EXPERIMENTAL & TRAITEMENT DES DONNEES

1. Introduction **39**
2. Hypothèse de travail et choix des variables étudiées **39**
3. Matériels et méthodes **40**
3.1. Variables étudiées 40
3.2. Participants 42
3.3. Dispositifs de mesure 43
3.4. Procédure expérimentale 46
4. Traitement des données expérimentales **51**
4.1. Traitement préliminaire 51
4.2. Reconstruction cinématique du mouvement 53
4.3. Reconstruction dynamique 54
5. Evaluation de la qualité de la reconstruction des mouvements **56**
5.1. Pour la reconstruction cinématique 56
5.2. Pour la reconstruction dynamique 57
6. Bilan sur les mesures expérimentales et les données reconstruites **58**
7. Annexes **59**
7.1. Description des paramètres géométriques caractérisant la géométrie du véhicule 59
7.2. Matériel de mesure 61
7.3. Fiche d'essais type 66
7.4. Relevé des informations personnelles et du ressenti général du participant 67
7.5. Relevé de l'inconfort : Questionnaire 70
7.6. Fiches administratives 72
7.7. Modèle Ramsis 73
7.8. Principe de la reconstruction cinématique et dynamique sous RPx 74
7.9. Mesures anthropométriques 75

1. Introduction

Ce chapitre décrit le protocole expérimental visant à étudier l'influence des paramètres géométriques du véhicule sur les mouvements et sur l'inconfort perçu par le conducteur. Cette expérimentation doit permettre de recueillir des données sur :

- les trajectoires des segments corporels, pour une analyse des stratégies de mouvement;
- les efforts de contact entre le participant et l'habitacle, pour le calcul des couples articulaires;
- l'inconfort ressenti par les participants, pour l'analyse de la gêne perçue.

La méthode utilisée pour reconstruire les mouvements d'accessibilité capturés expérimentalement est également présentée. L'idée est de faire reproduire les mouvements capturés des participants par le mannequin numérique Ramsis. Cette démarche est effectuée pour plusieurs raisons. Elle nous permet :

- de faire une analyse visuelle des stratégies de mouvements et des interactions des participants avec l'environnement
- et de connaître in fine l'évolution des paramètres biomécaniques internes : les angles articulaires d'une part à partir d'une reconstruction par cinématique inverse, et les couples articulaires nets d'autre part par dynamique inverse.

La qualité des reconstructions est finalement vérifiée par l'analyse des résidus cinématiques et dynamiques.

2. Hypothèse de travail et choix des variables étudiées

En plus de l'identification des paramètres critiques influençant le mouvement d'entrée/sortie de véhicule et l'inconfort perçue, la deuxième étude pilote a également permis de nous interroger sur la géométrie de véhicule idéale, qui ne gênerait pas ou peu le mouvement d'entrée et de sortie.

De cette réflexion, nous avons conclu que le conducteur doit pouvoir entrer et sortir son corps de l'habitacle en étant assis dans le siège, le pied droit posé sur le plancher et le gauche sur le sol, et sans fléchir le haut du corps (cf. exemple Figure 5). Ceci a pour conséquence que le toit doit être à une hauteur suffisante pour que le conducteur n'ait pas à fléchir le haut du corps. C'est-à-dire que l'espace siège/toit égale la hauteur fesse/tête. En outre, lors de l'identification des parties corporelles les plus soumises à l'inconfort, Giacomin et al. [GIA_97] identifient la tête et le cou comme sources principales. Le toit apparaît donc comme un élément essentiel pour l'accessibilité.

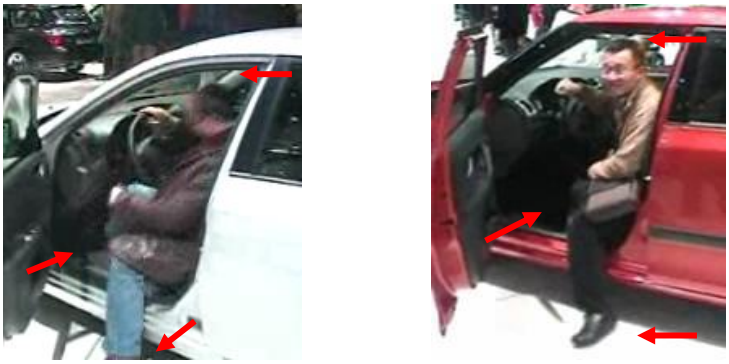


Figure 8 : Postures dont nous supposons qu'elles entraînent peu ou pas d'inconfort pour l'entrée (a) et la sortie (b).

Il faut également que la largeur de bavolet ne soit pas trop importante et l'assise pas trop basse, pour que le conducteur soit en posture d'équilibre stable assis quand la tête passe sous le toit. En effet, une autre étape délicate de l'accessibilité est la phase de maintien de l'équilibre (Chateauroux [CHA_09]).

Pour l'entrée par exemple, le centre de gravité n'est plus positionné au dessus de sa base de support entrainant le conducteur dans une posture déséquilibrée. Cette étape est ainsi d'autant plus délicate pour les conducteurs si le siège se trouve trop éloigné ou trop bas. Outre cela, la prise en compte de la hauteur d'assise est nécessaire, puisqu'elle caractérise le segment du véhicule.

Pour cette expérimentation nous choisissons donc de nous intéresser à l'influence de la hauteur de toit et de la largeur de bavolet sur le mouvement et l'inconfort perçu, le tout s'articulant autour de différentes hauteurs d'assise.

Par ailleurs, nous sommes séduits par le concept de mouvement neutre de Dufour et Wang [DUF_05] et en particulier par l'idée de définir un mouvement de moindre inconfort et comparer tout nouveau mouvement par rapport à celui-ci. Pour notre étude, nous choisissons de comparer un mouvement que le participant aura jugé qu'il est acceptable en terme d'inconfort avec un autre qui ne l'est pas.

Considérant le fait qu'un modèle automobile est vendu à des millions d'exemplaires, il est important de tenir compte de la grande variabilité entre les individus, particulièrement celle inhérente à leurs caractéristiques anthropométriques et motrices. Toutefois, pour limiter la durée de la campagne des expérimentations et du traitement des données récoltées, nous choisissons de nous concentrer sur une population jeune et saine, caractérisée par sa stature. D'une part, parce que nous souhaitons nous intéresser à la hauteur de toit qui est de manière intuitive principalement corrélée avec la stature du conducteur, et d'autre part nous ne souhaitons pas introduire l'influence des capacités motrices.

Partant de ces hypothèses, nous souhaitons à travers cette étude répondre aux questions suivantes :
- Quel est l'écart entre une hauteur de toit acceptable et non-acceptable pour le conducteur ?
- Comment cet écart est il affecté par la stature des conducteurs et la configuration du véhicule ?
- Comment la largeur de bavolet affecte-t-elle l'inconfort et la cinématique du mouvement ?
- Et enfin peut-on à partir d'une analyse biomécanique du mouvement aider à comprendre l'influence des paramètres de conception sur la gêne des participants ?

3. Matériels et méthodes

3.1. Variables étudiées

La première partie de l'expérimentation se concentre sur l'inconfort du à la hauteur de toit. Deux hauteurs spécifiques sont mesurées par rapport aux indications des volontaires :
- la première hauteur de toit qui commence à créer de l'inconfort (nommée ***Ht1*** dans le reste du document). Au dessus de cette hauteur, le toit n'entraine pas d'inconfort au participant ;
- la dernière hauteur de toit acceptable, en dessous de laquelle le participant n'accepte plus d'entrer et de sortir du véhicule (nommée ***Ht2***).

Une hauteur intermédiaire fonction de ces deux hauteurs particulières (***HtM*=(*Ht1*+*Ht2*)/2**) est également testée par le participant.

Dans une seconde partie, le participant se focalise sur la largeur de bavolet (cf. Figure 9). Pour cela il teste et évalue trois configurations, définies d'après une base de données incluant 165 véhicules de marques et de modèles différents. L'idée est de faire tester aux participants des configurations réalistes. Elles correspondent à :
- la largeur de bavolet ***Lb1*** la **moins large** possible en fonction de la hauteur d'assise ;
- la largeur de bavolet ***Lb2*** la **plus large** possible en fonction de la hauteur d'assise ;
- et une largeur moyenne ***LbM*** tel que ***LbM*=(*Lb1*+*Lb2*)/2**.

Pour l'étude des largeurs de bavolet, la hauteur de toit est placée à la 1ère hauteur gênante *Ht1* pour ne pas introduire l'influence de la hauteur de toit. Pour l'étude des hauteurs de toit, la largeur de bavolet est placée à la largeur la plus faible *Lb1*.

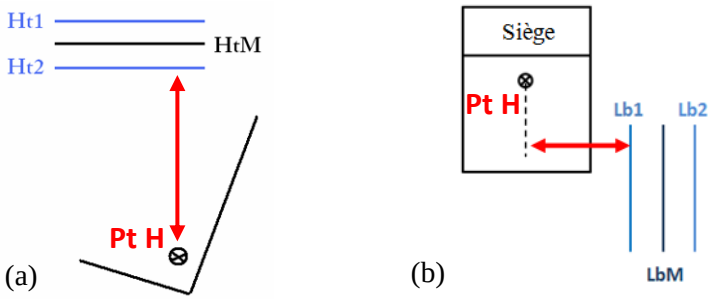


Figure 9 : Définition des variables étudiées : la hauteur de toit (a) et la largeur de bavolet (b) par rapport au point H.

L'étude de la hauteur de toit et de la largeur de bavolet est articulée **autour de 3 hauteurs d'assise.** En effet, la variable qui caractérise le mieux un véhicule est la hauteur du siège ; c'est en effet à partir de celle-ci, que l'on différencie aisément une sportive, d'un SUV ou d'un utilitaire. De manière à balayer le plus largement possible l'ensemble des segments disponibles actuellement sur le marché français, ces hauteurs sont associées à :

- un véhicule **coupé sportif** (Opel Astra GTC), identifiée par ***Hs1*** dans le document ;
- une **berline** (Peugeot 107, Citroën C5), identifiée par ***Hs2*** ;
- et un **monospace** (Xsara Picasso), identifiée par ***Hs3*** (cf. Tableau 16 en Annexe 7.1.2).

Les autres dimensions (cf. Figure 14) caractérisant la géométrie du véhicule (hauteur de plancher, largeur de brancard, etc.) sont définies de manière à représenter des configurations réelles, proches de celles disponibles actuellement sur le marché français. L'étude de configurations aberrantes inutilisables par le constructeur est donc exclue de notre étude.

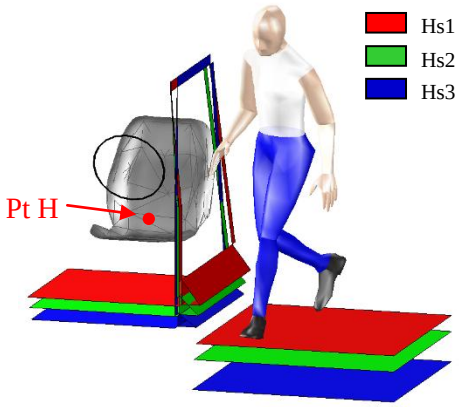


Figure 10 : Illustration des 3 hauteurs d'assise testées par chaque participant (en rouge *Hs1*, en vert *Hs2* et en bleu *Hs3*). Les géométries sont centrées sur le point H.

Pour cela, nous utilisons la base de données, composée des dimensions de 165 véhicules de marques et de modèles différents. Pour les **dimensions de l'habitacle corrélées avec la hauteur d'assise** (hauteur *Ht* et largeur de toit *Lt*, distance du pied milieu *Dpm*, hauteur de plancher *Hp*, et hauteur de bavolet *Hb*), chaque variable a une dimension propre pour chacune des 3 hauteurs d'assise. Pour les **dimensions de l'habitacle non corrélées avec la hauteur d'assise** (distance du pied avant *Dpa* et largeur du bavolet *Lb*), les variables ont une valeur moyenne unique pour les trois assises. Pour plus de détails sur le choix des dimensions cf. Annexe 7.1. Les dimensions utilisées pour définir les différentes configurations sont présentées dans le Tableau 16 en Annexe 7.1.2.

Pour chaque hauteur d'assise, le déroulement de l'expérimentation suit l'ordre suivant (cf. Figure 11) :

- la 1ère hauteur de toit gênante *Ht1*, la dernière acceptable *Ht2* et la hauteur intermédiaire *HtM* ;
- la largeur de bavolet la plus importante *Lb2*, et enfin la largeur intermédiaire *LbM*. L'évaluation de la largeur de bavolet *Lb1* se fait en même temps que celle de la hauteur *Ht1*.

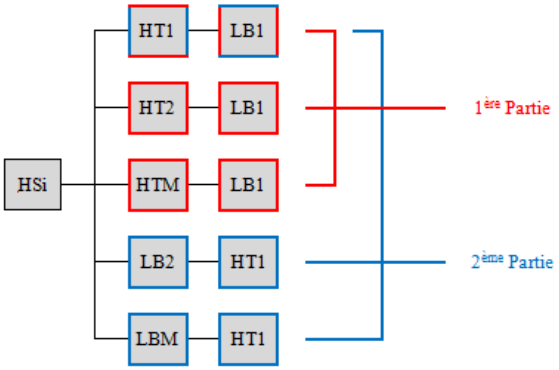


Figure 11 : Etude paramétrique réalisée pour une hauteur d'assise donnée
***Hs* : Hauteur de siège, *Ht* : Hauteur de toit, *Lb* : Largeur de bavolet**

3.2. Participants

26 participants ont participé à l'expérimentation. Ils ont été sélectionnés en fonction de leur stature pour représenter une large population de conducteurs français allant du 5ème percentile femme au 95ème percentile homme. Seul des personnes jeunes (âgés de 21 à 50 ans), en possession du permis de conduire depuis au moins 3 ans et sans antécédent de trouble musculo-squelettique au cours des 12 derniers mois, sont retenus. Les participants sont alors répartis suivant trois groupes, comprenant pour chacun d'eux au moins 8 participants (cf. Tableau 11 ci-dessous) :

- un groupe de femmes de « **petite taille** » d'anthropométrie proche du 5ème percentile femme, dont la taille se situe entre 150 et 165cm ;
- un groupe mixte de « **taille moyenne** » d'anthropométrie proche du 50ème percentile homme, dont la taille est comprise entre 165 et 180cm ;
- un groupe d'hommes de « **grande taille** » d'anthropométrie proche du 95ème percentile homme, dont la taille est au moins de 181cm.

Tableau 11 : Description des participants d'après leur stature.

Groupes de stature	Nombre	Stature (cm)	Stature Min	Stature Max	Age (ans)	Poids (kg)
Petite	9 (9F / 0H)	159 ± 03	152	162	30 ± 6	55 ± 09
Moyenne	8 (2F / 6H)	172 ± 04	166	178	30 ± 5	71 ± 12
Grande	9 (0F / 9H)	183 ± 02	181	187	30 ± 5	79 ± 08
Total	26 (11F / 15H)	171 ± 11	152	187	30 ± 5	68 ± 14

F : Femme, H : Homme.

Selon l'hypothèse de travail, la hauteur de buste peut être un paramètre anthropométrique pertinent pour la détermination de la hauteur du toit. Selon ce paramètre, les participants sont également rassemblés suivant trois groupes (cf. Tableau 12) :

- un groupe de femmes de « **petit buste** », tel que la hauteur de buste est inférieure à 85 cm ;
- un groupe mixte de « **buste moyen** » tel que la hauteur de buste est comprise entre 85 et 90 cm ;
- et groupe d'homme de « **grand buste** », tel que la hauteur de buste est supérieure à 90 cm.

Tableau 12 : Description des participants d'après leur hauteur de buste.

Groupes de hauteurs buste	Nombre	Hauteur (cm)	Hauteur Min	Hauteur Max	Age (ans)	Poids (kg)
Petite	8 (8F / 0H)	82 ± 1	80	85	30 ± 6	54 ± 10
Moyenne	11 (3F / 8H)	87 ± 1	85	88	29 ± 5	73 ± 13
Grande	7 (0F / 7H)	93 ± 2	91	95	31 ± 5	77 ± 08
Total	26 (11F / 15H)	87 ± 4	80	95	30 ± 5	68 ± 14

F : Femme, H : Homme.

3.3. Dispositifs de mesure

Le dispositif expérimental utilisé est présenté sur la Figure 12 et décrit dans les paragraphes suivants.

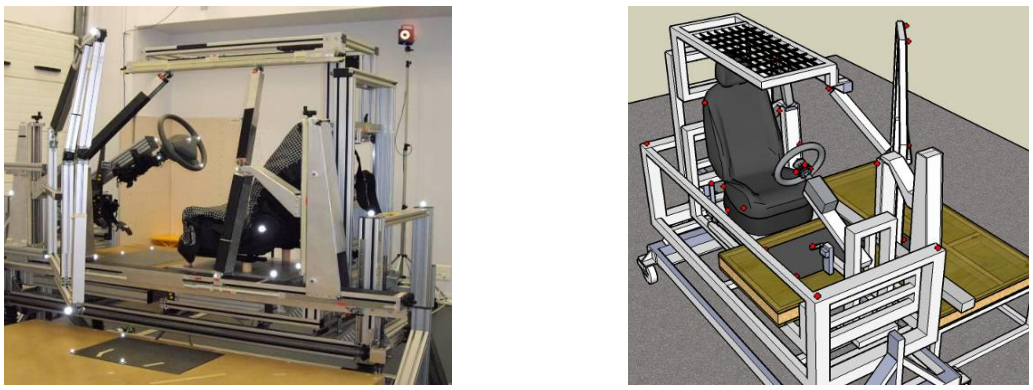


Figure 12 : Dispositif expérimental.

3.3.1. Conformateur

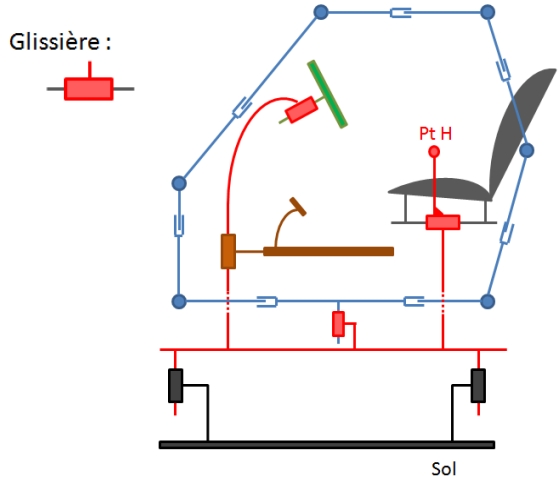


Figure 13 : Conformateur à géométrie variable.

Un conformateur à géométrie variable est utilisé pour cette expérimentation (cf. Figure 13). Il permet de faire varier un grand nombre de paramètres caractérisant l'habitacle d'un véhicule (hauteur d'assise, hauteur de toit, hauteur et largeur du bavolet, distance du pied milieu), et offre la possibilité de simuler un véhicule réel ou d'étudier l'influence d'un paramètre de conception en particulier.

La mise en place d'une configuration se fait en deux temps. L'expérimentateur commence par mettre le siège à la hauteur adéquate. Ceci se fait à l'aide de 4 glissières supportant l'ensemble du conformateur. Ainsi, l'ascension du siège entraine avec elle tous les éléments du conformateur (toit, bavolet, volant, etc.). Une fois le siège mis en place, l'expérimentateur ajuste alors la position des éléments les uns après les autres.

L'ensemble des éléments du conformateur est positionné autour d'un point H de référence lié au siège. (cf. Figure 14). Ce point est défini à partir du mannequin de référence SAE – J826 [SAE_89] et correspond à l'intersection du plan médian du corps et de l'axe de rotation des hanches, dans une posture d'assise donnée, pour un avancement de siège et un véhicule donnés. Pour notre expérimentation, le point H de référence a été défini sur la base de la géométrie d'une Peugeot 207. Cette configuration a été choisie pour ses dimensions « moyennes ». Les dimensions de la Peugeot 207 sont présentées dans le Tableau 16 en Annexe 7.1.2. L'ensemble des dimensions présentées dans le document seront définies par rapport à ce point H (cf. Figure 14).

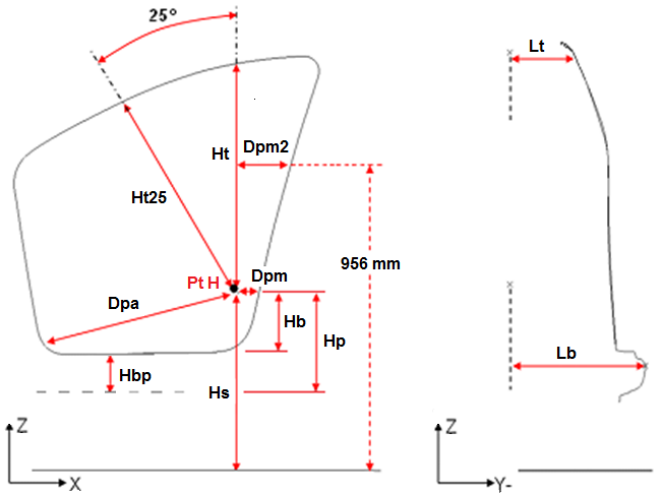


Figure 14 : Définition des dimensions caractérisant l'embrasure d'un véhicule.

Sur le conformateur, le point H est matérialisé par un marqueur rétro réfléchissant (cf. Figure 19). La tige qui le soutient est fixée sur le support du siège. Ainsi, le point H conserve sa position quels que soient l'avancement et la hauteur du siège.

3.3.2. Enregistrement du mouvement

La capture du mouvement des participants est réalisée à partir du système de mesure optoélectronique Vicon® MX T40, enregistrant la position de marqueurs réfléchissants à l'aide de 10 caméras monochromes cadencées à 100 Hz. Afin de caractériser la géométrie de l'habitacle et de connaître à chaque instant la position du participant par rapport à l'habitacle, 40 marqueurs sont placés sur le conformateur (cf. position des marqueurs en Annexe 7.2.2). Parallèlement, pour suivre la trajectoire des segments corporels au cours du mouvement, et de reconstituer in fine le mouvement par cinématique inverse, 44 autres marqueurs sont positionnés sur le corps (cf. Annexe 7.2.2).

Un caméscope numérique (cadencé à 25Hz) est ajouté au dispositif, afin d'apporter un support visuel, notamment utile pour l'analyse des stratégies de mouvement.

3.3.3. Enregistrement des efforts de contact

Pour la mesure des forces de contact, le conformateur est instrumenté de (cf. Figure 15) :

- deux plates-formes de force (Bertec 4060-10-4000, dimensions 400x600mm) installées sur le sol en entrée du conformateur et sur le plancher pour relever la force de réaction du sol sur les pieds et ainsi suivre le transfert de poids au cours du mouvement ;
- une plate-forme de force sous le siège pour connaître l'instant où le participant s'assoit ou se lève et étudier la manière dont il sollicite le siège ;
- un capteur six axes (Denton 2554) placé entre le volant et la colonne de direction, pour relever les efforts appliqués par le participant sur le volant.

L'acquisition et la synchronisation des informations issues de ces instruments se fait directement via l'interface du système optoélectronique. Pour plus de détails sur les caractéristiques techniques des instruments de mesure se référer à l'Annexe 7.2.1.).

L'utilisation de la portière introduit une trop grande variabilité de mouvements. C'est pourquoi nous décidons de ne pas inclure ce facteur dans notre étude. Toutefois, pour conserver un espace contraint lié à l'ouverture de la portière et ainsi garder un mouvement naturel, la portière est bloquée ouverte à un angle de 70°, ce qui correspond au 1er cran d'ouverture des voitures actuelles.

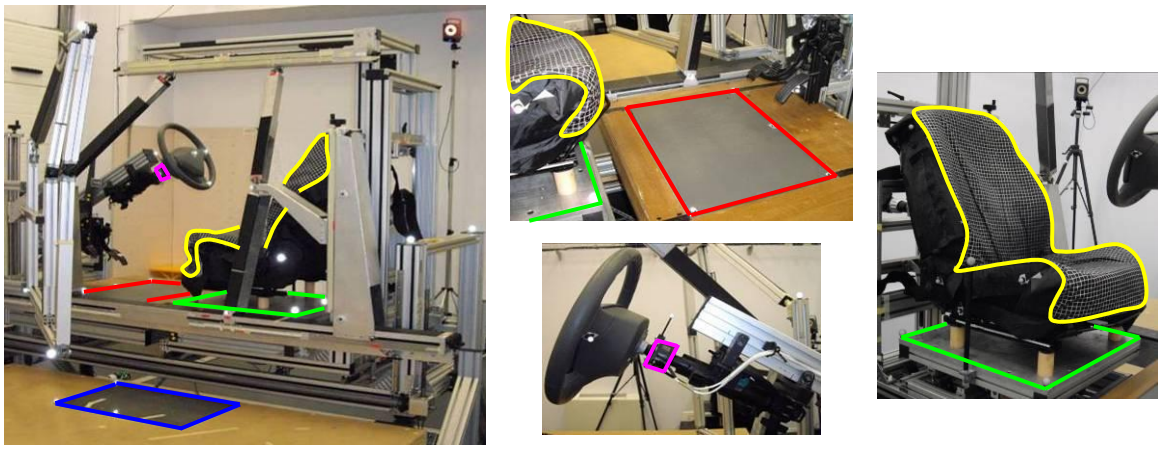


Figure 15 : Dispositif de mesures des contacts entre le conducteur et l'environnement.

3.3.4. Enregistrement du contact avec le siège

Deux nappes de pression (XSensor X3Pro PX100) sont également installées sur le siège (une sur l'assise et l'autre sur le dossier), pour voir comment les participants s'assoient dans le siège et comprendre comment celui-ci est sollicité par le participant (cf. Figure 15).

3.3.5. Questionnaire d'inconfort

Un questionnaire est utilisé pour évaluer l'inconfort associé au mouvement réalisé (cf. fiches d'inconfort, présentées en Annexe 7.5.). Ce questionnaire vise à identifier les éléments du véhicule susceptibles de gêner le mouvement d'entrée et de sortie d'une part. D'autre part, on souhaite aussi identifier les parties du corps qui sont gênées. Trois notes d'inconfort sont recueillies, une pour le mouvement d'entrée, une pour la sortie et une globale pour la configuration.

Nous choisissons d'utiliser une variante de l'échelle d'inconfort nommée « Category Partition Scale » ou CP-50 (cf. Figure 16). Ce choix s'appuie sur les recommandations de Sheng et al. [SHE_97], qui ont mis en évidence la fiabilité et la répétitivité de la CP-50 pour recueillir des mesures d'inconfort. Il est donc proposé au participant de juger l'inconfort perçu, en attribuant:

- une première note comprise entre « imperceptible » et « très fort » ;
- puis une seconde note entre « 1 » et « 10 » pour affiner la première (sauf pour imperceptible).

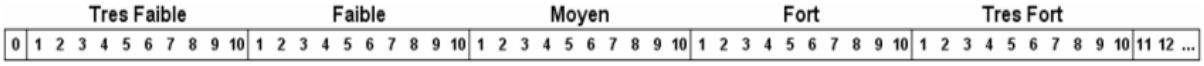


Figure 16 : Echelle d'inconfort CP-50 utilisée pour évaluer la configuration, l'entrée et la sortie.

De manière à faciliter le relevé et le traitement du questionnaire et à limiter le temps de saisie pendant l'expérimentation, c'est l'expérimentateur (toujours le même) qui relève les remarques de chaque participant sur le questionnaire (cf. fiches d'inconfort présentées en Annexe 7.5.).

Par ailleurs, l'inconfort étant une notion difficile à appréhender, une étape de familiarisation est réalisée en début d'expérimentation. Pour cela, l'expérimentateur fait évaluer au participant quelques séries de mouvements et leur demande d'évaluer l'inconfort suivant deux configurations, choisies pour la gêne qu'elles introduisent d'après des enquêtes clients réalisées par Peugeot-Citroën :

- une première configuration **très bien perçue**, à savoir le **Citroën Xsara Picasso** ;
- et une seconde **très mal perçue**, à savoir l'**Audi TT**.

La Figure 17 illustre les différences dimensionnelles entre ces deux configurations et en particulier par rapport à la hauteur d'assise, la largeur et la hauteur du bavolet par rapport au siège, et l'espace entre le volant et le plancher. Les dimensions des véhicules sont présentées dans le Tableau 16 en Annexes.

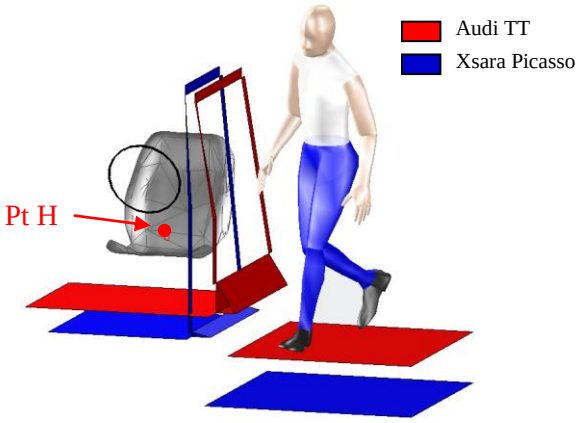


Figure 17 : Illustration des 2 configurations testées par chaque participant pour calibrer l'inconfort (en rouge l'Audi TT, en bleu la Xsara). Les géométries sont centrées sur le point H.

3.4. Procédure expérimentale

L'expérimentation se déroule systématiquement en six temps :

- **Préparation du matériel :**

Deux heures avant le début de l'expérimentation, le système Vicon® est calibré et les instruments de mesures des efforts de contact sont vérifiés. Pour cela, des forces connues sont appliquées à l'aide d'un dynamomètre sur les plates-formes de force et le capteur. L'opérateur vérifie que les efforts (forces et moments) mesurés sont proches de ceux appliqués. Une erreur inférieure à 3% est observée pour tous les axes de tous les capteurs.

- **Accueil des participants et mesures anthropométriques :**

Le participant accueilli, l'opérateur lui présente le cadre général et les attentes vis-à-vis de l'expérimentation. Après avoir signé les feuilles de consentement (Annexe 7.6), le participant se met en tenue. Il s'agit d'une combinaison de type juste au corps, tenue adaptée pour suivre au mieux le mouvement du corps et limiter le masquage des marqueurs (Figure 18). Elle se compose d'un cycliste pour les hommes, et d'un cycliste et d'une brassière pour les femmes.

Une fois en tenue, l'opérateur, toujours le même, relève consciencieusement ses mesures anthropométriques. Pour plus de détails sur les dimensions relevées, cf. Annexe 7.9. Ces mesures sont nécessaires pour la mise à l'échelle du modèle numérique et la définition des propriétés inertielles des segments corporels. D'autres données comme l'âge, le sexe, et le poids du participant sont également relevées. L'opérateur relève également la hauteur du buste des participants suivant 3 postures :

- le dos bien droit ;
- en position d'assise naturelle pour le participant. Cette posture est proche de celle demandée au participant pour définir la hauteur initiale lors de la recherche de la hauteur *Ht1* ;
- la tête en flexion frontale maximale. Cette posture est proche de celle demandée au participant pour définir la hauteur initiale du toit lors de la recherche de la hauteur *Ht2*.

- **Calibration et familiarisation:**

Les marqueurs rétro réfléchissants sont ensuite scotchés sur le volontaire, comme présenté en Annexe 7.2.2. Cette étape est également réalisée par le même expérimentateur pendant toute l'expérimentation.

Vient ensuite, l'étape dite de « calibration » utile pour l'attachement des marqueurs (définition des marqueurs dans le repère du segment auquel ils appartiennent). Le participant est installé entre quatre barres. Une capture Vicon et deux photographies (face et profil droit) du participant sont alors prises simultanément (cf. Figure 18).

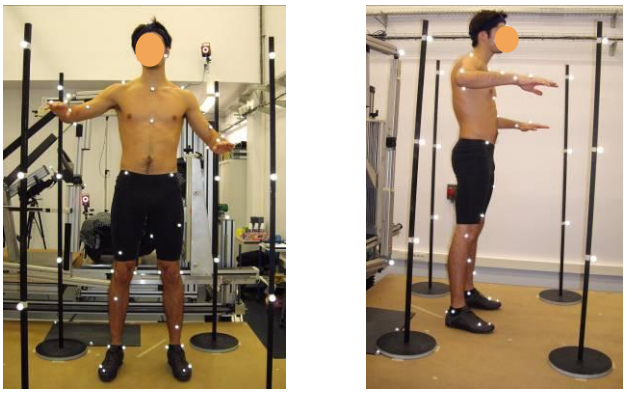


Figure 18 : Etape de calibration utile pour l'attachement des marqueurs.

L'opérateur demande ensuite au participant d'effectuer une séquence de mouvements particulière dans l'objectif de définir notamment l'amplitude maximale du cou en flexion frontale et en inclinaison latérale. Cette séquence est enregistrée par le système Vicon® et est notamment utilisée pour l'auto labellisation des marqueurs lors de la phase de tracking (cf. §4.1.1.).

Puis, l'opérateur demande au participant de s'installer dans le conformateur pour régler l'avancement du siège et la position du volant (réglage hauteur et profondeur), de manière à obtenir une position de conduite adéquate (aucun réglage sur l'inclinaison du dossier et l'élévation de l'assise n'est proposée). Pour cette étape, le conformateur est configuré aux dimensions de la Xsara. Pour régler son siège, le participant tient compte de sa vision à l'avant du conformateur et de sa position par rapport au volant et par rapport aux pédales d'embrayage, de frein et d'accélérateur (cf. Figure 19). Notons que les glissières du siège sont horizontales par rapport au plancher. Ainsi, le point H est toujours à la même hauteur que le siège soit complètement avancé (par exemple pour les petites statures) ou reculé.

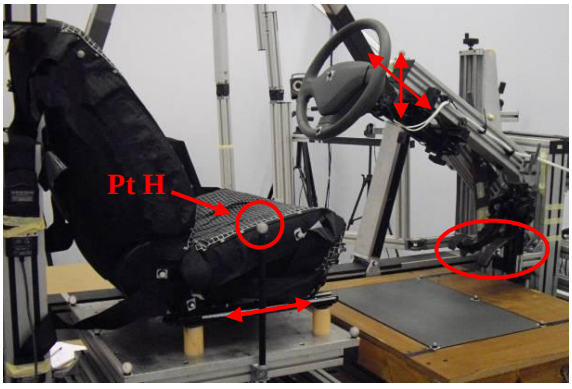


Figure 19 : Réglage du volant et du siège en position de conduite.

Une fois le réglage obtenu, l'avancement du siège est noté et les pédales sont retirées. Ainsi, les réglages du siège et du volant restent les mêmes pour toutes les configurations d'habitacle testées pendant l'expérimentation. Les raisons de ce choix s'appuient sur le fait que :

- la distance entre le volant et le haut du corps est principalement déterminé par la longueur main/épaule. Ainsi même si l'espace entre le volant et le plancher est modifié suivant la configuration, la distance volant/siège reste la même et la posture de conduite est conservée.
- Parmi les véhicules réels représentés par les configurations de l'expérimentation, un écart de 25 mm différencie ainsi la position du volant par rapport au siège ;

- l'espace entre le volant et le siège nous intéresse tout particulièrement, en effet, pour le mouvement d'accessibilité, le volant apparaît comme l'élément d'interférence principale, les personnes n'entrant jamais en interaction avec les pédales.

- **<u>Apprentissage de l'évaluation de l'inconfort et de l'identification des hauteurs de toit :</u>**

L'expérimentateur prend ensuite le temps de familiariser le participant à l'évaluation de l'inconfort. Pour cela, il lui présente l'échelle d'inconfort et la lui fait tester dans un premier temps sur la Xsara, connue pour être faiblement gênante pour les conducteurs, puis dans un second temps sur l'Audi TT, connue pour être fortement gênante. Pour cela, le participant rentre et sort autant de fois qu'il le juge nécessaire. Une fois qu'il se s'en prêt, l'expérimentateur le soumet au questionnaire d'inconfort. S'il le souhaite, le participant peut continuer à entrer et sortir du conformateur pendant qu'il est interrogé.

Dans la continuité pour la Xsara uniquement, le participant se familiarise également à l'identification des deux hauteurs de toit particulières *Ht1* et *Ht2*. La consigne donnée aux participants pour l'identification des hauteurs sont les suivantes :

- Pour la hauteur *Ht1*, l'expérimentateur lui explique que celle-ci intervient quand il commence à fléchir la tête et/ou le dos et qu'il doit faire attention au toit ;
- Pour la hauteur *Ht2* : au delà, il peut toujours entrer et sortir du conformateur, mais l'inconfort est si important qu'il ne l'accepte plus. Elle intervient quand il est obligé de fléchir excessivement le dos et le cou.

Afin de limiter la durée de l'expérimentation, une hauteur de toit initiale pour chaque hauteur de toit particulière (*Ht1* et *Ht2*) est proposée au participant. Celle-ci est déterminée de la manière suivante :

- pour la hauteur *Ht1*: il est demandé au participant de s'asseoir dans le siège puis de sortir de l'habitacle. Une fois la tête sous le toit, il stoppe son mouvement et **conserve sa posture sans se redresser ni fléchir la tête**. Le toit est alors descendu au niveau de sa tête (Figure 20a) ;
- pour la hauteur *Ht2* : il est demandé au participant de s'asseoir puis de sortir de l'habitacle. Une fois la tête sous le toit, il stoppe son mouvement, **conserve sa posture** et **fléchit le cou et seulement le cou au maximum**. Le toit est alors descendu au niveau de sa tête (Figure 20b).

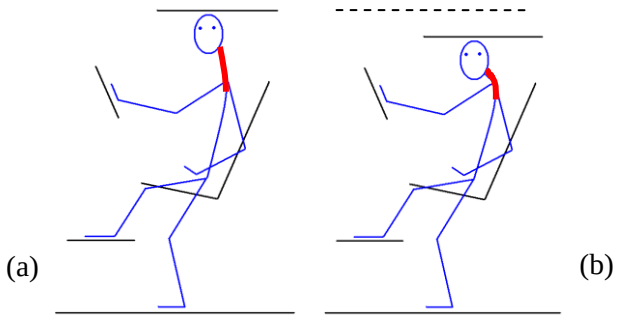


Figure 20 : Postures utilisées pour définir les hauteurs initiales de la hauteur de 1er inconfort gênant *Ht1* (a) et de la dernière hauteur acceptable *Ht2* (b).

Il convient de noter que ces hauteurs initiales ne sont pas les limites que les participants peuvent tester. S'ils jugent que l'inconfort existe déjà pour la hauteur de toit *Ht1* ou qu'il n'est plus acceptable pour la hauteur *Ht2*, l'expérimentateur peut leur faire tester des toits plus hauts.

Pour identifier les deux hauteurs particulières, l'expérimentateur descend alors le toit par paliers de 1cm à partie de la hauteur initiale. Une fois chaque hauteur identifiée, l'expérimentateur remonte d'un demi-centimètre pour vérifier qu'il n'est pas descendu trop bas. Notons que pour identifier ces deux hauteurs, le participant est invité à garder à l'esprit qu'il apprécie :

- conjointement le mouvement d'entrée et de sortie ;
- et le mouvement d'accessibilité d'un point de vue dynamique et non statique. C'est-à-dire qu'il tient compte de la fluidité et de la dynamique du mouvement.

Pour l'étude de répétabilité sur la note d'inconfort et l'identification des hauteurs de toit :

- l'identification des hauteurs de toit *Ht1* et *Ht2* est répétée **2 fois successivement** pour chaque essai. Si la différence entre ces deux identifications est inférieure ou égale à 20 mm, l'expérimentateur conserve la deuxième valeur **Vf=V2**. Dans le cas contraire, la hauteur de toit prend la valeur moyenne telle que **Vf=(V1+V2)/2**.
- les essais effectués sur la **Citroën Xsara sont également répétés 3 fois** au cours de l'expérimentation : en début, au milieu et en fin d'expérimentation (Cf. Figure 21).

Id	Nom	Hsiege	Htoit	Lbav	Hbav	Hplanc	Ltoit	Pmil	Pmhaut	Pavant	Htoit25	Valeur Htoit Ht		
		Hs	Ht	Lb	Hb	Hp	Lt	Dpm	Dpm2	Dpa	Ht25	V1	V2	Vgardée
1	24_EG_Calib													
2	24_EG_ROM													
3	24_EG_Xsa_Cfg_1	695	771	431	313	343	200	108	172	709	324			
4	24_EG_Xsa_Ht1_1		Ht1											
5	24_EG_Xsa_Ht2_1		Ht2											
6	24_EG_ATT_Cfg_1	448	728	549	73	227	240	180	383	681	317			
7	24_EG_Hs2_Ht1_1	Hs2 550	Ht1	460	f(Hs2) 190	f(Hs2) 290	f(Hs2) 220	f(Hs2) 100	f(Hs2) 150	750	f(Hs2) 334			
8	24_EG_Hs2_Ht2_1		Ht2											
9	24_EG_Hs2_HtM_1		HtM											
10	24_EG_Hs2_Lb2_1		Ht1	540										
11	24_EG_Hs2_LbM_1			500										
12	24_EG_Hs3_Ht1_1	Hs3 700	Ht1	450	f(Hs3) 280	f(Hs3) 350	f(Hs3) 250	f(Hs3) 100	f(Hs3) 150	750	f(Hs3) 341			
13	24_EG_Hs3_Ht2_1		Ht2											
14	24_EG_Hs3_HtM_1		HtM											
15	24_EG_Hs3_Lb2_1		Ht1	520										
16	24_EG_Hs3_LbM_1			480										
17	24_EG_Xsa_Cfg_2	695	771	431	313	343	200	108	172	709	324			
18	24_EG_Xsa_Ht1_2		Ht1											
19	24_EG_Xsa_Ht2_2		Ht2											
20	24_EG_Hs1_Ht1_1	Hs1 470	Ht1	470	f(Hs1) 110	f(Hs1) 240	f(Hs1) 220	f(Hs1) 150	f(Hs1) 250	750	f(Hs1) 324			
21	24_EG_Hs1_Ht2_1		Ht2											
22	24_EG_Hs1_HtM_1		HtM											
23	24_EG_Hs1_Lb2_1		Ht1	550										
24	24_EG_Hs1_LbM_1			510										
25	24_EG_Xsa_Cfg_3	695	771	431	313	343	200	108	172	709	324			
26	24_EG_Xsa_Ht1_3		Ht1											
27	24_EG_Xsa_Ht2_3		Ht2											

Figure 21 : Exemple de fiche d'essais randomisée (participant 24_EG).

De manière à confirmer la validité de l'évaluation de l'inconfort et de l'identification des hauteurs de toit, un deuxième opérateur relève en parallèle les notes d'inconfort et les hauteurs de toit.

- **<u>Déroulement des essais :</u>**

Une fois que le participant juge qu'il a compris l'échelle d'inconfort et qu'il se sent capable d'identifier les hauteurs de toit, l'expérimentation à proprement parler débute. L'expérimentation se déroule alors de la même manière pour tous les participants :

1. Première série d'essais pour une assise donnée (*Hs2* dans l'exemple de la Figure 21),
2. Deuxième série d'essais pour une deuxième hauteur d'assise donnée,
3. Etude de répétabilité et 1ère répétition des essais sur la Xsara (en gris clair sur la Figure 21),
4. Troisième série d'essais pour la troisième hauteur d'assise donnée,
5. Etude de répétabilité et 2ère répétition des essais sur la Xsara (en gris clair).

Pour chacune des configurations, le déroulement est également toujours le même :

- le cas échéant, le participant identifie une hauteur de toit particulière ;
- il évalue ensuite l'inconfort perçu. L'opérateur, toujours le même, remplit le questionnaire à partir de l'évaluation et des remarques du participant. Le participant peut entrer et sortir du conformateur autant de fois qu'il le juge nécessaire pendant l'évaluation ;
- l'opérateur lance consécutivement l'acquisition de l'entrée et de la sortie du conformateur. Etant donné que l'acquisition se fait après l'évaluation de l'inconfort, le participant a eu le temps de se familiariser avec la configuration et d'y adapter son mouvement ;

Avant chaque enregistrement, l'opérateur rappelle les consignes, que celui-ci doit respecter à savoir :

- ne pas utiliser la portière lors des essais ;
- en début de mouvement, se tenir face à la plate-forme de force, les bras le long du corps ;
- une fois assis, poser les mains sur le volant, les pieds sur le plancher et rester immobile pendant au moins trois secondes ;
- en fin de mouvement, se tenir dos à la plate-forme de force, les bras tendus le long du corps.

De manière à limiter l'influence de l'environnement et de la fatigue des participants sur les réponses émises, l'ordre de passage des essais sur les 3 hauteurs d'assise est randomisé. La Figure 21 présente le déroulement d'une expérimentation type (participant 24_EG).

Pour limiter la fatigue du participant tout au long de l'expérimentation, une pause, de 5 à 10 minutes selon le souhait du participant, lui est imposée à chaque passage à une nouvelle configuration d'assise, soit 6 pauses sur l'ensemble de l'expérimentation.

- **Clôture de la séance :**

Pour conclure l'expérimentation, l'opérateur interroge le participant sur le déroulement de l'expérimentation. Il lui demande :

- S'il a trouvé le conformateur suffisamment réaliste pour une telle étude,
- S'il pense que certains éléments du conformateur pourraient être améliorés,
- Et de décrire les critères qu'il a utilisés pour identifier les deux hauteurs de toit particulières.

En plus du relevé papier, l'interview est systématiquement enregistrée sur un magnétophone.

Les expérimentations ont duré en moyenne 4h30 pour chaque participant.

4. Traitement des données expérimentales

Au total, 26 personnes ont participé à l'expérimentation et 27 mouvements d'entrée et de sortie ont été enregistrés pour chacun d'eux, soit 702 mouvements au total. A l'issue de l'expérimentation, nous disposons ainsi :

- des mesures anthropométriques de chaque participant ;
- des trajectoires tridimensionnelles des marqueurs posés sur le participant et le conformateur ;
- de la mesure des efforts de contact entre ce dernier et son environnement ;
- des mesures issues des nappes de pression ;
- des notes d'inconfort et des identifications des éléments de l'habitacle gênants et des parties corporelles gênées ;

La démarche générale, présentée Figure 22, est développée en détails dans les paragraphes suivants.

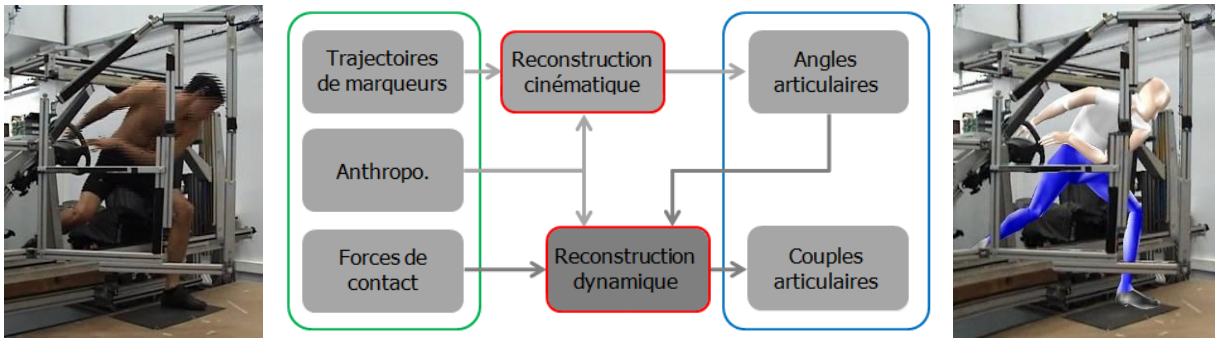


Figure 22 : Approche globale de reconstruction des mouvements.

4.1. Traitement préliminaire

4.1.1. Labellisation des marqueurs sous le logiciel Nexus de Vicon

La labellisation est la première étape de traitement des données expérimentales. Il s'agit d'identifier pour chaque essai les marqueurs installés sur le participant et sur le conformateur. La Figure 23 présente la superposition de l'enregistrement vidéo et d'un essai Vicon obtenu à l'issu du tracking.

Figure 23 : Labellisation des marqueurs sous le logiciel Nexus (Vicon).

4.1.2. Définition d'un repère de travail

Toutes les données (trajectoire des marqueurs et mesures de forces) sont exprimées dans le même système de coordonnées, le repère Hx défini d'après les recommandations de Society of Automotive Engineering SAEJ100 [SAE_97]. Pour rappel, l'origine du repère se trouve au milieu du siège, l'axe X est orienté vers l'arrière du véhicule, l'axe Y vers la droite et l'axe Z vers le haut (Figure 24).

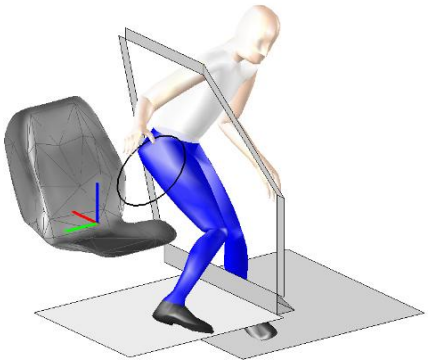


Figure 24 : Système de coordonnées globales utilisé pour caractériser toutes les mesures expérimentales (en rouge l'axe x, en vert l'axe y et en bleu l'axe z).

4.1.3. Echantillonnage des essais

Toutes les mesures expérimentales sont échantillonnées de manière à ne conserver que le mouvement effectif et à faciliter la comparaison des différents essais. Le mouvement d'entrée est donc extrait du mouvement global comme suit: le mouvement débute lorsque la pointe du pied droit quitte le sol et est au-delà de 10 mm du sol. A partir de cet instant tous les efforts externes sont connus. Il se conclut quand la norme de la vitesse du marqueur C7T1 (placé entre l'articulation C7 et T1 de la colonne, cf. Annexe 5.2.2.) est inférieure à 1 cm/s. Cette frame correspond à l'instant où le participant est assis statique dans le siège.

De la même manière pour le mouvement de sortie, le mouvement commence quand la norme de la vitesse du marqueur C7T1 est supérieure à 1 cm/s. Cet instant correspond à l'instant où le participant quitte sa posture statique dans le siège. Il se termine quand le talon du pied droit atteint le sol et arrive à moins de 10 mm du sol. Jusqu'à cet instant, tous les efforts externes sont encore connus.

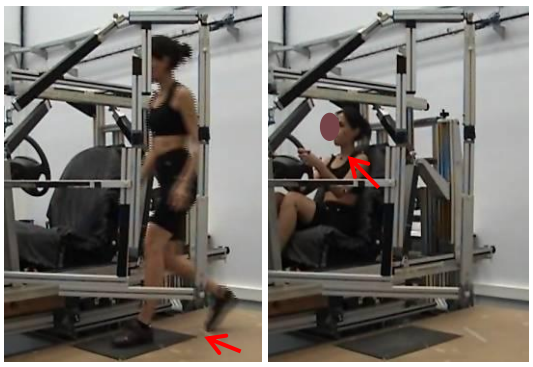
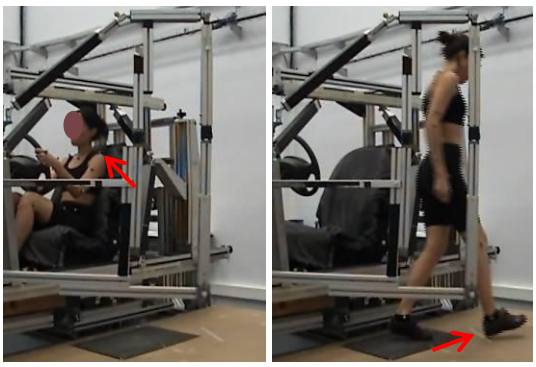
(a)  (b) 

Figure 25 : Définition des instants de début et fin de mouvement pour l'entrée (a) et la sortie (b).

4.1.4. Création des mannequins numériques pour tous les participants

Pour ce travail, le mannequin Ramsis est utilisé. Un équivalent numérique de chaque participant est créé à partir des dimensions anthropométriques collectées et du module Bodybuilder du logiciel Ramsis. Ensuite, ce modèle individualisé est exporté dans le logiciel RPx, un outil développé en interne à l'Ifsttar, permettant de reconstruire le mouvement. Un ajustement des longueurs des segments est possible sous RPx si la superposition du modèle numérique avec les photos n'est pas satisfaisante (cf. Figure 26).

4.1.5. Attachement des marqueurs

Une fois le mannequin mis aux dimensions du participant, nous pouvons débuter la phase d'attachement des marqueurs. L'objectif est de définir la position des marqueurs placés sur le participant dans le repère du segment auquel ils appartiennent. Le principe consiste à superposer une représentation schématique du modèle sur deux photos (dans différentes prises de vue) à la posture du participant dans un espace calibré. Cette superposition est obtenue en ajustant simultanément les dimensions des segments corporels et les angles articulaires (cf. Figure 26).

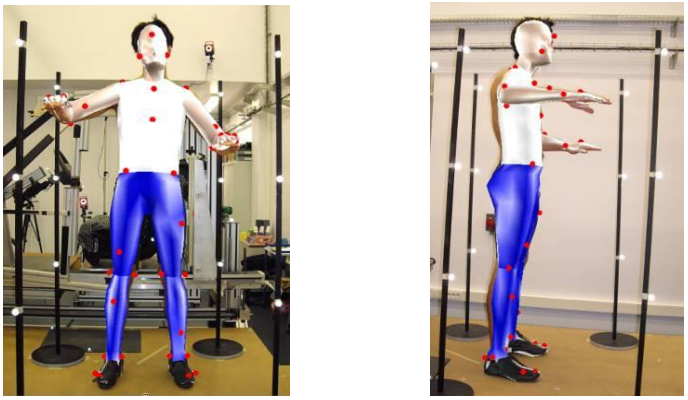


Figure 26 : Superposition du mannequin sur les deux photos lors de l'attachement des marqueurs sous le logiciel RPx.

4.2. Reconstruction cinématique du mouvement

La cinématique du mouvement est reconstruite par cinématique inverse à partir de la trajectoire des marqueurs scotchés sur les participants et du logiciel RPx. Celui-ci utilise une méthode d'optimisation qui minimise l'écart entre la position des marqueurs réels mesurés et des marqueurs virtuels attachés au mannequin numérique (cf. Monnier [MON_04]).

L'algorithme suit une méthode semi-globale itérative. C'est-à-dire qu'il utilise un modèle cinématique, dans notre cas le modèle Ramsis, qui va contraindre la position et l'orientation des segments corporels par l'ajout de contraintes cinématiques. Il garantit ainsi l'obtention de postures réalistes et limite les erreurs de mesure inhérentes à l'utilisation d'un système optoélectronique (mouvement de peau, perte de marqueurs, etc.) à partir de la surabondance des données mesurées (nombre de marqueurs par segment). La démarche se veut également itérative dans le sens où les corps rigides sont traités de manière hiérarchique comme une structure arborescente. L'avantage est qu'elle permet de réduire un problème complexe faisant intervenir l'ensemble des segments en sous-problèmes plus simples.

D'autre part, dans le cas de la colonne vertébrale, il est impossible de mesurer le mouvement de tous les segments à partir de marqueurs externes (pas assez de marqueurs pour caractériser tous les degrés de liberté, et la pose de marqueurs sur la colonne gênerait l'assise des participants). Le nombre des contraintes connues est inférieur au nombre des degrés de liberté. Le problème de reconstruction étant sous contraint, des postures aberrantes peuvent apparaître. Pour empêcher cela, une loi de comportement entre les angles articulaires de la colonne a été introduite (Monnier et al. [MON_07]).

Enfin, les angles articulaires sont filtrés à l'issue de la reconstruction à l'aide d'un filtre Butterworth d'ordre 5 avec une fréquence de coupure de 10Hz. La Figure 27 et la Figure 28 présentent le résultat de la reconstruction du participant 01_GM pour respectivement le mouvement d'entrée et de sortie).

La Figure 41 en Annexes illustre le processus de reconstruction utilisé sous RPx pour obtenir les angles et les couples articulaires.

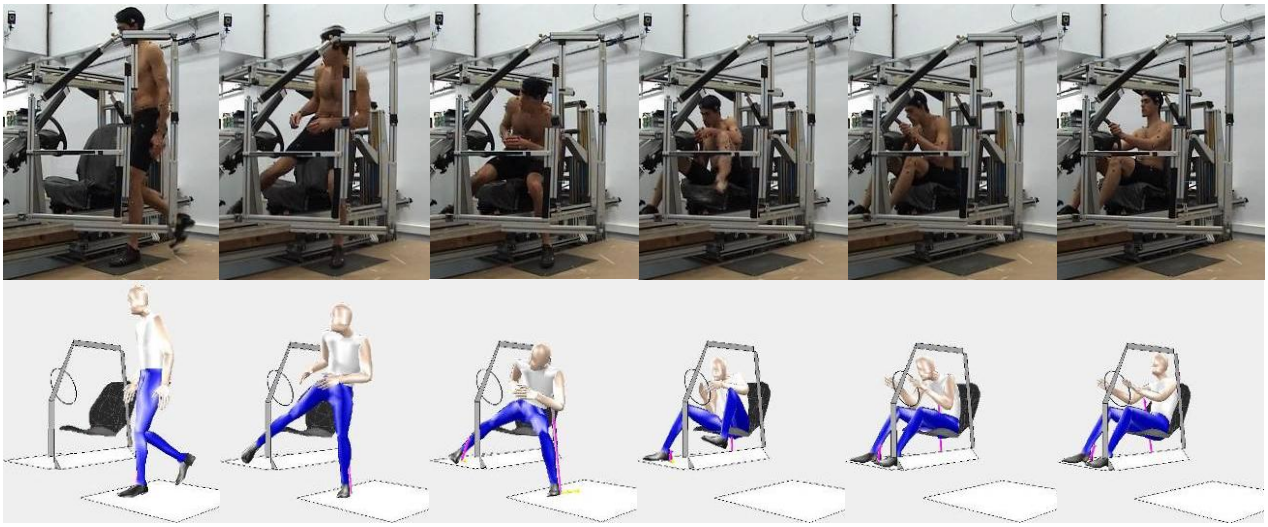


Figure 27 : Résultat de la reconstruction cinématique et dynamique pour l'entrée du 1er participant.

4.3. Reconstruction dynamique

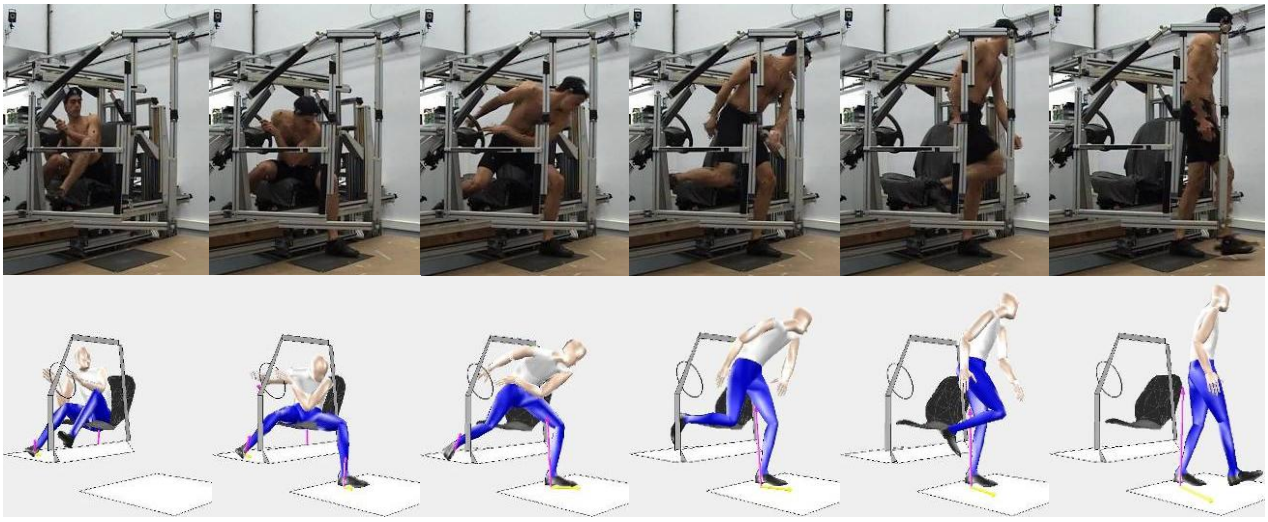


Figure 28 : Résultat de la reconstruction cinématique et dynamique pour la sortie du 1er participant.

Une fois la cinématique du mouvement reconstruite, les couples articulaires sont calculés par dynamique inverse (Robert et al. [ROB_07]) à partir de la cinématique du mouvement, des efforts externes et des propriétés massiques et inertielles des segments corporels (cf. Figure 27 pour l'entrée et Figure 28 pour la sortie). Dans notre cas, le couple articulaire correspond à la somme de tous les couples agissant sur le segment (Bothner et al. [BOT_01]), à savoir les couples dus à la gravité, les couples moteurs dépendants du mouvement, les efforts de contact et les couples musculaires.

La procédure utilise l'algorithme de Newton-Euler associé au formalisme des matrices homogènes (Legnani et al. [LEG_96]). L'intérêt du formalisme par opérateurs homogènes est 1/ qu'il s'avère adapté pour des mouvements complexes faisant intervenir l'ensemble des segments corporels, 2/ qu'il

est très simple à mettre en œuvre et très performant par son adéquation avec les langages informatiques, puisque tous les calculs sont ramenés à des opérations matricielles, et 3/ qu'il a déjà fait ses preuves pour la marche (Bonnefoy [BON_03]) et l'accessibilité (Causse et al. [CAU_09]). Le lecteur peut se référer au mémoire de thèse de Doriot (2001) pour une description complète du calcul de dynamique inverse, et du formalisme des matrices homogènes.

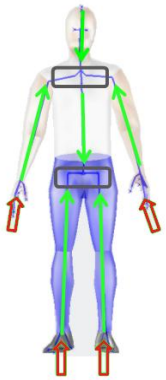


Figure 29 : Calcul itératif des efforts articulaires nets.

Pour ce travail, les paramètres inertiels des segments corporels sont estimés à partir des équations de régression proposées par Dumas et al. [DUM_07]. Les efforts articulaires sont calculés itérativement à chaque instant en isolant les segments corporels du plus distal au plus proximal (cf. Figure 29). Deux stratégies récursives sont utilisées : la première, appelée stratégie montante, calcule les paramètres dynamiques dans le membre inférieur, en partant des pieds (pour lesquels les efforts externes sont connus par les plates-formes de force) et en remontant jusqu'au bassin. La seconde, appelée stratégie descendante, commence par les mains et descend à travers le membre supérieur et le tronc jusqu'au bassin. La différence entre les couples articulaires obtenus par ces deux stratégies est utilisée pour estimer la qualité de la reconstruction (Robert et al. [ROB_07]).

Pour l'algorithme, il est nécessaire de caractériser les contacts entre le participant et l'environnement. Ainsi pour notre expérimentation, nous choisissons que (cf. Figure 30-a) :

- les efforts relevés par la plate-forme posée sur le sol soient appliqués sur le pied gauche ;
- les efforts relevés par la plate-forme posée sur le plancher soient appliqués sur le pied droit ;
- les efforts relevés par la plate-forme installée sous le siège soient appliqués sur le bassin ;
- les efforts relevés par le capteur derrière le volant soient appliqués sur la main droite.

Les efforts relevés par les plates-formes (sol, plancher et siège) sont pris en compte dans la stratégie montante ; les efforts relevés par le capteur de force derrière le volant dans la stratégie descendante.

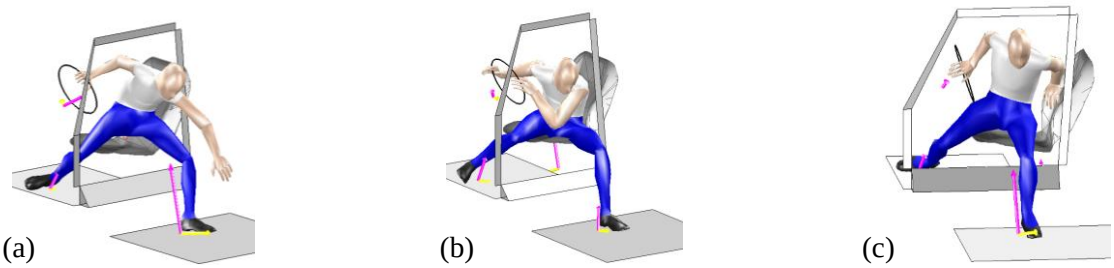


Figure 30 : Différents types de contact entre les participants et l'environnement (a) situation parfaite, (b) double contact volant et (c) contact non mesuré sur le siège.

Toutefois, l'analyse des mouvements a fait apparaître une grande disparité dans l'utilisation de l'environnement par le participant. Tout d'abord, il est apparu qu'un participant pouvait pousser avec ses deux mains sur le volant (cf. Figure 30-b). Dans ce cas de figure, il ne nous est pas possible de connaître la répartition des efforts entre le bras droit et le bras gauche. Pour cette partie du mouvement, nous ne pourrons pas estimer les efforts articulaires du membre supérieur. Toutefois étant donné que le calcul se fait suivant deux stratégies (montante et descendante), les efforts du membre inférieur, quant à eux, peuvent être estimés.

Un deuxième cas de figure est également apparu pour deux participants (07_SM et 10_SP) et ce seulement pour 3 essais correspondant aux configurations avec la largeur de bavolet la plus importante et l'assise la plus basse. Le participant a poussé sur le dossier du siège avec sa main gauche pour faciliter sa sortie (cf. Figure 30-c). Pour ce cas de figure, il ne nous est pas possible de dissocier les efforts appliqués par la main gauche de ceux du bassin. Toutefois, les efforts du membre inférieur et du bras droit sont utilisables.

5. Evaluation de la qualité de la reconstruction des mouvements

Pour cette partie, nous nous intéressons à la qualité des mouvements reconstruits. Nous traitons le problème en deux temps :

1. concernant la reconstruction cinématique, une inspection visuelle des mouvements reconstruits est effectuée. De plus, le résidu correspondant à la distance entre la position capturée des marqueurs et leurs positions reconstruites est calculé.
2. concernant la reconstruction dynamique. Nous comparons les couples articulaires calculés au niveau du bassin obtenus à partir des deux stratégies de calcul (montante et descendante).

5.1. Pour la reconstruction cinématique

L'analyse visuelle de la reconstruction nous permet de valider la qualité de la reconstruction obtenue. L'erreur la plus importante est liée à la perte des marqueurs RASI et LASI scotchés sur les crêtes iliaques antérieures du bassin. Notre mannequin se positionne dans l'espace à partir de ces deux marqueurs. Ainsi s'ils disparaissent, l'algorithme a des difficultés à positionner le mannequin, entrainant des sauts du bassin.

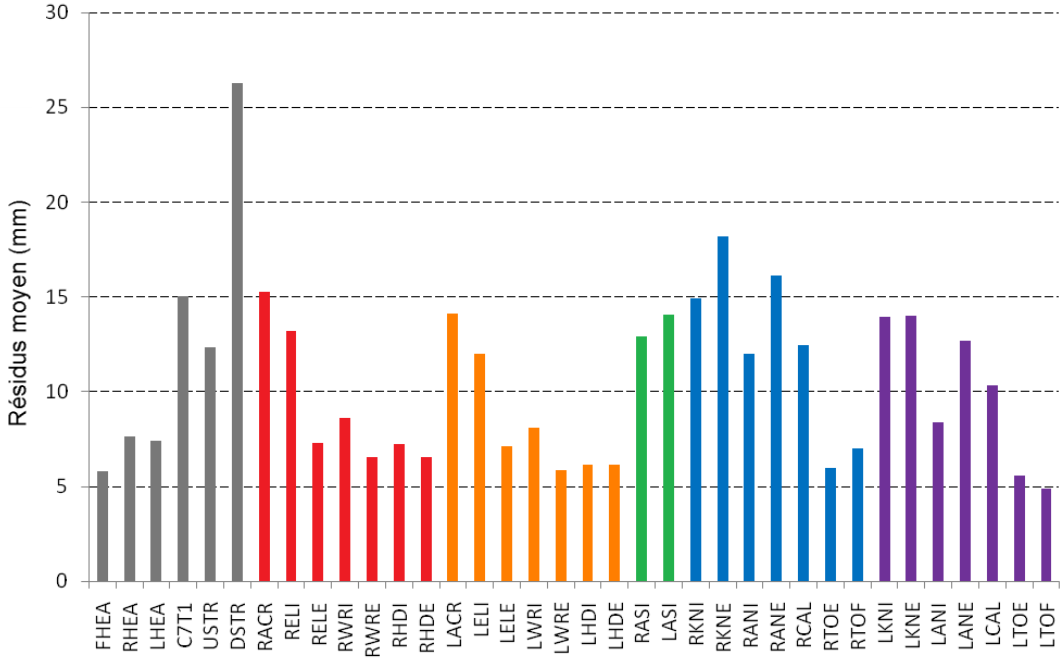


Figure 31 : Histogramme des valeurs moyennes des résidus des marqueurs installés sur les participants pour tous les essais de l'expérimentation.

Le résidu moyen entre la position capturée des marqueurs et leurs positions reconstruites est de 10±5 mm pour tous les marqueurs et tous les essais. L'erreur la plus importante est obtenue pour le marqueur sur le sternum (26 mm en moyenne pour tous les essais, cf. Figure 31). Ceci est notamment dû à deux raisons : pour les femmes, ce marqueur (DSTR) est posé sur la brassière, il est donc soumis au mouvement du tissu ; pour les personnes avec une forte corpulence, le ventre a tendance à surélever le marqueur. Les faibles erreurs des autres marqueurs confirment la robustesse de la reconstruction.

La Figure 32 présente le graphe des moyennes des résidus à chaque instant pour un essai donné. Elle nous donne un ordre de grandeur de l'erreur globale et permet de visualiser l'évolution de cette erreur au cours du temps. De manière générale, le résidu moyen à tendance à augmenter au cours du mouvement, ce qui peut s'expliquer par le fait que le participant s'écarte de plus en plus de la posture dans laquelle le modèle a été calibré. De manière générale, que ce soit pour l'entrée ou pour la sortie, l'erreur moyenne est comprise à chaque instant entre 6 et 17 mm.

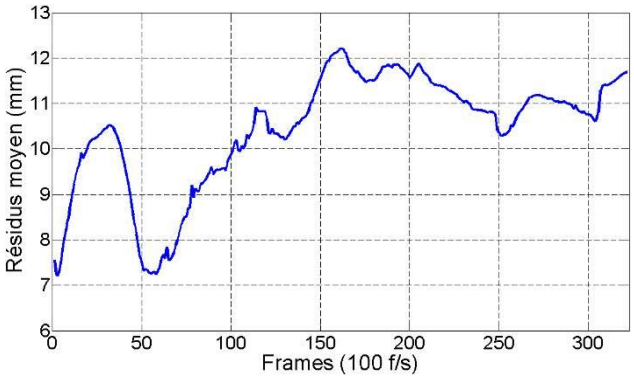


Figure 32 : Exemple de graphe des moyennes des résidus à chaque instant pour un mouvement d'entrée (09_SA_Hs2_Ht1).

5.2. Pour la reconstruction dynamique

Dans un premier temps, l'équilibre statique des forces est vérifié. Le Tableau 13 présente l'équilibre statique pour tous les essais et tous les mouvements quand le participant est assis statique dans le siège. Les résultats sont représentatifs de la précision des appareils de mesure. La plus grande erreur est obtenue pour les forces verticales. Toutefois, nous considérons qu'elle reste acceptable.

Tableau 13 : Equilibre statique des efforts externes appliqués sur le participant quand il est assis statique dans le siège (valeurs moyennées pour tous les participants et toutes les configurations pour l'entrée et la sortie).

	X	Y	Z
∑Fext (N)	-5±9	7±5	15±7

X, Y and Z référent au système de coordonnées global (cf. Figure 24)

La qualité de la reconstruction dynamique est vérifiée en comparant les couples articulaires appliqués entre le bassin et l'abdomen, obtenus à partir des 2 stratégies de calcul (montante et descendante). Si le modèle est parfait et s'il n'y a pas d'erreur de mesure, les deux stratégies de calcul doivent obtenir le même effort au niveau du bassin. Cependant à cause des imprécisions de mesure et de définition du modèle, une différence existe. Cette différence permet de donner un ordre idée de la précision du calcul par dynamique inverse. Pour quantifier cette différence, les valeurs RMS relatives RMS% sont calculées pour chaque force et chaque moment. Elles sont définies de la manière suivante :

$$RMS\% = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} e_i^2 \Big/ N}}{A}$$

Avec e_i l'écart entre les valeurs obtenues par la stratégie montante et la stratégie descendante, i le nombre de frames (N frames) and A l'amplitude définie comme la dispersion maximale absolue de chaque composant d'effort. Seule la dispersion maximale entre les 2 stratégies de calcul est conservée.

Les valeurs RMS relatives RMS% sont calculées et moyennées pour toutes les configurations et les sujets (cf. Tableau 14). Ces valeurs sont exprimées dans le repère bassin du mannequin Ramsis. Dans la posture debout, l'axe Z part du point milieu entre les deux centres articulaires des hanches et va jusqu'au centre de l'articulation de la hanche gauche. L'axe X pointe vers le haut. L'axe Y correspond au produit vectoriel de l'axe Z avec l'axe X. La Figure 33 illustre ces résultats pour le mouvement d'entrée (première ligne) et de sortie (deuxième ligne) du participant 26_AD sur la configuration Hs1_HtM.

Tableau 14 : Différence RMS et RMS relative des efforts appliqués entre le bassin et l'abdomen, calculés dans le système de coordonnées du bassin Ramsis (valeurs moyennées pour tous les sujets et toutes les configurations pour les essais échantillonnés).

		Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
Entrée	RMS	23±12	27±10	29±22	16±16	28±10	7±3
	RMS%	10±3	13±4	11±4	5±2	19±6	10±3
Sortie	RMS	28±15	29±15	33±23	20±12	25±9	9±4
	RMS%	13±4	16±4	18±5	7±2	18±5	11±4

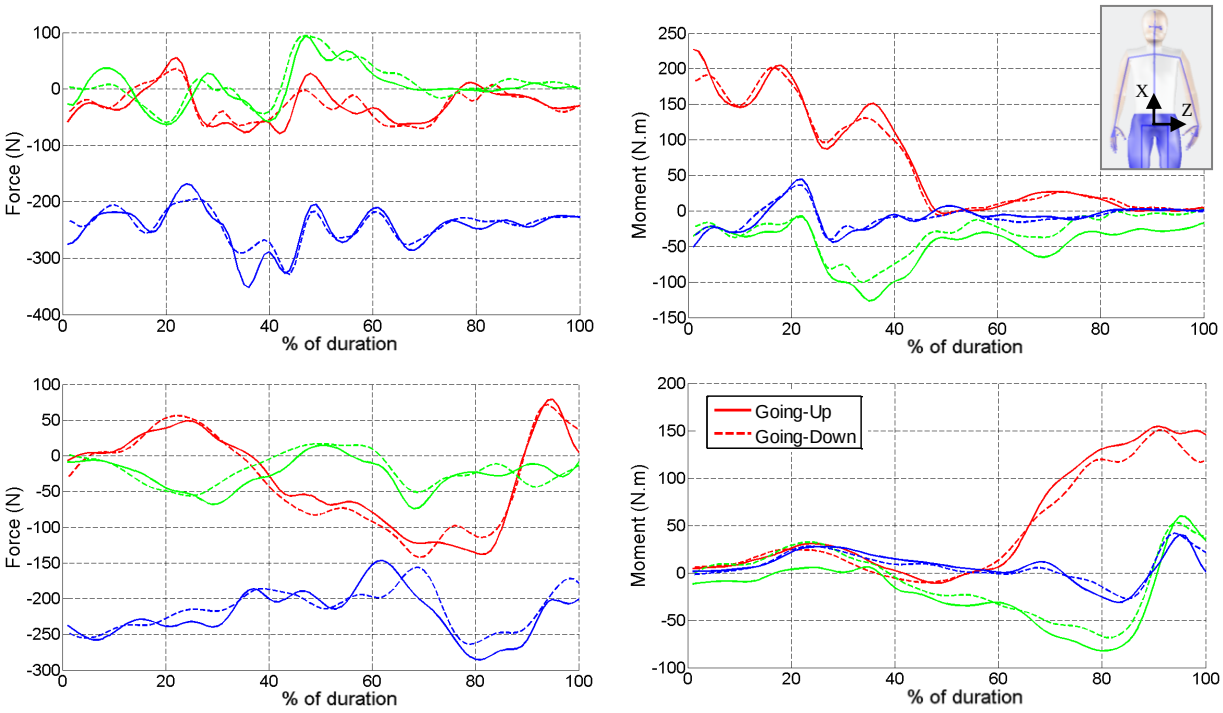


Figure 33 : Illustration des efforts (forces et moments) appliqués entre le bassin et l'abdomen calculés à partir de la stratégie montante (trait plein) et la stratégie descendante (pointillés) pour l'entrée (première ligne) et la sortie (deuxième) du participant 26_AD sur la configuration Hs1_HtM. Les lignes rouges, vertes et bleues sont respectivement pour les directions X, Y et Z.

Les valeurs RMS et RMS% obtenues sont cohérentes avec celles obtenues lors de notre étude préliminaire [CAU_09] et celles de Monnier et al. [MON_09] pour l'accessibilité de camion. La qualité de la reconstruction peut également être évaluée en examinant la forme générale de la représentation des efforts obtenue à partir des deux stratégies de calcul. Il apparaît qu'elles ont à peu prêt la même forme, suggérant que les résultats de la dynamique inverse sont cohérents (cf. Figure 33).

6. Bilan sur les mesures expérimentales et les données reconstruites

Les hauteurs de toit relevées par les expérimentateurs ont également été comparées avec la position du marqueur EMB3 (installé sur le toit) capturé avec le système Vicon. Un écart moyen de 6±2 mm a été observé pour l'ensemble des essais entre les valeurs relevées par les opérateurs et celles capturées. Pour 3 fichiers (06_TP_Hs2_LbM, 26_AD_Hs1_Ht2 et 26_AD_Hs1_LbM), un écart supérieur à 20 mm a été obtenu. Il est donc décidé de ne pas utiliser les données de ces 3 essais pour l'analyse.

Au final, 372 mouvements d'entrée/sortie ont été reconstruits avec succès. Les essais du participant 04_EB n'ont pas été reconstruits, car il est apparu lors de l'observation des vidéos que ses pieds étaient posés hors des plates-formes de force installées sur le sol et le plancher. La reconstruction dynamique n'est donc pas possible.

7. Annexes

7.1. Description des paramètres géométriques caractérisant la géométrie du véhicule

7.1.1. Lien entre les différents paramètres géométriques

Un premier bilan statistique des paramètres géométriques caractérisant l'embrasure est réalisé. Les dimensions suivantes sont considérées :

- la hauteur de siège par rapport au sol;
- la hauteur de toit par rapport au point H ;
- la hauteur et la largeur du bavolet par rapport au point H ;
- la largeur d'embrasure ;
- la distance du pied milieu au niveau du point H.

Pour cela, une base de données composée des dimensions de 165 véhicules de marques et de modèles différents est utilisée. Le Tableau 15 ci-dessous présente le bilan statistique pour ces dimensions. Toutefois la base de données étant incomplète, aucune donnée n'étant répertoriée pour définir la position du plancher, seul un échantillon composé de 11 véhicules représentatifs est utilisé. Notons que nous avons vérifié que les 11 configurations prennent en compte la grande variabilité des dimensions des véhicules présents dans toute la base de données.

Tableau 15 : Bilan statistique des variables étudiées à partir d'un échantillon composé de 165 véhicules de marques et de modèles différents.

Variables	Id	Panel	Min	Max	Etendue	Moy.	Coeff. Corr. avec Hs
Hauteur Siège / Sol	**Hs**	165	448	788	340	569	/
Hauteur Toit / pt H	**Ht**	165	718	859	141	772	0.52
Hauteur Toit à 25°	**Ht25**	165	708	835	127	759	0.70
Largeur Toit / pt H	**Lt**	11*	200	394	194	261	0.88
Hauteur Plancher / pt H	**Hp**	11*	270	385	115	315	0.93
Hauteur Bavolet / pt H	**Hb**	165	73	365	292	204	-0.82
Largeur Bavolet / pt H	**Lb**	165	429	549	120	481	-0.25
Hauteur Bavolet / Plancher	**Hbp**	11*	0	126	126	83	-0.66
Distance Pied Avant / pt H	**Dpa**	165	623	869	246	718	-0.19
Distance Pied Milieu / pt H	**Dpm**	165	8	656	648	140	-0.20
Distance Pied Milieu à 956mm	**Dpm2**	165	99	793	694	218	-0.38

* : Pour la hauteur de plancher Hp et de bavolet Hb, seul un panel de 11 véhicules est utilisé. Ces 11 véhicules sont sélectionnés de manière à balayer au mieux les 165 véhicules de la base de données PSA

Nous identifions ainsi une forte corrélation entre :

- la hauteur d'assise *Hs* et la hauteur de plancher *Hp*,
- la hauteur d'assise *Hs* et la hauteur de bavolet par rapport au plancher *Hb*,
- la hauteur de toit *Ht* et la hauteur de plancher *Hp*.

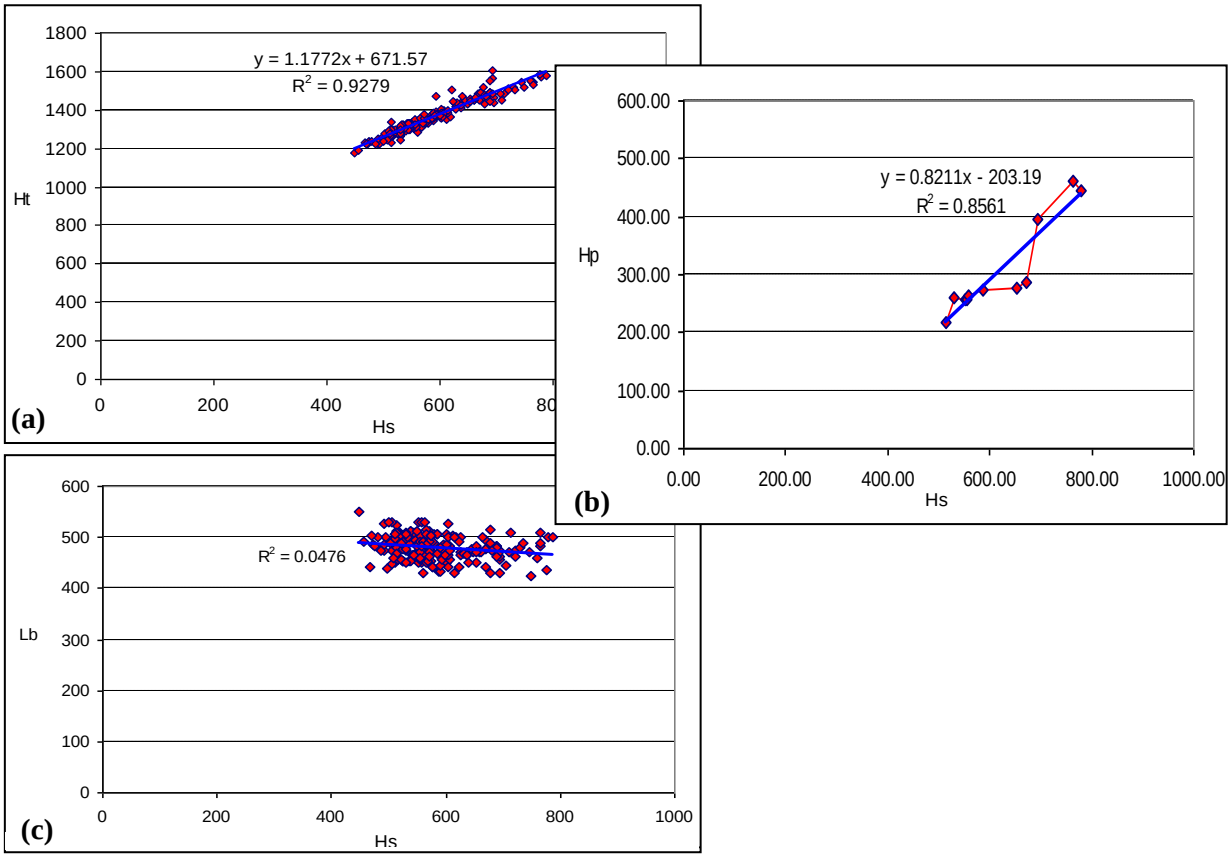


Figure 34 : Représentation pour les 165 véhicules de la base de données de (a) la hauteur de toit, (b) la hauteur de plancher et (c) la largeur de bavolet en fonction de la hauteur de siège.

7.1.2. Dimensions des configurations utilisées pour l'expérimentation

Tableau 16 : Dimensions des configurations utilisées.

Variables	Id	Hs1	Hs2	Hs3	Peugeot 207	Xsara Picasso	Audi TT
Hauteur Siège / Sol	**Hs**	470	550	700	560	695	448
Hauteur Toit / pt H	**Ht**	760	780	800	765	771	728
Hauteur Toit à 25°	**Ht25**	749	767	784	757	724	746
Largeur Toit / pt H	**Lt**	220	220	250	/	200	240
Hauteur Plancher / pt H	**Hp**	240	290	350	273	343	227
Hauteur Bavolet / pt H	**Hb**	110	190	280	186	313	73
Largeur Bavolet / pt H	**Lb**		480		491	431	549
Hauteur Bavolet / Plancher	**Hbp**	100	130	160	87	30.5	153
Distance Pied Avant / pt H	**Dpa**		750		741	709	681
Distance Pied Milieu / pt H	**Dpm**	150	100	100	33	108	180
Distance Pied Milieu à 956mm	**Dpm2**	250	150	150	129	172	383

7.2. Matériel de mesure

7.2.1. Chaine de mesure

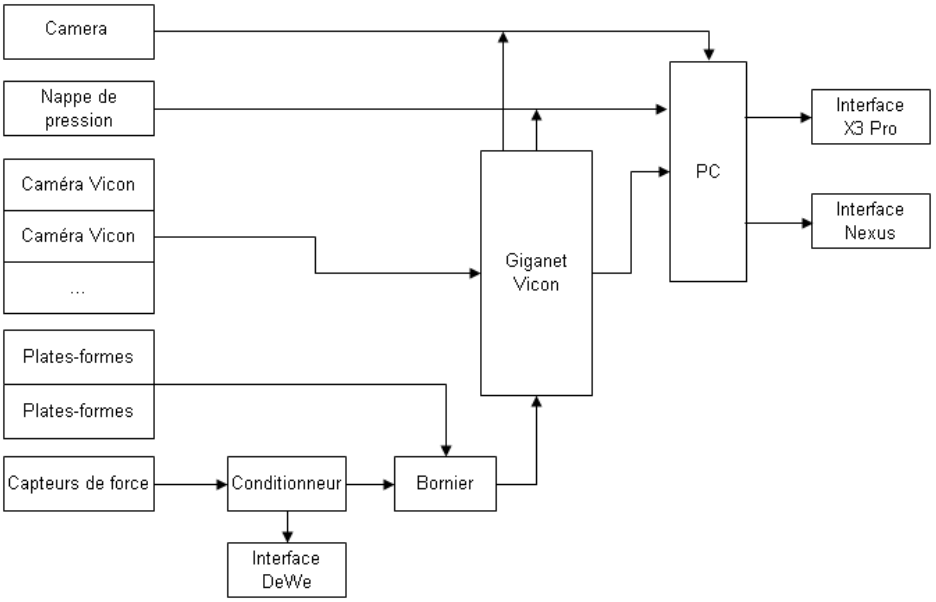
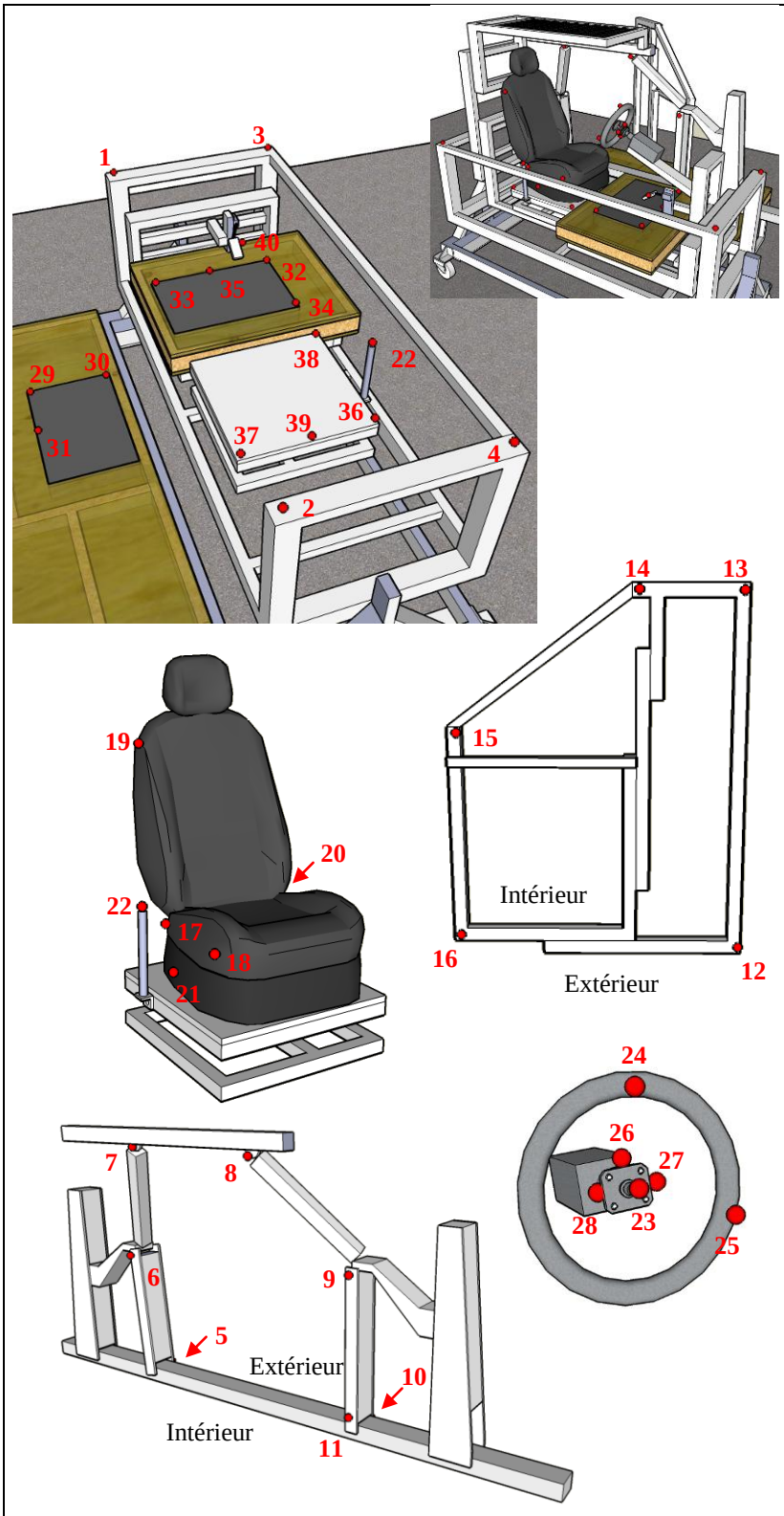
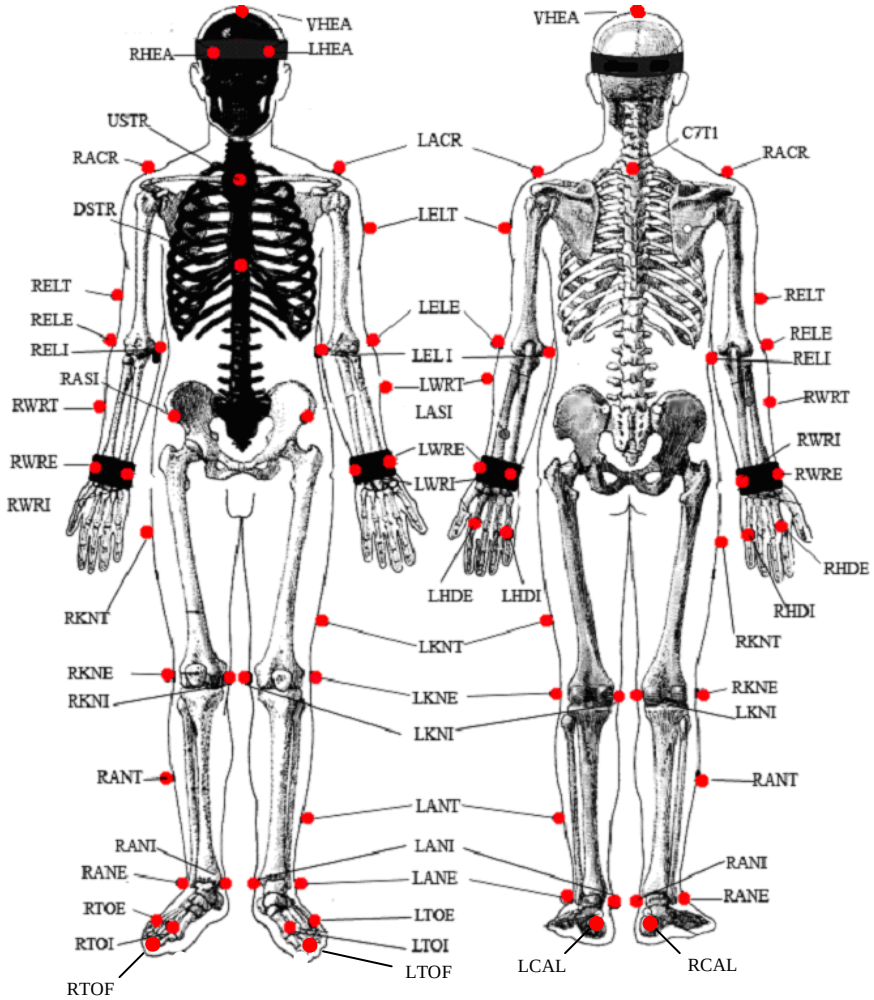


Figure 35 : Chaîne de mesure.

7.2.2. Installation des marqueurs rétro réfléchissants



1	MAQO	Maquette avant gauche
2	MAQL	Maquette arrière gauche
3	MAQS	Maquette avant droit
4	MAQT	Maquette arrière droit
5	EMB1	Embrasure arrière bas
6	EMB2	Embrasure arrière milieu
7	EMB3	Embrasure arrière haut
8	EMB4	Embrasure avant haut
9	EMB5	Embrasure avant milieu
10	EMB6	Embrasure avant bas ext.
11	EMB7	Embrasure avant bas int.
12	DOO1	Portière arrière bas
13	DOO2	Portière arrière haut
14	DOO3	Portière avant haut
15	DOO4	Portière avant milieu
16	DOO5	Portière avant bas
17	SEAO	Siège pivot droit
18	SEAL	Siège pivot gauche
19	SEAU	Siège haut droit
20	SEAF	Siège avant droit
21	GLISS	Glissière
22	PTHX	Point H (-308,8mm sur Y)
23	WHEO	Volant milieu
24	WHEU	Volant haut
25	WHER	Volant droit
26	WSEU	Capteur volant haut
27	WSER	Capteur volant droit
28	WSEL	Capteur volant gauche
29	GFPO	P.F. sol avant gauche
30	GFPL	P.F. sol arrière gauche
31	GFPS	P.F. sol avant droit
32	WFPO	P.F. plancher avant gauche
33	WFPL	P.F. plancher avant droit
34	WFPS	P.F. plancher arrière droit
35	WFPT	P.F. plancher avant milieu
36	SFPO	P.F. siège arrière droit
37	SFPL	P.F. siège arrière gauche
38	SFPF	P.F. siège avant droit
39	SFPT	P.F. siège arrière milieu
40	PED1	Pédale



VHEA	Vertex
RHEA	Tempe droite
LHEA	Tempe gauche
C7T1	Cervicale 7
USTR	Milieu de l'articul. sterno -claviculaires
DSTR	Sternum
RACR	Articulation acromio-claviculaire droite
LACR	Articulation acromio-claviculaire gauche
RELT	Bras droit
LELT	Bras gauche
RELE	Coude droit ext.
LELE	Coude gauche ext.
RELI	Coude droit int.
LELI	Coude gauche int.
RWRT	Avant bras droit
LWRT	Avant-bras gauche
RWRE	Poignet droit ext.
LWRE	Poignet gauche ext.
RWRI	Poignet droit int.
LWRI	Poignet gauche int.
RHDE	Carpe droit ext.
LHDE	Carpe gauche ext.
RHDI	Carpe droit int.
LHDI	Carpe gauche int.
RASI	Crête iliaque ant. droite
LASI	Crête iliaque ant. gauche
RKNT	Cuisse droite
LKNT	Cuisse gauche
RKNE	Genou droit ext.
LKNE	Genou gauche ext.
RKNI	Genou droit int.
LKNI	Genou gauche int.
RANT	Tibia droit
LANT	Tibia gauche
RANE	Malléole droite ext.
LANE	Malléole gauche ext.
RANI	Malléole droite int.
LANI	Malléole gauche int.
RTOE	Tarse droit ext.
LTOE	Tarse gauche ext.
RTOF	Tarse droit front
LTOF	Tarse gauche front
RCAL	Calcaneum droit
LCAL	Calcaneum gauche
Total marqueurs	44

7.2.3. Plates-formes de force sur le sol et le plancher

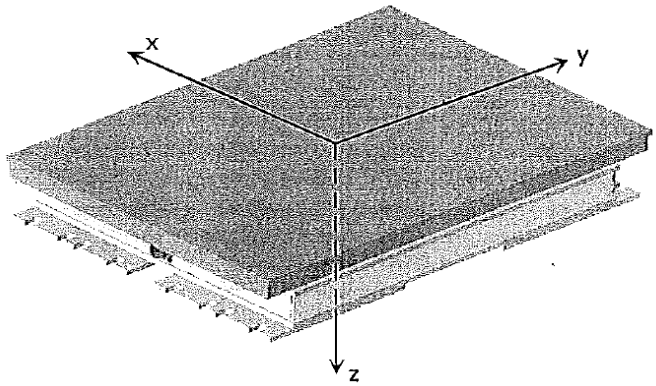


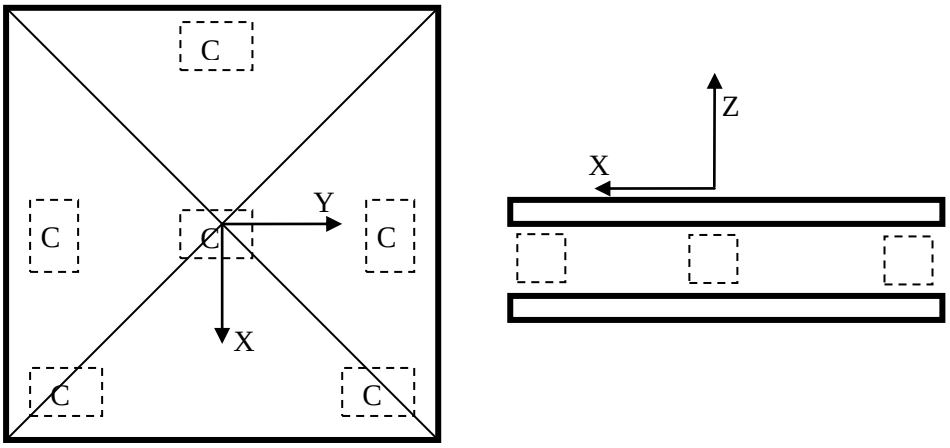
Figure 36 : Fiche technique du capteur volant.

Tableau 17 : Caractéristiques des plates-formes de force Bertec®.

	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
Plage (x)	10000	10000	20000	6000	4000	3000

x : Newton pour Fx, Fy et Fz, ou en Newton mètre pou Mx, My et Mz

7.2.4. Plate-forme de force sous le siège



Vue du dessus Vue de côté

Figure 37 : Fiche technique de la plate-forme sous le siège.

Les capteurs C1, C2 et C6 mesurent les efforts appliqués sur la plateforme en Z, les capteurs C3 et C5 ceux en X et le capteur C4 ceux en Y. Pour chacun de ces capteurs, l'étendue de mesure est de 50daN. D'après le principe fondamental de la statique, les composantes Fx, Fy et Fz de la force appliquée sont obtenues à partir des données issues des capteurs.

Tableau 18 : Caractéristiques de la plate-forme sous le siège.

Capteur	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Plage (x)	500	500	500	500	500	500
Sensibilité (mV/V/x)	0.0014	0.0007	-0.0022	0.0022	-0.0022	0.0020

x : Newton.

7.2.5. Capteur d'efforts sous le volant

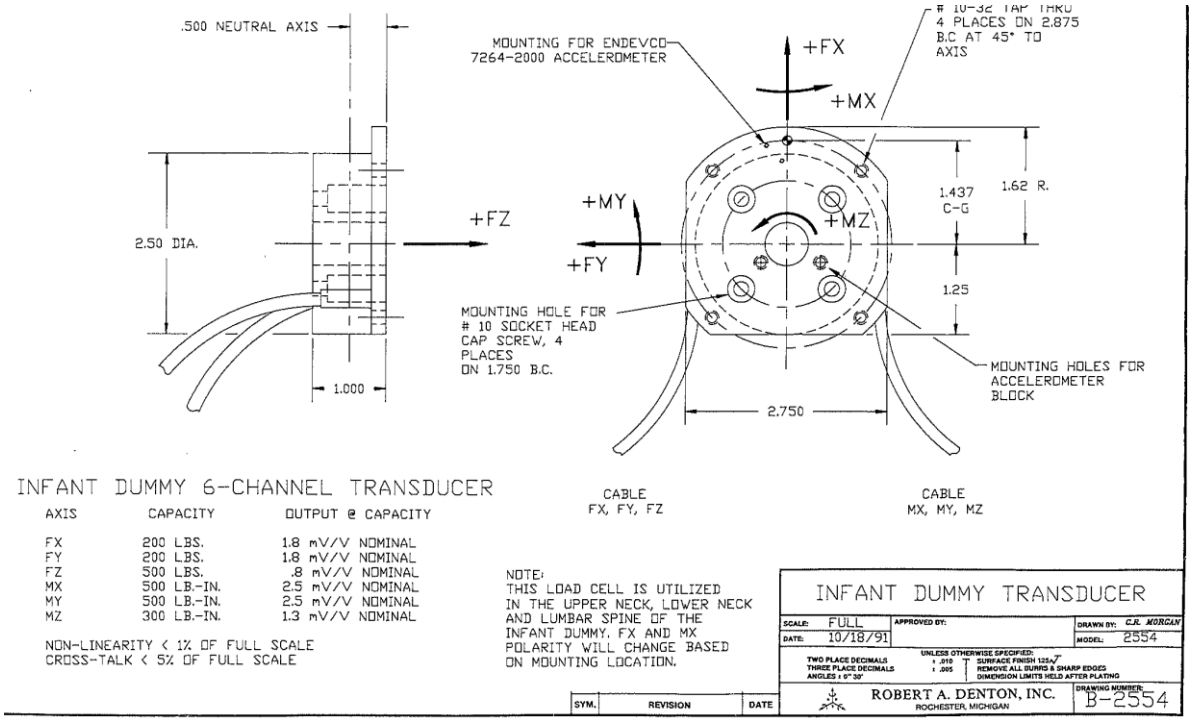


Figure 38 : Fiche technique du capteur volant.

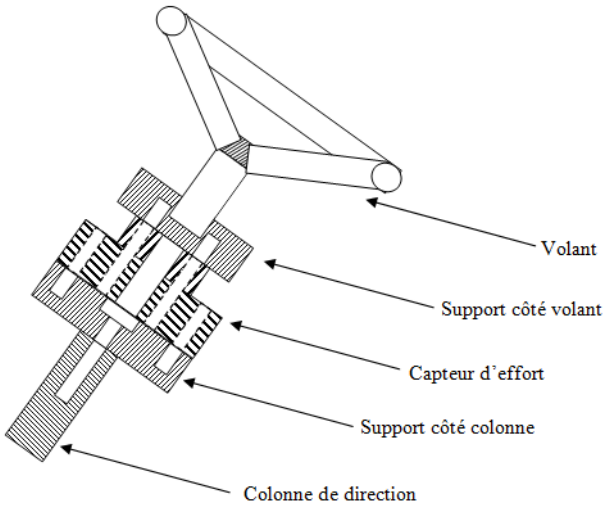


Figure 39 : Schéma de montage du capteur volant.

Tableau 19 : Caractéristiques du capteur volant.

	Fx	Fy	Fz	Mx	My	Mz
Plage (x)	889.6	889.6	2224	56.5	56.5	33.9
Sensibilité (mV/V/x)	-0.0020	0.0020	0.0003	0.0239	0.0229	0.0402

x : Newton pour Fx, Fy et Fz, ou en Newton mètre pou Mx, My et Mz

7.3. Fiche d'essais type

FICHE ESSAIS

ID_Sujet
RE_RE

Id	Nom	Hsiege	Htoit	Lbav	Hbav	Hplanc	Lbranc	Dmil	Dmhaut	Davant	Hbranc	Valeur Htoit Ht			Evaluation Inconfort			Remarques
		Hs	Ht	Lb	Hb	Hp	Lbr	Dm	Dmh	D4	C9	V1	V2	Vgardée	Config	Entree	Sortie	
1	RE_RE_Calib																	
2	RE_RE_Xsa_Cfg_1	695	771	431	313	343	200	108	172	709	324							
3	RE_RE_Xsa_Ht1_1		Imin											0				
4	RE_RE_Xsa_Ht2_1		Imax											0				
5	RE_RE_ATT_Cfg_1	448	728	549	73	227	240	180	383	681	317							
6	RE_RE_Hs1_Ht1_1	Hs1 470	Imin	470	f(Hs1) 110	f(Hs1) 240	f(Hs1) 220	f(Hs1) 150	f(Hs1) 250	750	f(Hs1) 324			0				
7	RE_RE_Hs1_Ht2_1		Imax											0				
8	RE_RE_Hs1_HtM_1		Imoy											0				
9	RE_RE_Hs1_Lb2_1		Imin	550										0				
10	RE_RE_Hs1_LbM_1			510										0				
11	RE_RE_Hs2_Ht1_1	Hs2 550	Imin	460	f(Hs2) 190	f(Hs2) 290	f(Hs2) 220	f(Hs2) 100	f(Hs2) 150	750	f(Hs2) 334			0				
12	RE_RE_Hs2_Ht2_1		Imax											0				
13	RE_RE_Hs2_HtM_1		Imoy											0				
14	RE_RE_Hs2_Lb2_1		Imin	540										0				
15	RE_RE_Hs2_LbM_1			500										0				
16	RE_RE_Hs3_Ht1_1	Hs3 700	Imin	450	f(Hs3) 280	f(Hs3) 350	f(Hs3) 250	f(Hs3) 100	f(Hs3) 150	750	f(Hs3) 341			0				
17	RE_RE_Hs3_Ht2_1		Imax											0				
18	RE_RE_Hs3_HtM_1		Imoy											0				
19	RE_RE_Hs3_Lb2_1		Imin	520										0				
20	RE_RE_Hs3_LbM_1			480										0				
21	RE_RE_Xsa_Cfg_2	695	771	431	313	343	200	108	172	709	324							
22	RE_RE_Xsa_Ht1_2		Imin											0				
23	RE_RE_Xsa_Ht2_2		Imax											0				
24	RE_RE_Xsa_Cfg_3	695	771	431	313	343	200	108	172	709	324							
25	RE_RE_Xsa_Ht1_3		Imin											0				
26	RE_RE_Xsa_Ht2_3		Imax											0				
27	RE_RE_MockUp																	

Si |V2-V1|<20mm => On garde V2

Si |V2-V1|>20mm => On propose Valeur Moyenne

7.4. Relevé des informations personnelles et du ressenti général du participant

FICHE SUJET

ID_Sujet
RE_RE

Nom _____

Age _____ Sexe _____

Date _____ Heure _____

Infos Personnelles :

Activité professionnelle _____

Pratique sportive _____ Fréquence _____

Antécédents médicaux _____ Date _____

Véhicule Régulier _____ Fréquence _____

Situation en DEBUT d'expérimentation :

☐ Comment vous sentez vous actuellement ? (choix multiple)

☐ Très bien ☐ Relaxé ☐ Tendu

☐ Bien ☐ Heureux ☐ Malheureux

☐ Moyen ☐ En forme ☐ Fatigué

☐ Mal ☐ Malade

☐ Très mal ☐ Autres : _____

☐ Ressentez-vous une douleur particulière ?

☐ Oui _____

☐ Non

☐ Ressentez-vous cette douleur :

☐ Régulièrement

☐ Rarement

☐ Pour la 1ère fois

☐ Autres remarques :

_____

_____

_____

_____

_____

_____

ID_Sujet
RE_RE

Consignes :

- ☐ Dos droit collé contre le mur
- ☐ Bassin collé contre le mur
- ☐ Genoux à 90° quand assis sur le tabouret et pieds parallèles
- ☐ Bras à 90° pour la mesure de la longueur avant-bras

Mesures Anthropométriques :

☐ Stature non chaussée	_____	mm
☐ Largeur tête	_____	mm
☐ Hauteur tête	_____	mm
☐ Largeur épaules	_____	mm
☐ Longueur bras	_____	mm
☐ Largeur hanche	_____	mm
☐ Largeur pied	_____	mm
☐ Longueur pied	_____	mm
☐ Circonférence taille	_____	mm
☐ Circonférence bras	_____	mm
☐ Circonférence avant-bras	_____	mm
☐ Circonférence cuisse	_____	mm
☐ Circonférence mollet	_____	mm
☐ Profondeur thorax	_____	mm
☐ Longueur avant bras	_____	mm
☐ Longueur cuisse	_____	mm
☐ Hauteur genou	_____	mm
☐ Stature assise	_____	mm
☐ Stature assise naturelle	_____	mm
☐ Stature assise courbée	_____	mm
☐ Hauteur assise	_____	mm
☐ Hauteur buste	_____	mm (Calculée)
☐ Stature chaussée	_____	mm
☐ Masse	_____	kg

Remarques :

_____

_____

_____

_____

ID_Sujet
RE_RE

Situation en FIN d'expérimentation :

☐ Comment vous sentez vous actuellement ? (choix multiple)

☐ Très bien ☐ Relaxé ☐ Tendu
☐ Bien ☐ Heureux ☐ Malheureux
☐ Moyen ☐ En forme ☐ Fatigué
☐ Mal ☐ Malade
☐ Très mal ☐ Autres : _____

☐ Ressentez-vous une douleur particulière ?

☐ Oui _____
☐ Non

☐ Ressentez-vous cette douleur :

☐ Régulièrement
☐ Rarement
☐ Pour la 1ère fois

☐ Impression sur l'expérimentation (echelle d'inconfort, Maquette,etc) :

_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____

☐ Autres remarques :

_____
_____
_____
_____
_____
_____
_____

7.5. Relevé de l'inconfort : Questionnaire

FICHE INCONFORT

ID_Sujet	ID_Config
RE_RE	Xsa_Cfg_1

Configuration testé Xsara Picasso - Config. 2

☐ Valeur de Premier inconfort Non mesuré

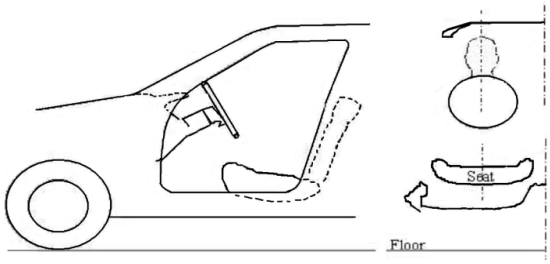
☐ Valeur d'Extrême inconfort Non mesuré

Evaluation de la configuration

Tres Faible										Faible										Moyen										Fort										Tres Fort											
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	...

Evaluation de l'ENTREE

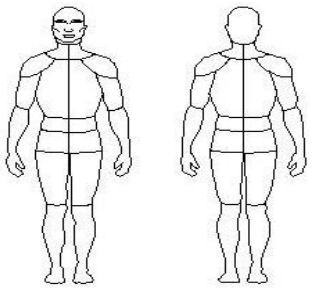
☐ Elément(s) de l'habitacle gênants



Faible	Moyen	Fort

Remarques :

☐ Partie(s) corporelle(s) gênée(s)



Faible	Moyen	Fort

Remarques :

☐ Evaluation globale de l'entrée

Tres Faible										Faible										Moyen										Fort										Tres Fort											
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	...

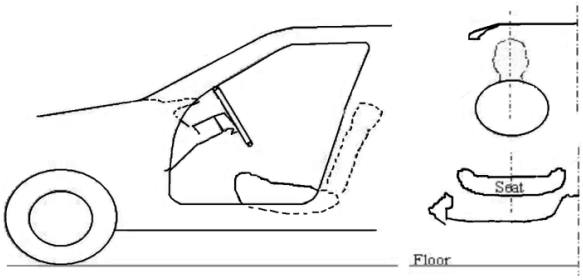
☐ Remarques explicatives :

1/2

ID_Sujet	ID_Config
RE_RE	Xsa_Cfg_1

Evaluation de la SORTIE

☐ Elément(s) de l'habitacle gênant(s)



Faible	Moyen	Fort

Remarques :

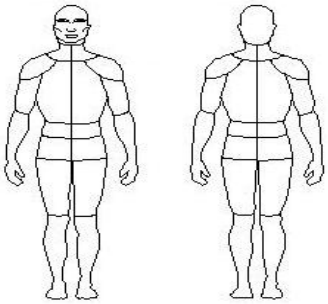
_____

_____

_____

_____

☐ Partie(s) corporelle(s) gênée(s)



Faible	Moyen	Fort

Remarques :

_____

_____

_____

_____

☐ Evaluation globale de la sortie

Tres Faible											Faible										Moyen										Fort										Tres Fort												
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	...

☐ Remarques explicatives :

_____

_____

_____

_____

_____

☐ Remarques expérimentateur :

_____

_____

_____

_____

2/2

7.6. Fiches administratives

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT LIBRE ET ÉCLAIRÉ
POUR LA PARTICIPATION A UNE ETUDE ERGONOMIQUE

De M., Mme, Mlle ……..……..…… (Nom, Prénom)
Adresse : ……..……..…….

Mr CAUSSE m'a proposé de participer à une étude mise en place par le Laboratoire de Biomécanique et de Mécanique des Chocs de l'INRETS sur l'étude du mouvement d'accessibilité à une automobile. Il m'a précisé par ailleurs que j'étais libre de l'accepter ou de la refuser.
J'ai reçu et compris les informations suivantes : je vais m'insérer et m'extraire dans une maquette, représentant l'habitacle d'un véhicule. Des consignes me seront données avant le début de chaque réalisation de mouvement. Je vais être également soumis à une série de mesures anthropométriques. Des photos seront réalisées et resteront strictement confidentielles. Pour cette étude je vais devoir revêtir une combinaison de style juste-au-corps qui permettra une meilleure vision des marqueurs rétro réfléchissants par le système optoélectronique de capture de mouvement.
Cette recherche a pour but de mesurer les trajectoires des segments corporels et les efforts de contact entre le conducteur et l'habitacle. Ceux-ci permettront le calcul des couples articulaires développés, afin de progresser dans la compréhension des mécanismes qui régissent l'inconfort.
La nature de cette étude, son déroulement et ses contraintes m'ont été expliqués par le responsable de la recherche. J'ai reçu une réponse satisfaisante à toutes les questions que j'ai pu poser librement à propos de celle-ci.

J'accepte de participer à cette recherche dans les conditions précisées ci-dessus.

Mon consentement ne décharge pas les organisateurs de la recherche de leurs responsabilités. Je conserve tous mes droits garantis par la loi. Si je le désire, je suis libre à tout moment d'arrêter ma participation; j'en informerai alors l'investigateur et/ou le directeur de la recherche ou toute personne agissant dans le cadre de cette recherche sous leur responsabilité.
Les données me concernant resteront confidentielles. Elles seront anonymisées avant toute saisie sur fichier. Je n'autorise leur consultation et leur traitement informatique que par des personnes qui collaborent à la recherche, désignées par le directeur de la recherche. J'ai bien noté que le droit d'accès aux données me concernant prévu par la loi n°78-17 du 6 janvier 1978, relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés, modifiée par la loi n° 2004-801 du 6 aout 2004 relative à la protection des personnes physiques à l'égard des traitements de données à caractère personnel (article 39), est applicable à tout moment. Le projet a reçu un avis favorable du comité d'éthique interne de l'INRETS, le CCEIRBC, vis-à-vis de la démarche expérimentale et des responsabilités de l'institut.

Je percevrai une indemnisation forfaitaire de 80 Euros pour une demi-journée de participation pour les frais de déplacement, les contraintes et le temps de participation à cette recherche. Je pourrai à tout moment demander toute information complémentaire à l'investigateur, Mr J. Causse, ou à l'un de ses collaborateurs.

J'ai expliqué la nature et les contraintes
de cette recherche à M (Mme ou Melle) …….

Signature de l'investigateur
(Précédée de la date manuscrite)

Signature du volontaire
(Précédée de la date manuscrite)

7.7. Modèle Ramsis

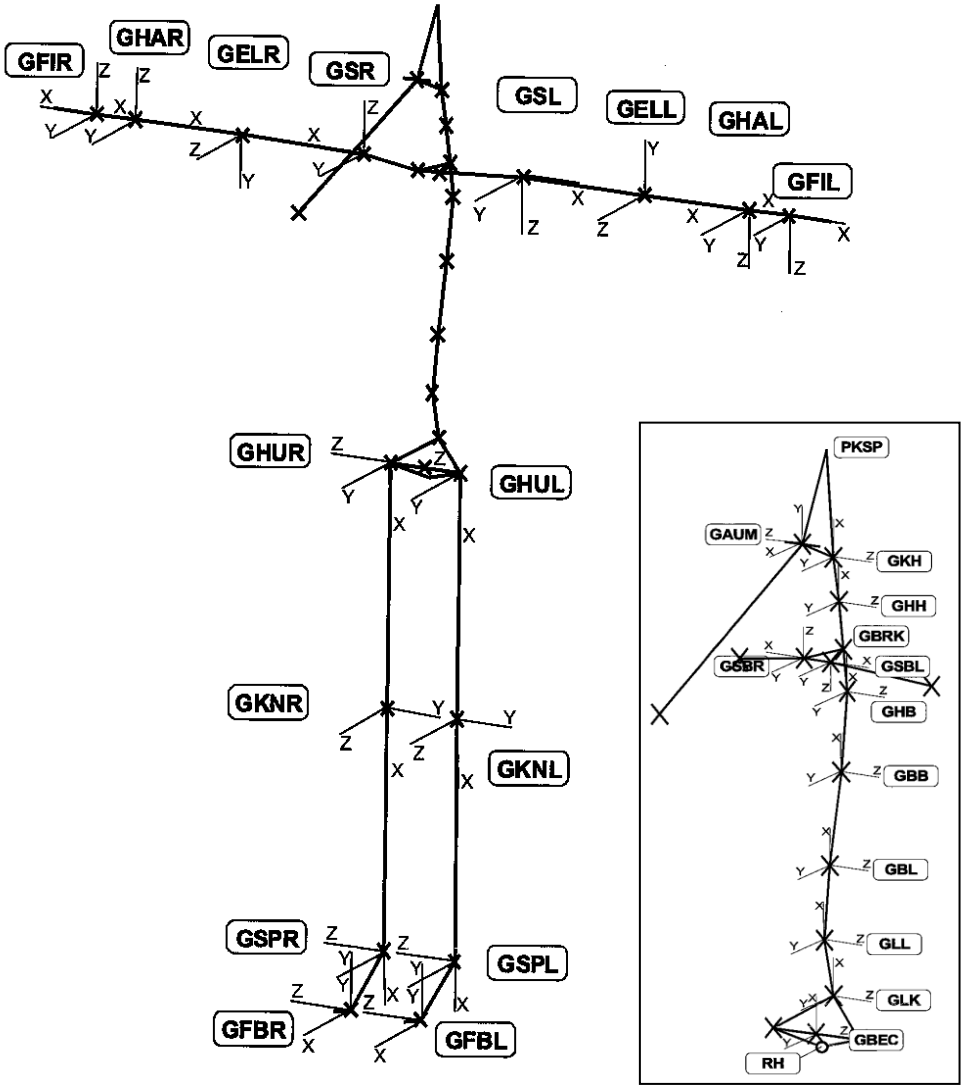


Figure 40 : Définition des articulations du modèle Ramsis® utilisé lors de la reconstruction du mouvement sous le logiciel RPx.

7.8. Principe de la reconstruction cinématique et dynamique sous RPx

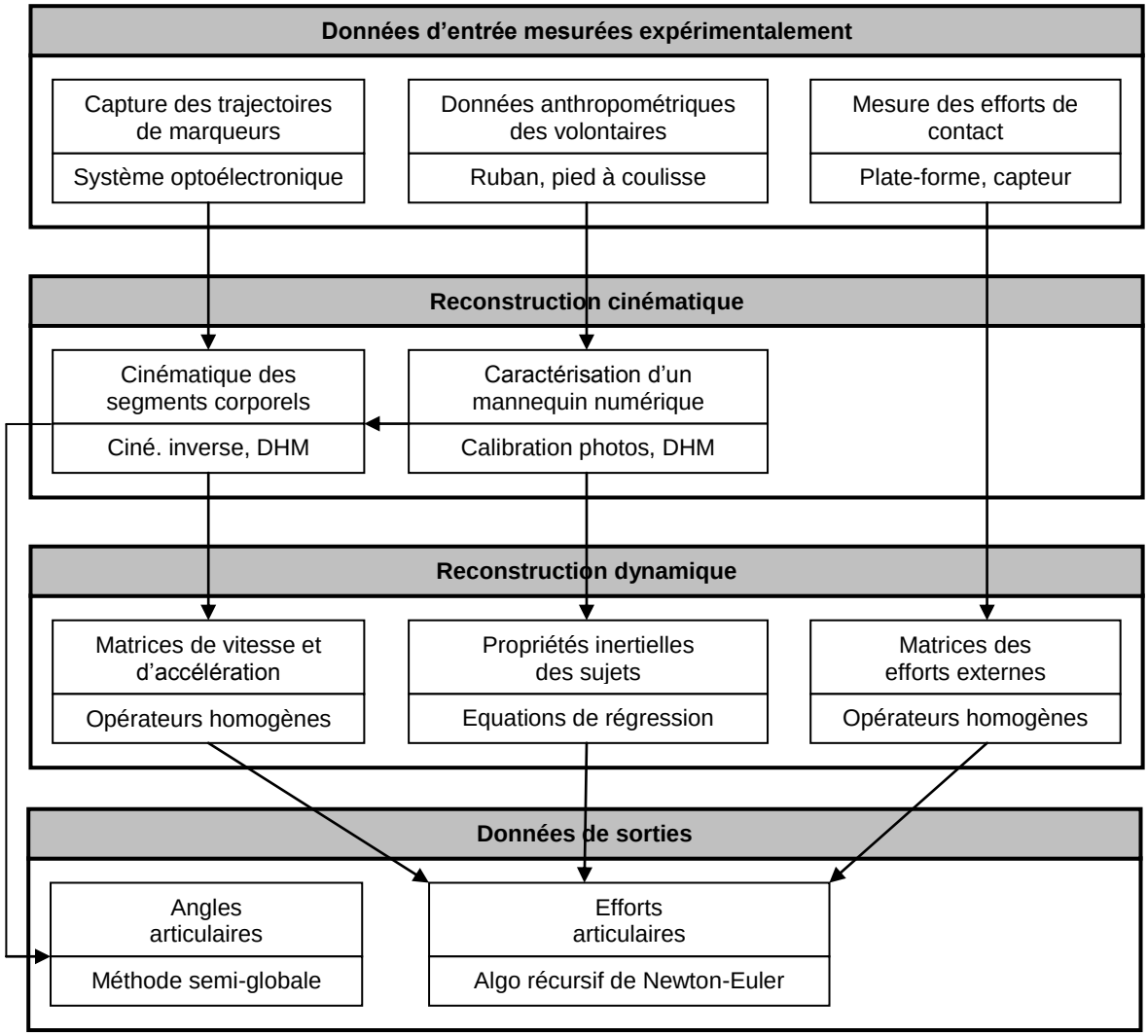
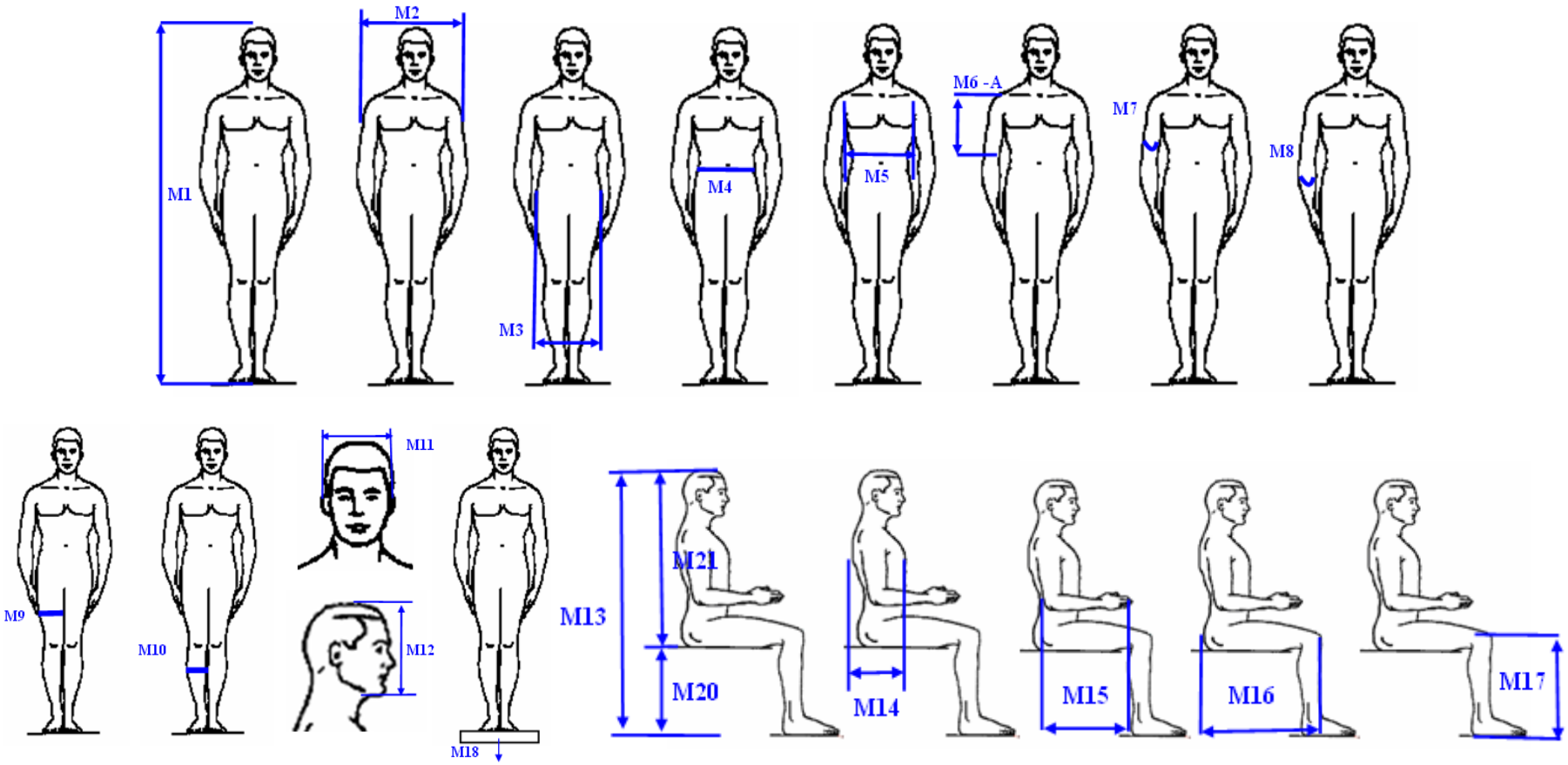


Figure 41 : Principe de la reconstruction sous le logiciel RPx.

7.9. Mesures anthropométriques

7.9.1. Dimensions anthropométriques relevées



7.9.2. Anthropométrie des participants

Participants	Id	Unité	01_GM	02_NC	03_SM	04_EB	05_CH	06_TP	07_SM	08_JN	09_SA	10_SP	11_RZ	12_DA	13_SN
Stature non chaussée	M1	(mm)	1865	1570	1570	1525	1595	1810	1630	1700	1590	1870	1830	1850	1820
Stature chaussée		(mm)	1890	1590	1595	1550	1615	1825	1645	1720	1605	1895	1855	1870	1845
Stature assise	M13	(mm)	1420	1230	1210	1190	1250	1455	1280	1290	1220	1425	1400	1383	1390
Stature assise naturelle		(mm)	1360	1230	1200	1165	1240	1330	1240	1280	1210	1385	1390	1375	1370
Stature assise courbée		(mm)	1320	1200	1130	1050	1195	1220	1210	1130	1160	1260	1335	1320	1300
Hauteur assise	M20	(mm)	450	410	405	350	370	420	375	405	385	480	445	440	440
Largeur tête	M11	(mm)	145	141	134	132	150	148	139	153	137	143	151	158	147
Hauteur tête	M12	(mm)	245	207	213	217	212	238	221	234	200	228	241	228	215
Largeur épaules	M2	(mm)	487	400	415	402	413	486	445	471	368	479	470	489	473
Longueur bras	M6	(mm)	374	308	304	285	272	343	328	353	320	381	363	359	340
Largeur hanche	M3	(mm)	354	307	356	324	357	335	360	351	325	342	361	376	358
Largeur pied		(mm)	108	88	96	83	85	101	92	109	87	100	111	101	102
Longueur pied		(mm)	282	232	239	216	240	275	234	273	235	293	285	273	266
Circonf. taille	M4	(mm)	800	631	695	650	700	785	730	750	600	800	880	880	938
Circonf. bras	M7	(mm)	324	235	260	245	275	298	273	305	210	285	330	295	315
Circonf. avant-bras	M8	(mm)	300	227	238	210	230	270	240	265	202	277	290	260	275
Circonf. cuisse	M9	(mm)	570	465	520	507	540	535	543	545	438	520	610	530	545
Circonf. mollet	M10	(mm)	398	327	360	314	335	347	360	385	295	340	415	370	360
Profondeur thorax	M14	(mm)	230	210	235	200	200	220	230	210	195	225	235	225	265
Longueur avant bras	M15	(mm)	510	440	430	390	420	490	400	480	420	520	495	495	490
Longueur cuisse	M16	(mm)	655	550	515	530	560	615	565	590	570	667	645	680	615
Hauteur genou	M17	(mm)	570	480	480	430	460	550	480	510	470	575	555	560	550
Hauteur buste	M21	(mm)	970	820	805	840	880	1035	905	885	835	945	955	943	950
Masse		(kg)	82	46.2	55.1	46.8	55.3	71.3	59	69.9	41.6	72.4	87	79.3	82.9
Position Siege Hx		(mm)	60	130	120	130	90	40	110	50	100	-10	-20	-10	0
Pointure		(mm)	44	37	38	36	38	43	37	44	37	47	44	44	43
BMI			23.0	18.3	21.7	19.5	21.2	21.4	21.8	23.6	16.1	20.2	25.3	22.7	24.4

Participants	Id	Unité	14_GM	15_AP	16_RA	17_SF	18_RP	19_JA	20_FL	21_DP	22_LP	23_KM	24_EG	25_OD	26_AD
Stature non chaussée	M1	(mm)	1815	1620	1750	1805	1675	1745	1600	1720	1680	1775	1665	1835	1610
Stature chaussée		(mm)	1840	1640	1780	1830	1700	1765	1625	1740	1703	1800	1680	1855	1635
Stature assise	M13	(mm)	1360	1230	1320	1360	1290	1315	1220	1305	1270	1330	1270	1405	1263
Stature assise naturelle		(mm)	1315	1210	1310	1350	1275	1295	1210	1280	1255	1295	1235	1395	1235
Stature assise courbée		(mm)	1260	1140	1250	1285	1130	1260	1180	1140	1145	1195	1195	1245	1165
Hauteur assise	M20	(mm)	445	390	435	478	410	430	395	420	405	430	405	460	390
Largeur tête	M11	(mm)	145	155	153	158	146	145	155	152	145	151	143	147	143
Hauteur tête	M12	(mm)	248	215	220	222	223	235	233	223	219	224	218	234	209
Largeur épaules	M2	(mm)	468	418	457	488	433	463	429	456	382	465	404	457	409
Longueur bras	M6	(mm)	379	314	354	354	324	357	317	333	330	361	327	357	297
Largeur hanche	M3	(mm)	365	372	348	371	302	342	360	360	325	356	320	319	317
Largeur pied		(mm)	102	97	106	112	90	109	91	99	93	109	93	96	90
Longueur pied		(mm)	266	242	268	289	245	265	243	245	253	268	244	269	237
Circonf. taille	M4	(mm)	920	820	990	940	735	875	800	825	695	928	688	765	665
Circonf. bras	M7	(mm)	300	310	305	345	260	330	300	315	255	315	260	275	280
Circonf. avant-bras	M8	(mm)	280	260	280	300	235	295	250	255	215	270	225	265	250
Circonf. cuisse	M9	(mm)	535	570	535	590	475	565	565	530	525	600	510	485	520
Circonf. mollet	M10	(mm)	400	390	410	370	300	420	370	375	345	390	340	330	370
Profondeur thorax	M14	(mm)	265	240	270	245	220	245	245	250	220	240	185	225	220
Longueur avant bras	M15	(mm)	500	445	485	545	445	475	435	460	450	495	450	480	415
Longueur cuisse	M16	(mm)	660	590	635	655	577	645	610	613	598	625	505	633	550
Hauteur genou	M17	(mm)	565	485	545	575	490	525	470	520	505	545	588	550	485
Hauteur buste	M21	(mm)	915	840	885	882	880	885	825	885	865	900	865	945	873
Masse		(kg)	81.6	67.8	87	90.5	56.3	80.3	67.9	74.3	56.3	84.2	53.7	66.2	56.8
Position Siege Hx		(mm)	-20	120	60	-20	50	50	120	40	80	0	100	10	120
Pointure		(mm)	43	39	42	43	41	44	38	42	41	41	39	43	37
BMI			24.1	25.2	27.5	27.0	19.5	25.8	25.7	24.5	19.4	26.0	19.0	19.2	21.2

CHAPITRE 3 – ANALYSE DU QUESTIONNAIRE D'INCONFORT

1. Introduction **81**
2. Répétabilité sur la note d'inconfort et sur l'identification des hauteurs de toit **81**
2.1. Notes d'inconfort 81
2.2. Hauteurs de toit 82
3. Analyse des réponses au questionnaire d'inconfort **83**
3.1. Evaluation de l'inconfort 83
3.1.1. Etude de la hauteur de toit *85*
3.1.2. Etude de la largeur de bavolet *87*
3.2. Identification des éléments de l'habitacle gênants et parties du corps gênées 89
4. Identification des hauteurs de toit **90**
4.1. Première hauteur de toit gênante *Ht1* 91
4.2. Dernière hauteur de toit acceptable *Ht2* 92
4.3. Ecart *DHt* entre les hauteurs *Ht1* et *Ht2* 92
5. Discussion **94**
5.1. Facteurs gênants 94
5.2. Exigence pour la hauteur du toit 95
6. Conclusion **97**
7. Annexes **98**
7.1. Evaluation de la méthodologie de recueil de données 98
7.2. Evaluation de l'inconfort 102
7.3. Eléments de l'habitacle gênants et parties du corps gênées 103
7.4. Identification des hauteurs de toit 109

1. Introduction

Ce chapitre présente l'analyse de l'identification des hauteurs de toit et des questionnaires d'inconfort relevés au cours de l'expérimentation. Il s'appuie sur les notes d'inconfort attribuées par les participants pour chaque configuration, sur leurs remarques pour expliquer l'inconfort et sur les valeurs des hauteurs de toit identifiées.

Pour cette partie, les objectifs sont multiples :
- identifier et comprendre les difficultés rencontrées par les participants ;
- identifier les éléments de l'habitacle et les dimensions anthropométriques ayant une influence sur la gêne perçue et les hauteurs de toit ;
- et dégager des hypothèses et des perspectives pour l'analyse biomécanique du mouvement (étude des angles et des couples articulaires).

2. Répétabilité sur la note d'inconfort et sur l'identification des hauteurs de toit

Une première évaluation de la qualité des données relevées est réalisée. Elle concerne :
- l'évaluation de l'inconfort et l'identification des hauteurs de toit pour les 3 répétitions sur la Xsara ;
- et l'identification successive des deux hauteurs de toit *Ht1* et *Ht2* (1ère hauteur gênante et dernière acceptable) pour toutes les hauteurs d'assise.

L'ensemble de l'analyse est présenté en Annexe 7.1, voici les principaux résultats à retenir.

2.1. Notes d'inconfort

L'importance de la phase de familiarisation à l'inconfort est clairement observée. L'étude de la répétabilité sur la note d'inconfort montre que la quasi totalité des écarts des notes entre les essais répétés est inférieure à 10 (10 = 1 catégorie d'inconfort). En effet, la répétabilité vis-à-vis de la note d'inconfort est nettement meilleure à partir de la deuxième répétition sur la Xsara (cf. Tableau 20 présentant l'écart des notes entre les répétitions sur la Xsara).

Tableau 20 : Valeurs moyennes et écarts types des écarts des notes entre les 3 répétitions effectuées sur la Xsara pour les essais avec la hauteur de toit réelle (Config), avec la hauteur *Ht1* et la hauteur *Ht2*.

Répet.	Note_Globale			Note_Entrée			Note_Sortie		
	2-1	3-1	3-2	2-1	3-1	3-2	2-1	3-1	3-2
Config	8±7	9±7	5±5	9±8	9±7	5±5	11±9	11±9	5±5
Ht1	7±3	7±5	5±4	7±4	7±5	5±4	9±6	9±7	6±5
Ht2	6±6	7±6	5±4	7±5	8±6	4±4	7±6	8±7	5±4

Dans le détail pour chaque participant (Tableau 29 et Tableau 30 en Annexes), l'écart entre la deuxième et la troisième répétition reste inférieur à 10 et à 5 pour respectivement :
- 24/26 et 17/26 participants pour la note globale,
- 23/26 et 19/26 participants pour la note d'entrée,
- 23/26 et 15/26 participants pour la note de sortie.

Pour 5/26 participants, l'écart est supérieur à 15 pour au moins une des notes attribuées : les participants 02_NC, 08_JN, 10_SP, 14_GM et 21_DP.

De plus, contrairement à ce qui était imaginé lors de la préparation de l'expérimentation, les participants n'ont pas eu plus de facilité/difficulté à évaluer l'inconfort pour une configuration avec une hauteur de toit peu gênante qu'avec une hauteur « juste acceptable » (Tableau 20). Les mêmes erreurs de répétabilité sont observées pour les deux hauteurs *Ht1* et *Ht2*.

Enfin, comme l'expérimentation dure plus de 3 heures, nous avions craint un effet de fatigue entrainant une erreur sur l'évaluation. Or la Figure 42, qui représente l'évaluation de l'inconfort selon l'ordre d'essai des trois répétitions sur la Xsara, montre qu'une fois l'étape d'apprentissage terminée, il n'y a pas d'effet de l'ordre. C'est-à-dire que l'évaluation des participants n'a pas été modifiée entre la seconde répétition au milieu d'expérimentation et la dernière à la fin.

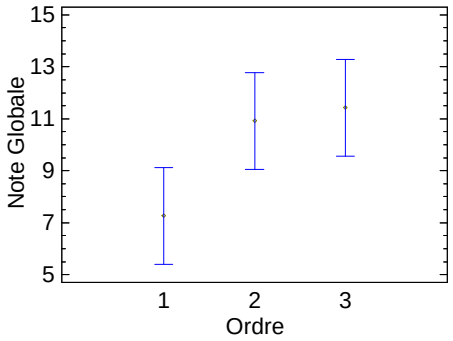


Figure 42 : Graphe des moyennes de la note globale en fonction de l'ordre des répétitions.

2.2. Hauteurs de toit

Pour la hauteur de toit, les écarts entre les répétitions sur la Xsara et les identifications successives sont de l'ordre du centimètre (cf. Tableau 21) : en moyenne 11 mm pour *Ht1* et 13 mm pour *Ht2*.

Tableau 21 : Valeurs moyennes et écarts types de la répétabilité de l'identification des hauteurs *Ht1* et *Ht2*, par rapport aux valeurs identifiées deux fois successivement (*Hs1*, *Hs2* et *Hs3*) et celles identifiées entre la deuxième et la troisième répétition sur la Xsara (*XSA*).

	Hs1	Hs2	Hs3	XSA
Ht1	7 ± 5	6 ± 7	8 ± 8	11 ± 09
Ht2	7 ± 5	6 ± 6	7 ± 5	13 ± 12

La première évaluation concerne les répétitions effectuées sur la Xsara. Comme pour la note d'inconfort, l'importance de la familiarisation et de l'apprentissage pour l'identification des hauteurs de toit est clairement identifiée. La répétabilité est nettement meilleure à partir de la 2ème répétition sur la Xsara. Au regard du Tableau 31 en Annexes présentant les résultats pour l'ensemble des participants, l'écart entre la 2ème et la 3ème répétition est inférieur à :

- 10 mm pour 17/26 participants et 20 mm pour 24/26 participants pour la hauteur *Ht1*. Seuls les participants 04_EB et 15_AP ont un écart supérieur à 20 mm ;
- 10 mm pour 17/26 participants et 20 mm pour 20/26 participants pour la hauteur *Ht2*. Les participants 01_GM, 08_JN, 15_AP, 16_RA, 17_SF et 21_DP ont un écart supérieur à 20 mm.

Une fois l'étape de familiarisation passée, aucun écart n'excède 20 mm pour tous les participants.

La deuxième évaluation concerne les deux identifications successives des hauteurs de toit. Pour les deux hauteurs de toit, les écarts sont en moyenne de 7 mm. Le Tableau 32 en Annexes présente le détail pour l'ensemble des participants, des écarts entre les deux identifications successives. Aussi, pour les essais relatifs aux trois hauteurs d'assise (*Hs1*, *Hs2* et *Hs3*), l'écart est inférieur à 10 mm pour 57/76 des essais pour la hauteur *Ht1* et pour la hauteur *Ht2*.

Comme pour la note d'inconfort, nous n'avons pas observé d'effet de fatigue pour l'identification des hauteurs de toit. La Figure 43 montre qu'une fois l'étape d'apprentissage terminée qu'il n'y a pas d'effet de l'ordre des répétitions. C'est-à-dire que les participants n'ont pas accepté des hauteurs plus basses pour la dernière répétition que pour la première.

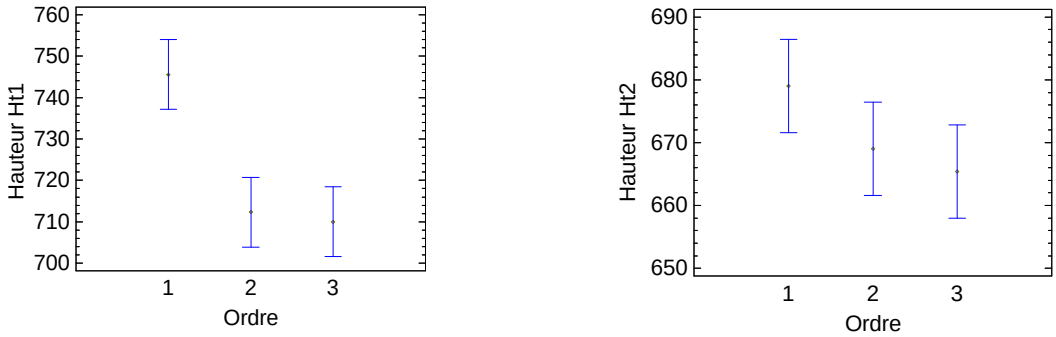


Figure 43 : Graphe des moyennes de la hauteur de toit en fonction de l'ordre des répétitions pour la hauteur *Ht1* (à gauche) et la hauteur *Ht2* (à droite).

Par ailleurs, nous supposions également en début d'expérimentation, que les participants pourraient avoir plus de difficulté à identifier la hauteur *Ht1* que la hauteur *Ht2*, dont la recherche semble plus libre et la notion plus difficile à appréhender. Il apparait que les mêmes erreurs de répétabilité sont observées pour les deux hauteurs (11 mm pour la hauteur *Ht1* et 13 mm pour la hauteur *Ht2*).

Considérant l'importance de l'apprentissage, les résultats des essais utilisés pour la familiarisation à l'inconfort et l'identification des hauteurs de toit, sont exclus de la suite de l'analyse.

3. Analyse des réponses au questionnaire d'inconfort

Rappelons que pour chaque essai, l'expérimentateur relève trois types d'informations :

- les notes d'inconfort : une note globale, une note pour l'entrée et une note pour la sortie ;
- les éléments de l'habitacle gênants pour le participant et la cause de cet inconfort ;
- les parties corporelles gênées pour le participant et les causes de cette gêne.

L'objectif pour cette partie est d'expliquer l'inconfort à travers ces relevés, de manière à identifier l'influence des éléments géométriques du véhicule et des dimensions anthropométriques du participant sur la gêne ressentie. Nous souhaitons répondre aux questions suivantes :

- Quels facteurs affectent la sensation d'inconfort ?
- Quel est l'impact d'une modification de la hauteur d'assise sur la gêne ressentie ?
- Quels facteurs interviennent lors de l'identification des hauteurs de toit ?
- Que se passe-t-il si on augmente la largeur de bavolet ?

3.1. Evaluation de l'inconfort

Pour l'analyse des notes d'inconfort, les notes attribuées par le participant sont directement transformées en valeurs numériques allant de 0 à 50 (voire plus). Nous justifions ce choix par le fait que les participants ont calibré l'inconfort avec une configuration connue comme étant très peu gênante (Xsara) et une autre très fortement gênante (Audi TT).

On constate tout d'abord que l'étape de familiarisation à l'inconfort a joué le rôle que l'on attendait d'elle, à savoir calibrer l'inconfort. Cette influence peut être observée sur la Figure 44, qui présente le graphe des moyennes des notes globales attribuées par les participants pour l'ensemble des configurations testées. Les notes de la Xsara et de l'Audi TT encadrent les notes attribuées pour les essais liés aux 3 hauteurs d'assise. En outre, les notes attribuées pour l'Audi TT ont une moyenne proche de la catégorie inconfort « Très élevé » (note entre 40 et 50) et la Xsara à la catégorie « Faible » (note entre 10 et 20).

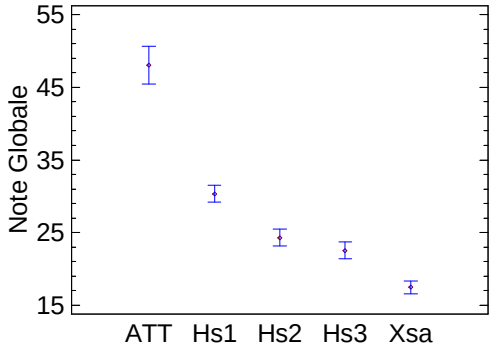


Figure 44 : Graphique des moyennes représentant la note globale en fonction des différentes configurations identifiées.

On s'intéresse ensuite aux trois notes attribuées par les participants (globale, entrée et sortie) et on regarde si il y a un écart entre elles et si les participants ont plus été gênés par le mouvement d'entrée ou par celui de la sortie. La Figure 45 présente la boîte à moustache pour la note globale à partir des données de l'ensemble de l'expérimentation. De celle-ci, il apparaît que :

- les valeurs médianes et moyennes sont proches de 25, correspondant à la note moyenne de la catégorie d'inconfort Moyen pour les trois notes ;
- 50% des notes d'inconfort se situent entre 18 et 32 autour de la catégorie inconfort Moyen ;
- et l'ensemble de l'échelle d'inconfort a été utilisé. Une partie des participants (12/26) a attribué des notes supérieures à 50. Ce cas de figure s'est notamment présenté pour les configurations avec une assise basse et une importante largeur de bavolet (*Hs1_Lb2*).

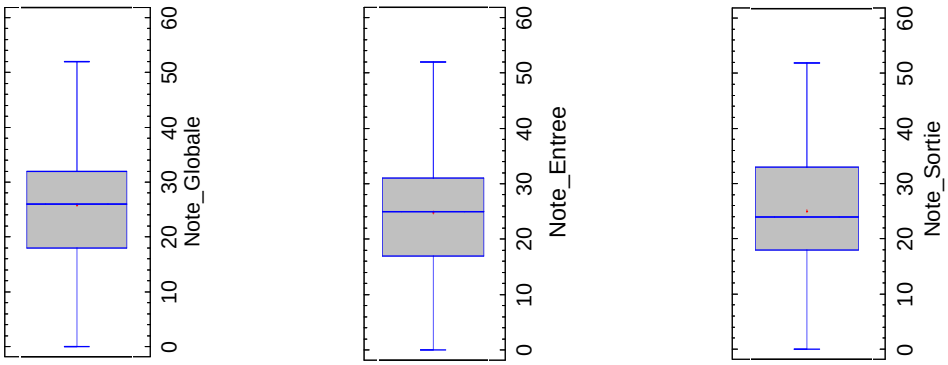


Figure 45 : Box-plot des notes globales, d'entrée et de sortie attribuées par les participants sur l'ensemble de l'expérimentation.

La comparaison entre les notes pour l'entrée et celles pour la sortie montre qu'une différence significative existe. Toutefois, cette différence est très faible et ne permet pas d'incriminer un mouvement plutôt qu'un autre (moyenne des différences moy.=0.9). En outre, une analyse de la corrélation liant les notes d'inconfort montre l'existence d'une très forte corrélation de la note globale avec les notes d'entrée et de sortie (cf. Tableau 22). Pour la suite de l'analyse, il est donc décidé de ne présenter que les résultats associés à la note globale.

Tableau 22 : Matrice de corrélation de la note d'inconfort globale en fonction des notes d'entrée et de sortie pour tous les essais de l'expérimentation (la 1ère valeur est le coefficient de corrélation et la seconde la probabilité de significativité).

	Note_Globale	Note_Entrée	Note_Sortie
Note_Globale	1		
Note_Entrée	0.9506 (0.0000)	1	
Note_Sortie	0.9356 (0.0000)	0.9085 (0.0000)	1

3.1.1. Etude de la hauteur de toit

L'objectif pour cette partie est d'étudier l'influence de la hauteur de toit sur l'inconfort ressenti par les participants. Aussi, seuls les essais liés à la hauteur de toit sont pris en compte, c'est-à-dire l'évaluation des essais pour les hauteurs *Ht1* et *Ht2* et la hauteur intermédiaire *HtM*. Les essais traitant de la largeur de bavolet ne sont donc pas utilisés. Pour la suite de l'analyse, la hauteur de toit est définie par rapport au point H (définition au Chapitre 3).
L'ensemble des résultats sur la note d'inconfort est donné en Annexes. Le Tableau 33 en particulier présente les valeurs moyennes de la note d'inconfort globale en fonction de la hauteur d'assise, de la hauteur de toit et des trois groupes de stature. La Figure 46 donne un aperçu de ces résultats.

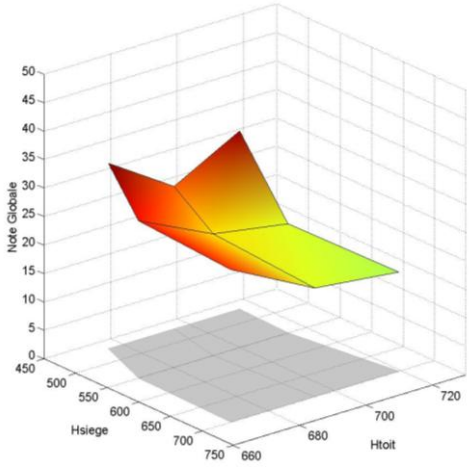


Figure 46 : Valeurs moyennes de la note d'inconfort globale en fonction de la hauteur d'assise et de la hauteur de toit.

Nous proposons d'expliquer la note globale en fonction des variables suivantes :

- la hauteur de siège ***Hs*** définie suivant 3 modalités : *Hs1*, *Hs2* et *Hs3* ;
- la hauteur de toit ***Ht*** également définie suivant 3 modalités : *Ht1*, *Ht2* et *HtM* ;
- et les groupes de stature des participants ***GrpStat*** (cf. Chapitre3) : le groupe des petites statures (*P*), des statures moyennes (*M*) et des grandes statures (*G*).

Le modèle explicatif pour étudier l'effet des variables peut être présenté de la manière suivante :

$$Note = Hs + Ht + GrpStat + (Hs*Ht) + (Hs*GrpStat) + (Ht*GrpStat)$$

Le Tableau 23 présente les résultats du modèle linéaire généralisé expliquant la note d'inconfort globale en fonction des hauteurs d'assise, des hauteurs de toit et des groupes de stature. La Figure 47 et la Figure 48 présentent respectivement les graphes des moyennes et des interactions pour le dit modèle.

Tableau 23 : Résultats de l'ANOVA de l'inconfort pour les essais variant la hauteur du toit et la hauteur d'assise.

Source	Som. carrés	Ddl	Carré M.	F	Proba.
Hs	03327.5	002	1663.8	19.7	0.000
Ht	02453.2	002	1226.6	14.5	0.000
GrpStat	00173.8	002	0086.9	01.0	0.359
Hs*Ht	00739.8	004	0184.9	02.2	0.072
Hs*GrpStat	01774.9	004	0443.7	05.3	0.001
Ht*GrpStat	00157.9	004	0039.5	00.5	0.760
Résidu	18182.4	215	0084.6		
Total (corrigé)	26652.4	233			

R-carré = 29.5% / R-carré ajusté = 23.6%.

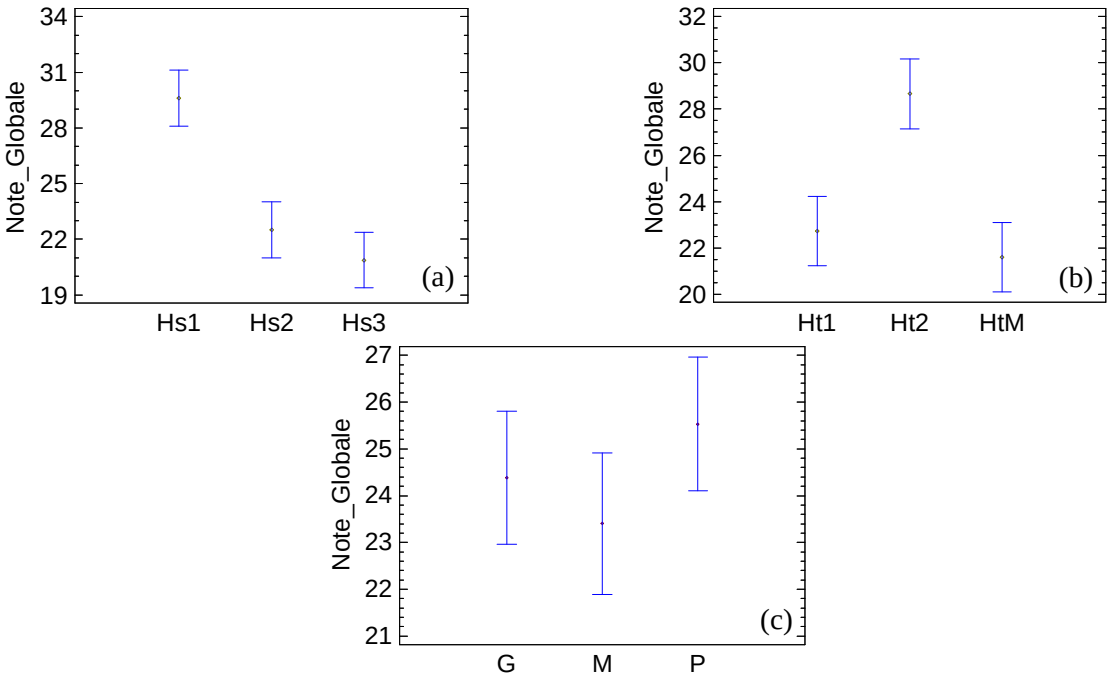


Figure 47 : Facteurs explicatifs de l'inconfort pour la hauteur de toit – Graphe des moyennes. Note d'inconfort globale fonction des hauteurs d'assise (a), des hauteurs de toit (b) et des statures (c)

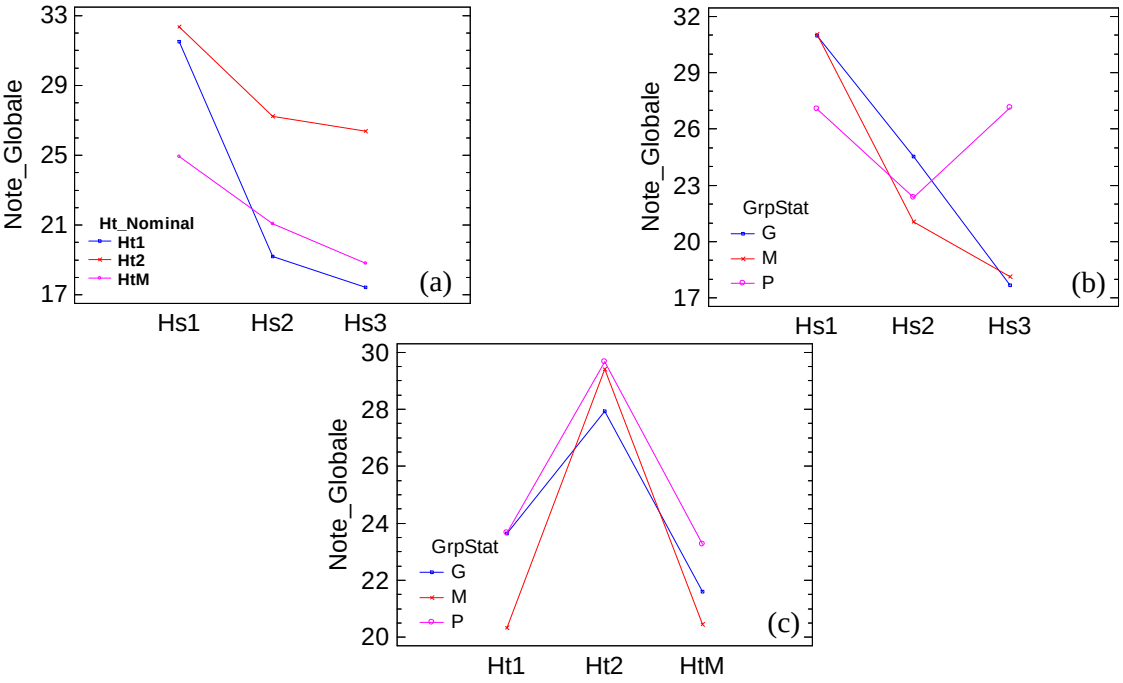


Figure 48 : Facteurs explicatifs de l'inconfort pour la hauteur de toit – Graphe des interactions.

Il apparaît que seuls les deux facteurs associés à la géométrie du véhicule *Hs* et *Ht* ont un effet sur la note globale ; la stature n'intervient que sous forme d'interactions avec la hauteur d'assise *Hs*. On peut également remarquer que :

- l'assise la plus basse *Hs1* a le plus gêné les participants (Figure 47-a). Sa valeur moyenne est à 30 (inconfort Elevé), alors que celles de *Hs2* et *Hs3* sont proches de 21 (inconfort Moyen) ;
- comme attendu, la hauteur de toit la plus basse *Ht2* est la plus gênante et ce quel que soit le groupe de stature (Figure 47-b et Figure 48-c). La gêne sur la hauteur *Ht2* se distingue notamment sur les assises les plus hautes *Hs2* et *Hs3* (cf. Figure 48-a) ;
- la hauteur de toit intermédiaire *HtM* a été légèrement moins gênante que la hauteur de toit la plus haute *Ht1*, même si leur différence n'est pas significative (Figure 47-b et Figure 48-b). En outre, La hauteur *HtM* a nettement moins gêné les participants pour l'assise la plus basse *Hs1* : Sa note moyenne est proche de 25 (correspond à un inconfort Moyen) alors que pour les hauteurs *Ht1* et *Ht2*, elle est proche de 33 (Inconfort Elevé) ;
- les participants de petite stature ont été plus gênés que les autres pour la plus haute assise *Hs3* (Figure 48-b). Cette gêne peut s'expliquer par le fait qu'ils sont non seulement gênés par le toit mais également par l'assise haute, qui leur demande une attention et un effort particuliers pour accéder à l'habitacle. Ils doivent en effet d'une part éviter de se cogner la tête au toit et d'autre part pousser sur leur jambe d'appui pour monter sur le siège ;
- aucune interaction significative entre les groupes de participants et la hauteur de toit *Ht* n'est relevée. Mais on note que les participants de stature moyenne ont été autant gênés par la hauteur *Ht1* que par la hauteur *HtM* qui est pourtant plus basse (Figure 48-c).

3.1.2. Etude de la largeur de bavolet

L'objectif pour cette partie est d'étudier l'influence de la largeur de bavolet sur l'inconfort ressenti par les participants. Aussi, seuls les essais liés à la largeur de bavolet sont pris en compte, à savoir l'évaluation subjective des trois largeurs de bavolet *Lb1*, *Lb2* et *LbM*. Les essais traitant de la hauteur de toit ne sont donc pas utilisés.
L'ensemble des résultats sur la note d'inconfort est donné en Annexes. Le Tableau 34 présente les valeurs moyennes de la note d'inconfort globale en fonction de la hauteur d'assise, de la largeur de bavolet et de la stature des participants. La Figure 49 donne un aperçu des résultats.

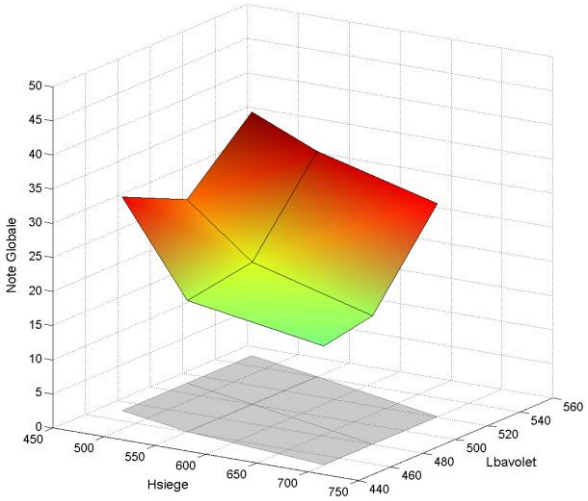


Figure 49 : Valeurs moyennes de la note d'inconfort globale en fonction de la hauteur d'assise et de la largeur de bavolet.

Nous proposons d'expliquer la note globale en fonction des variables suivantes :

- la hauteur de siège ***Hs*** définie suivant 3 modalités *Hs1*, *Hs2* et *Hs3* ;
- la largeur de bavolet ***Lb*** également définie suivant 3 modalités *Lb1*, *Lb2* et *LbM* ;
- et la stature des participants ***GrpStat*** suivant 3 modalités *P*, *M* et *G*.

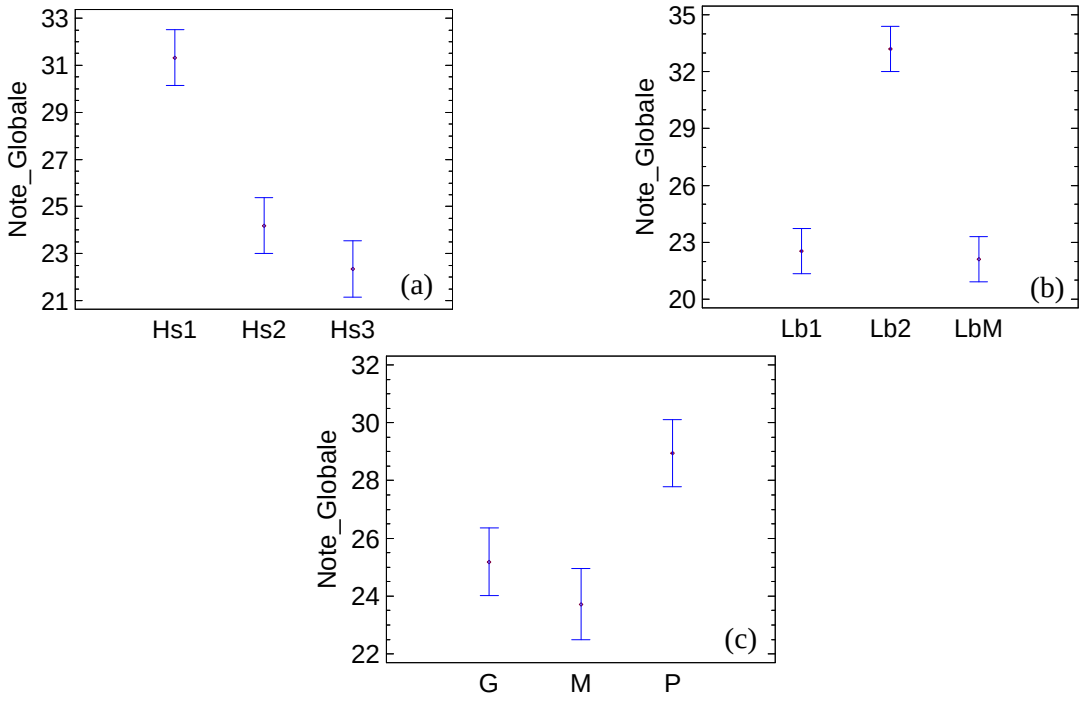


Figure 50 : Facteurs explicatifs de l'inconfort pour la largeur bavolet – Graphe des moyennes. Note globale fonction des hauteurs d'assise (a), des largeurs de bavolet (b) et des statures (c)

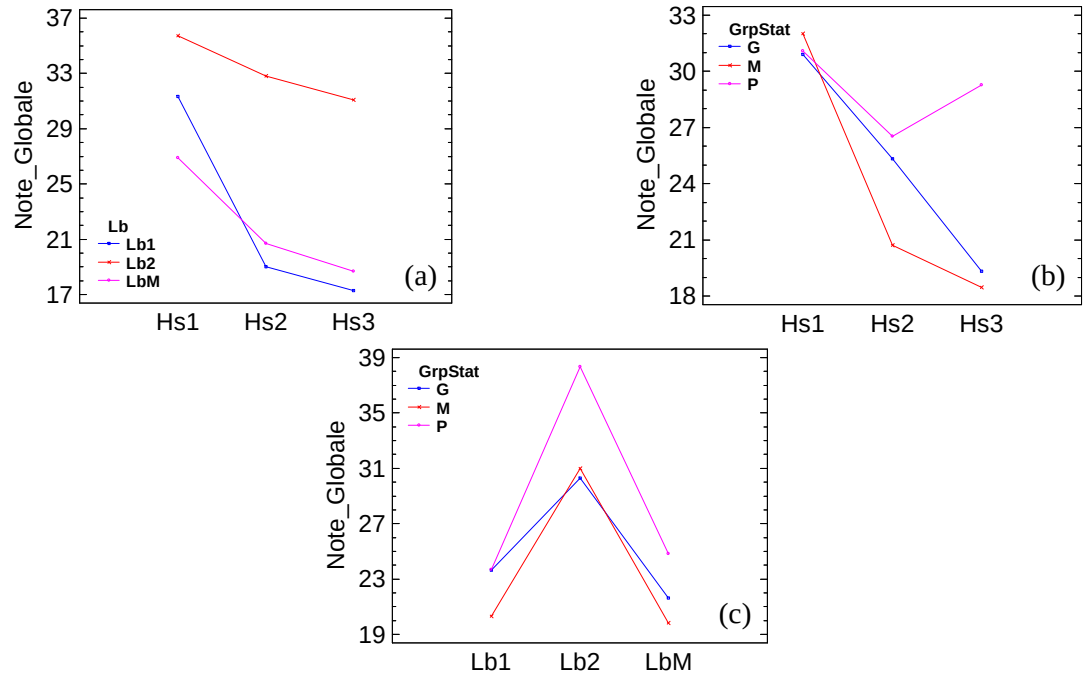


Figure 51 : Facteurs explicatifs de l'inconfort pour la largeur bavolet – Graphe des interactions.

L'analyse de l'effet des variables peut être présentée de la manière suivante :

$$Note = Hs + Lb + GrpStat + (Hs*Lb) + (Hs*GrpStat) + (Lb*GrpStat)$$

Le Tableau 24 présente les résultats du modèle linéaire généralisé expliquant la note d'inconfort globale en fonction des hauteurs d'assise et des largeurs de bavolet et de la stature des participants. La Figure 50 et la Figure 51 présentent les graphes des moyennes et des interactions pour le dit modèle.

Tableau 24 : Résultats de l'ANOVA de l'inconfort ressenti pour les essais variant la hauteur d'assise et la largeur du bavolet.

Source	Som. carrés	Ddl	Carré M.	F	Proba.
Hs	3492.54	002	1746.27	30.81	0.0000
Lb	6150.54	002	3075.27	54.26	0.0000
GrpStat	1132.18	002	566.092	09.99	0.0001
Hs*Lb	788.795	004	197.199	03.48	0.0089
Hs*GrpStat	1253.16	004	313.29	05.53	0.0003
Lb*GrpStat	438.07	004	109.518	01.93	0.1061
Résidu	12184.4	215	56.6716		
Total (corrigé)	25326.7	233			

R-carré = 51.9% / R-carré ajusté = 47.9%.

Seule l'interaction largeur de bavolet et groupe de stature n'a pas d'effet sur la note d'inconfort. A partir des graphes de moyennes et des interactions, il peut être noté que :

- sans surprise, la largeur de bavolet la plus large *Lb2* est la plus gênante et ce quelle que soit la hauteur d'assise (Figure 50-b, Figure 51-a) et la stature des participants (Figure 51-c). La largeur de bavolet intermédiaire *LbM* est en moyenne un peu un moins gênante que la largeur de bavolet la plus faible *Lb1*, même si leur différence n'est pas significative ;
- la hauteur d'assise *Hs3* apparaît en comparaison des deux autres hauteurs beaucoup plus gênante pour la largeur de bavolet *Lb2* (Figure 51) ;
- les participants de petite stature ont été plus gênés que les autres pour la largeur de bavolet *Lb2* (Figure 51-c). Pour cette dernière, les groupes de moyenne et de grande statures ont une note moyenne proche de 30 (première note d'inconfort « Elevé ») alors que celle des petites statures avoisine 39 (limite entre inconfort « Elevé » et « Très Elevé »).

3.2. Identification des éléments de l'habitacle gênants et parties du corps gênées

En complément de la note d'inconfort, l'expérimentateur a également relevé pour chaque essai les éléments de l'habitacle désignés par le participant comme engendrant de l'inconfort et les parties de son corps qui ont été gênées. Le relevé est fait non pas par le volontaire, mais par l'expérimentateur qui guide les volontaires dans leur évaluation.

Cette méthode présente l'avantage d'accélérer et de formaliser la prise de note, mais rend impossible la récolte de réponses libres du participant (non contraint par un questionnaire à choix multiples). Les réponses notées sont donc en partie soumises à l'interprétation de l'expérimentateur et forcément filtrées par l'expérimentateur. C'est pourquoi, nous ne souhaitons pas tirer de conclusions de l'analyse de ces données mais simplement apporter un complément d'informations pour l'analyse des résultats lors de la discussion. L'étude complète est toutefois présentée en Annexe 7.2.

Concernant les éléments de l'habitacle, un grand nombre d'éléments a été identifié comme gênant. Pour les essais sur l'étude de la hauteur de toit (cf. Figure 65 à gauche), le toit est évidement l'élément le plus cité au cours de l'expérimentation et ce pour 70 % des essais pour l'entrée et 60% des essais pour la sortie ; suit ensuite le siège (avec au moins 50 % des essais), et enfin le bavolet (40 % des essais). Le montant a uniquement été cité pour l'entrée pour 12 % des essais. On peut également noter que le passage de la jambe sous le volant a été gênant pour les participants et en particulier pour

l'assise la plus basse *Hs1* (volant identifié comme gênant pour 59 % des essais pour l'entrée et 44 % pour la sortie pour *Hs1*). On remarque finalement que les participants ont identifié plus d'éléments de l'habitacle pour l'entrée que pour la sortie.

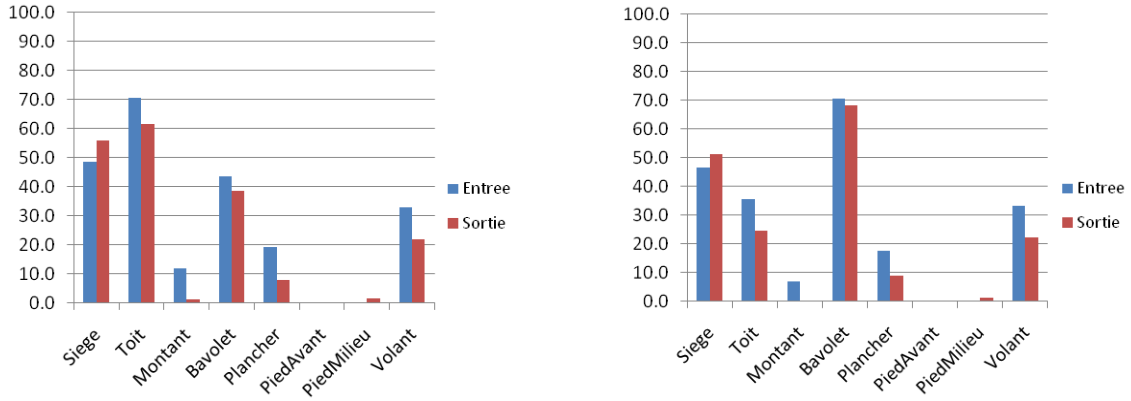


Figure 52 : Pourcentage du nombre d'essais des zones de l'habitacle identifiées comme gênantes pour l'entrée (bleu) et la sortie (rouge) pour les essais étudiants la hauteur de toit (graphique de gauche) et la largeur de gauche (graphique de droite).

Pour les essais relatifs à la largeur de bavolet (Figure 65 à droite), le bavolet est sans surprise pour cette partie de l'expérimentation l'élément le plus gênant (pour 70% des essais), suivi par le siège et plus précisément le renfort du siège (variable principale de l'étude et ce pour 50% des essais). De manière générale, les participants ont systématiquement identifié le bavolet comme gênant non seulement pour sa largeur mais également pour sa hauteur et ce aussi bien pour l'entrée que la sortie. Le volant a aussi été un facteur d'inconfort pour les participants.

4. Identification des hauteurs de toit

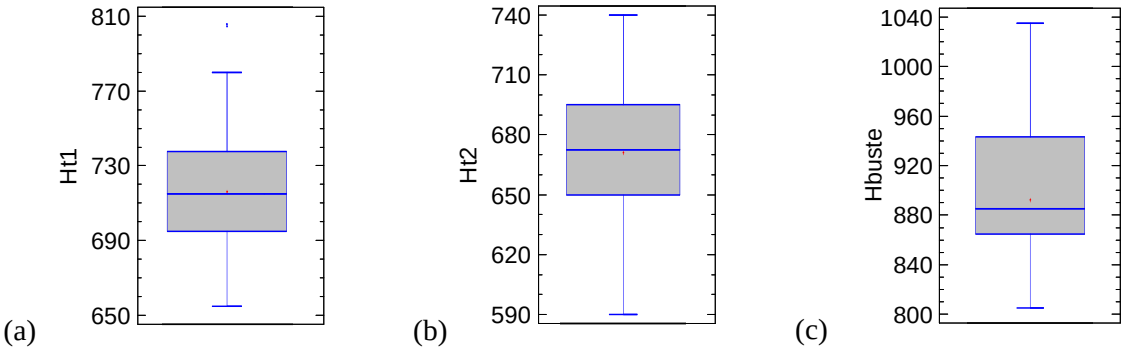


Figure 53 : Boîte à moustache pour les hauteurs de toit *Ht1* (a), *Ht2* (b) et la hauteur de buste naturel (c).

La Figure 53 présente les informations générales relatives aux deux hauteurs de toit particulières *Ht1* et *Ht2* et aux hauteurs de buste des participants. Pour cette partie, seuls les essais sur les trois hauteurs d'assise *Hs1*, *Hs2* et *Hs3* sont inclus dans l'analyse (on n'utilise pas les essais sur la Xsara). Il apparaît que l'étendue des hauteurs de toit particulières est plutôt restreinte : 50 % des hauteurs *Ht1* et *Ht2* sont comprises dans un intervalle de seulement 45 mm: entre 695-740 mm pour *Ht1* et 650-695 mm pour *Ht2*. Cet intervalle apparaît d'autant plus restreint que l'intervalle des hauteurs de buste est deux fois plus large (50 % des hauteurs de buste sont comprises dans un intervalle de 80 mm).

4.1. Première hauteur de toit gênante *Ht1*

Dans un premier temps, concentrons-nous sur la première hauteur de toit gênante *Ht1*. Nous proposons d'expliquer l'identification *Ht1* en fonction des variables suivantes :

- la hauteur de siège ***Hs*** définie suivant 3 modalités *Hs1*, *Hs2* et *Hs3* ;
- et la stature des participants ***GrpStat*** suivant 3 modalités *P*, *M* et *G*.

Le modèle explicatif proposé se présente de la manière suivante :

$$Ht1 = Hs + GrpStat + (Hs*GrpStat)$$

Le Tableau 25 présente les résultats du modèle linéaire généralisé expliquant la première hauteur de toit gênante *Ht1* en fonction des hauteurs d'assise et des groupes de stature. La Figure 54 et la Figure 55 présentent les graphes des moyennes et les graphes des interactions pour le dit modèle.

Tableau 25 : Résultats de l'ANOVA de l'inconfort pour les essais de la hauteur de toit *Ht1*.

Source	Som. carrés	Ddl	Carré M.	F	Proba.
Hs	00354.3	02	0177.1	0.2	0.825
GrpStat	03729.5	02	1864.8	2.0	0.138
Hs*GrpStat	00195.2	04	0048.8	0.1	0.995
Résidu	63206.5	69	0916.0		
Total (corrigé)	67483.7	77			

R-carré = 6.3% / R-carré ajusté = 0.00%.

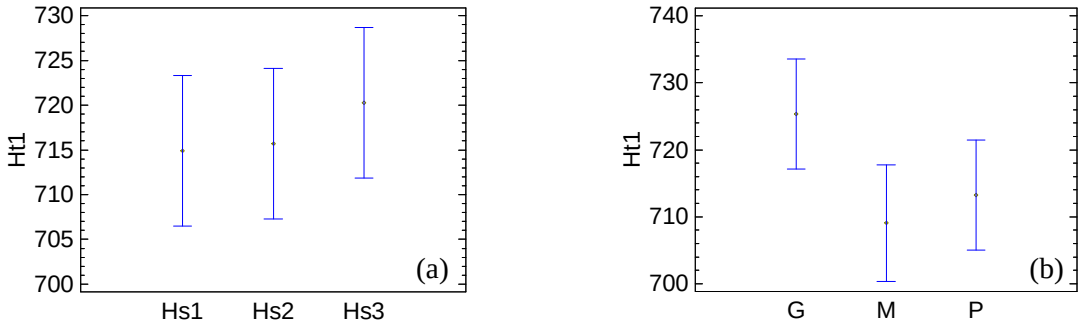


Figure 54 : Facteurs explicatifs de la hauteur *Ht1*– Graphe des moyennes
Hauteur de toit *Ht1* fonction des hauteurs d'assise (a) et des groupes de stature (b).

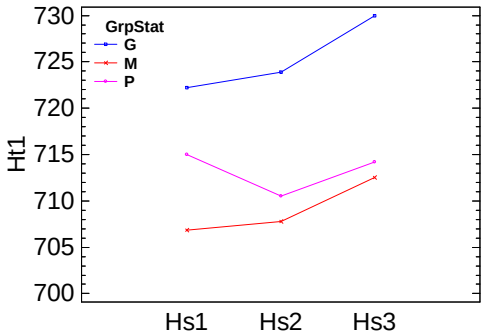


Figure 55 : Facteurs explicatifs de la hauteur *Ht1*– Graphe des interactions.

De l'ANOVA, il apparaît tout d'abord que ni la hauteur d'assise ni le groupe de stature n'a d'effet sur la hauteur *Ht1* (Figure 54). Le groupe des grandes statures identifie une hauteur de toit légèrement plus haute que les deux autres groupes et notamment le groupe des petits, mais cette différence n'est pas significative. Ceci est d'autant plus vrai que la hauteur d'assise est haute (Figure 55). Notons que les mêmes tendances ont pu être observées en utilisant des groupes de hauteur buste pour définir le participant au lieu de la stature.

4.2. Dernière hauteur de toit acceptable *Ht2*

La même démarche est répétée pour l'analyse de la hauteur *Ht2*. Les résultats de l'ANOVA de *Ht2* sont résumés dans le Tableau 26 et illustrés dans la Figure 56 et Figure 57. De la même manière que pour la hauteur *Ht1*, il n'existe pas d'effet significatif ni entre les trois hauteurs d'assise, ni entre les 3 groupes de stature. La hauteur d'assise n'intervient donc pas pour déterminer une hauteur de toit plus ou moins haute (Figure 56-a).

Tableau 26 : Résultats de l'ANOVA de l'inconfort pour les essais de la hauteur de toit *Ht2*.

Source	Som. carrés	Ddl	Carré M.	F	Proba.
Hs	00747.0	02	0373.5	0.4	0.657
GrpStat	03578.9	02	1789.4	2.0	0.140
Hs*GrpStat	00720.9	04	0180.2	0.2	0.935
Résidu	60910.8	69	0882.8		
Total (corrigé)	65959.3	77			

R-carré = 7.7% / R-carré ajusté = 0.00%.

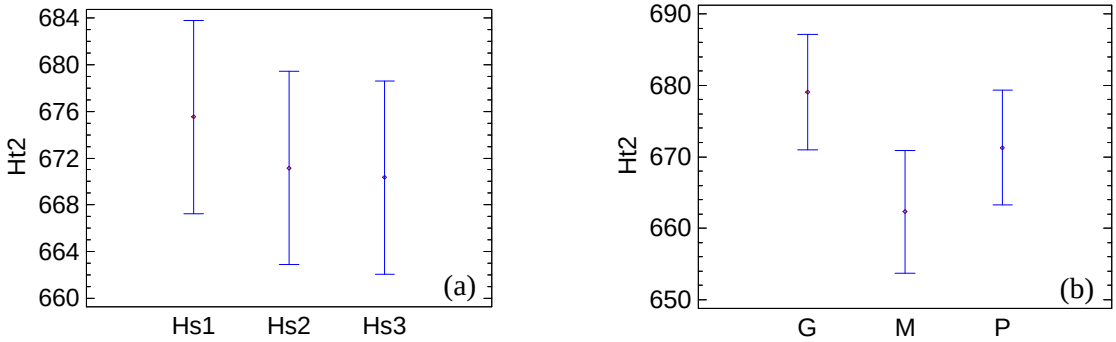


Figure 56 : Facteurs explicatifs de la hauteur *Ht2*– Graphe des moyennes
Hauteur de toit *Ht2* fonction des hauteurs d'assise (a), et des groupes de stature (b).

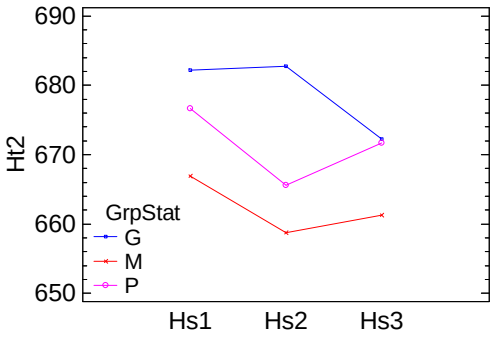


Figure 57 : Facteurs explicatifs de la hauteur *Ht2*– Graphe des interactions.

4.3. Ecart *DHt* entre les hauteurs *Ht1* et *Ht2*

Considérons l'écart *DHt* entre la première hauteur de toit gênante *Ht1* et la dernière hauteur acceptable Ht2, tel que *DHt* = *Ht1*- *Ht2*. De la boîte à moustache présentée sur la Figure 58, nous constatons que l'écart DHt entre les hauteurs *Ht1* et *Ht2* est particulièrement restreint : pour 50% des écarts, il est compris entre 30 et 60 mm, soit dans un intervalle de seulement 3 cm.

Comme pour les hauteurs Ht1 et Ht2, l'écart *DHt* est expliqué en fonction de la hauteur de siège ***Hs*** et de la stature des participants ***GrpStat***. Le Tableau 27 et la Figure 59 présente le graphe des interactions pour le dit modèle. Nous constatons qu'aucun facteur n'a d'effet significatif sur l'écart de hauteur *DHt* (Tableau 27). Ceci confirme ce qui a été observé précédemment lors de l'analyse de l'identification des hauteurs de toit (voir Figure 59 et Figure 60).

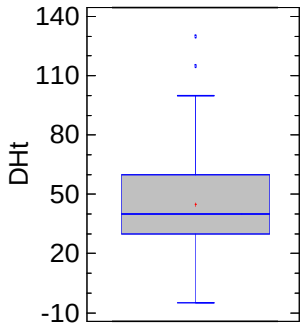


Figure 58 : Boîte à moustache pour l'écart entre les deux hauteurs *Ht1* et *Ht2* (*DHt=Ht2-Ht1*).

Tableau 27 : Facteurs explicatifs de l'écart *DHt* entre les hauteurs *Ht1* et *Ht2*.

Source	Som. carrés	Ddl	Carré M.	F	Proba.
Hs	01586.8	02	793.4	1.3	0.280
GrpStat	00372.4	02	186.2	0.3	0.738
Hs*GrpStat	00969.0	04	242.3	0.4	0.811
Résidu	42156.2	69	610.9		
Total (corrigé)	45087.2	77			

R-carré = 6.5% / R-carré ajusté = 00.0%.

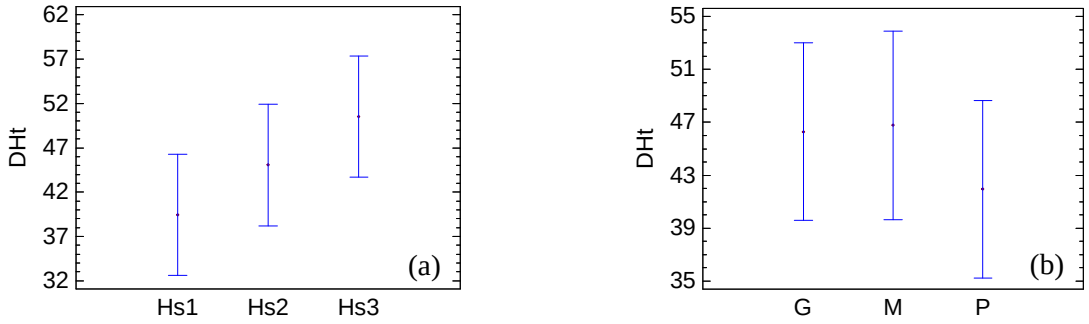


Figure 59 : Facteurs explicatifs de l'écart de hauteur *DHt*– Graphe des moyennes Ecart de hauteurs *DHt* fonction des hauteurs d'assise (a), et des groupes de stature (b).

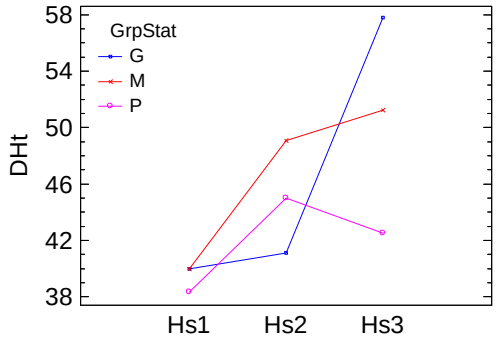


Figure 60 : Facteurs explicatifs de l'écart de hauteurs *DHt*– Graphe des interactions.

5. Discussion

5.1. Facteurs gênants

Ce chapitre a notamment été conduit pour déterminer l'effet de la hauteur de toit et de la largeur de bavolet sur la gêne perçue par un conducteur lorsqu'il entre et sort de l'habitacle. Les principales observations obtenues sont les suivantes :

- Les mouvements d'entrée et de sortie ont été notés de la même manière;
- Les participants de petites statures ont été les plus gênés par la largeur de bavolet et en particulier pour la hauteur d'assise la plus faible *Hs1* ;
- La hauteur de toit intermédiaire *HtM* a été notée de la même manière que la hauteur *Ht1*.
- La largeur de bavolet *LbM* a été aussi bien/mal notée que la largeur *Lb1*.

Les participants ont été autant gênés par le mouvement d'entrée que par le mouvement de sortie, alors que plus d'éléments de l'habitacle sont identifiés comme gênants lors de l'entrée. Pour la sortie, on observe également que les participants ont été nettement plus gênés au niveau des bras et de la jambe gauche (cf. en Annexes la Figure 65 et la Figure 68). Ceci nous laisse supposer que pour le mouvement d'entrée, la plus grand gêne est liée à l'évitement des collisions avec l'habitacle, alors que pour la sortie elle correspond à la nécessité de fournir un effort pour s'extraire du siège.

Un large bavolet est en général peu apprécié par les participants, ceci est particulièrement vrai pour une assise basse et pour les petites statures. Ces derniers doivent en effet s'assoir sur le renfort car ils n'ont pas les jambes assez longues et ils ne peuvent pas toujours (suivant l'assise) amener leur pied au sol pour s'extraire du siège. Le mollet rentre alors en collision avec le bavolet créant une douleur identifiée par les participants comme vraiment très gênante. Comme on peut le voir sur la Figure 61, les participants sont obligés de pousser sur les bras et le pied droit et d'appuyer leur mollet contre le bavolet pour dans un premier temps amener son pied au sol et ensuite s'extraire du siège. Il sera intéressant de confirmer cette hypothèse en étudiant les efforts appliqués sur le volant et le plancher, et les couple articulaires au niveau de la hanche gauche, dès lors que le participant quitte le siège.

Figure 61 : Descente d'une configuration avec une assise basse par un participant de petite stature.

Le groupe des petites femmes a préféré la hauteur d'assise moyenne Hs2, alors que pour les autres groupes il s'agit de l'assise la plus haute *Hs3*. Cette tendance s'explique par le fait que pour un siège haut il est plus simple de s'extraire du véhicule en se laissant glisser sur le bord du siège. Pour un siège de faible hauteur, il est nécessaire de développer un effort important pour se décaler dans le siège en forçant sur les bras et sur la jambe droite et en appuyant le mollet sur le bavolet (cf. Figure 61).

Les résultats montrent finalement que les hauteurs de toit et les largeurs de bavolet intermédiaires (*HtM* et *LbM*) sont aussi bien/mal notées que la hauteur de toit de premier inconfort *Ht1* et la largeur de bavolet la plus faible *Lb1*. Ceci laisse à penser, qu'il pourrait y avoir un effet de seuil dans la gêne des participants. Ainsi, jusqu'à une certaine hauteur de toit ou largeur de bavolet, les participants ressentent la même gêne. Au delà d'une certaine hauteur ou largeur, l'inconfort augmente alors de manière notoire.

Toutefois, la quantification de la gêne ressentie ayant été faite par des participants inexpérimentés, le caractère subjectif de l'évaluation est à prendre en considération. Les résultats se trouvent de ce fait, empreints d'une certaine imprécision de laquelle découle une plage d'erreur. En outre, pour faciliter l'évaluation de l'inconfort, nous avions décidé initialement que l'expérimentateur interrogerait les participants et relèverait lui-même leurs remarques. Nous nous sommes rendus compte lors de l'analyse des résultats que le relevé était forcément en partie soumis à l'interprétation de l'expérimentateur, rendant les résultats contestables. Après réflexion, l'utilisation d'un questionnaire à choix multiples semble plus appropriée.

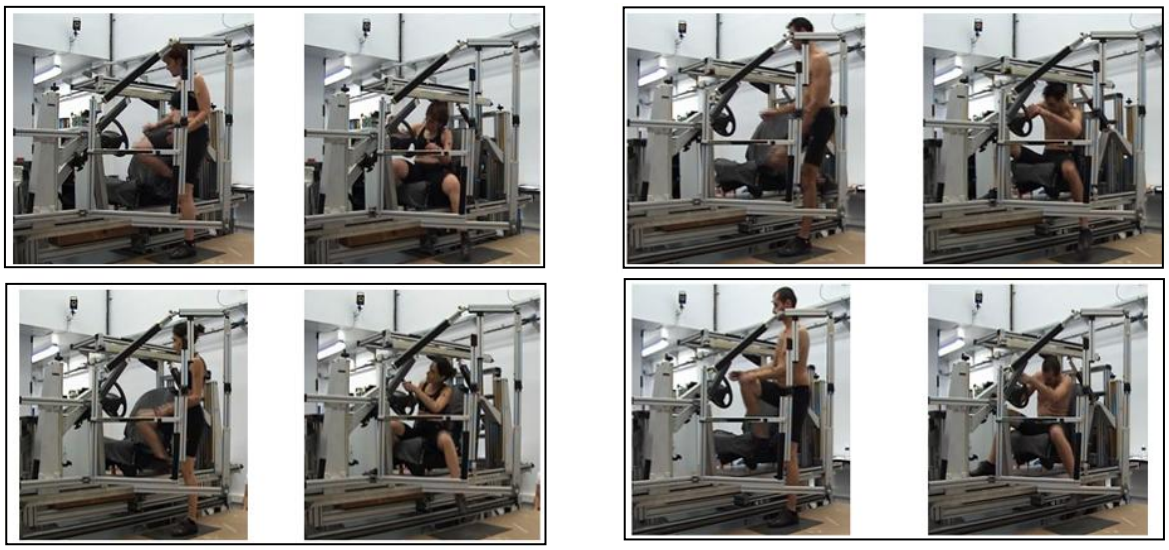
Il nous semble également intéressant de poursuivre l'expérimentation avec une population à mobilité réduite, susceptible d'utiliser des stratégies de mouvement différentes et donc d'être gênée différemment par les éléments de l'habitacle.

5.2. Exigence pour la hauteur du toit

Le résultat le plus marquant de l'étude concerne l'identification des hauteurs de toit. Il est apparu que les hauteurs de toit *Ht1* et *Ht2* sont indépendantes du groupe de participants et des configurations testées. En moyenne, l'écart entre *Ht1* et *Ht2* est de 45 mm. C'est-à-dire qu'une variation de la hauteur de toit de 45 mm suffit pour passer de la sensation de non gêne à une gêne inacceptable. On s'interroge donc sur l'absence d'effet de l'anthropométrie et de la configuration. Une hypothèse peut être trouvée dans l'analyse des stratégies de mouvement. Ainsi, sur la Figure 62, des stratégies de mouvements différentes sont observées suivant la stature des participants :

- les participants de grande stature fléchissent la tête et le tronc en avant (Figure 62-b),
- les participants de petite stature ont plutôt tendance à fléchir latéralement la tête (Figure 62-a).

L'étude des éléments de l'habitacle gênants montre que les participants de petit buste ont été particulièrement gênés par le montant (cf. Figure 61) : lors de l'entrée, 27% des essais pour les petits, 6% pour les moyens et 2% pour les grands. A contrario pour la sortie, le montant n'est pas gênant, les participants prenant le temps de pivoter dans leur siège pour se mettre face à l'embrasure et fléchir librement leur buste (tronc et tête).



a- 2 participants de petite stature b- 2 participants de grande stature

Figure 62 : Stratégie de mouvement pour l'entrée de véhicule de participants de petite (a) et de grande stature (b). Le toit est à la dernière hauteur acceptable *Ht2*.

En effet, plus le siège est avancé plus l'espace entre le participant et l'avant du véhicule est réduit. Les participants de petite stature sont donc limités dans leur flexion du haut du corps par le volant et le montant alors que ceux de grande stature bénéficient d'une plus grande liberté de mouvement (cf. Figure 62). En outre, les participants de petite stature se sont beaucoup plaints du renfort du siège lors de l'entrée et de la sortie. Ils expliquaient qu'ils ne pouvaient pas s'assoir directement au milieu du siège. En fonction de la hauteur du siège et de son éloignement du bavolet, ils n'avaient pas d'autre solution que de s'assoir sur le renfort. Ils se retrouvaient donc légèrement plus hauts et en avant par rapport aux autres groupes, qui eux pouvaient s'asseoir directement au fond du siège.

Cette différence dans la stratégie semble donc liée à l'**avancement du siège** (cf. Figure 63):

- En début d'expérimentation, les participants de petite stature sont contraints d'avancer leur siège pour se mette en position de conduite et pouvoir atteindre le volant et les pédales. Déjà proches du volant et du pied avant, ils ne peuvent donc pas se pencher sous peine de rentrer en contact avec l'un de ces deux éléments. Ce problème est accentué par le fait qu'ils sont assis sur le renfort du siège ;
- Les participants de grande et de moyenne statures ont quant à eux un espace plus important, étant donné qu'ils reculent leur siège pour se mettre en position de conduite. Cet espace leur laisse la liberté de se pencher en avant sans être gênés par le volant et le pied avant.

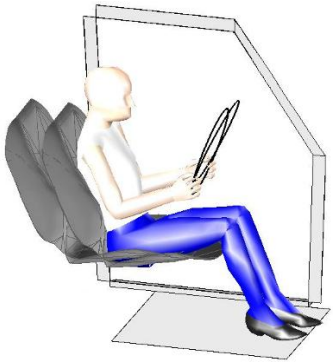


Figure 63 : Illustration de la position de siège la plus avancée (02_NC) et la plus reculée (14_GM)

Cette tendance est également observée dans le Tableau 28, qui présente les valeurs moyennes des hauteurs de toit normées par la hauteur de buste des participants assis naturellement. Que ce soit pour la hauteur de toit *Ht1* ou *Ht2*, les petits participants ont moins fléchi leur tronc que les participants avec une grande stature. Pour la hauteur de toit *Ht1*, les petits ont fléchi leur tronc à raison de 86% de la hauteur de buste et les grands à raison de 79%.

Tableau 28 : Valeurs moyennes et écarts types de la hauteur de toit normée par la hauteur de buste naturel des participants et ce pour les trois groupes de stature.

	Ht1	Ht2
P	0.86±0.03	0.82±0.03
M	0.82±0.04	0.77±0.04
G	0.79±0.04	0.74±0.02

Toutefois, il est important de garder à l'esprit qu'au regard de la répétabilité, une erreur de 11mm est à récupérer. Considérant que l'on travaille sur des intervalles de l'ordre de 50 mm pour *Ht1* et *Ht2*, cette imprécision s'avère relativement importante.

6. Conclusion

L'identification des différentes hauteurs de toit nous a permis de mettre en évidence le fait qu'il n'y a pas d'effet de la stature ni de la hauteur d'assise. Pour l'expliquer, nous faisons actuellement l'hypothèse que cette absence d'effet soit liée à la stratégie de mouvement choisie par les participants et par l'avancement du siège qui leur était imposé pour se mettre au poste de conduite. Cette hypothèse doit être confirmée par l'analyse des interactions entre les participants et l'environnement.

Ces différentes hypothèses nous laissent à penser que lors de la conception d'un nouveau véhicule, la hauteur du toit doit être déterminée avec précaution. Une faible variation de 45 mm peut faire basculer d'une hauteur de toit non gênante à l'inacceptable.

A titre d'exemple, la Figure 64 présente les résultats sur les hauteurs de toit *Ht1* et *Ht2* sous forme de Box Plot et identifie les hauteurs de toit pour un échantillon composé de 7 véhicules. Ainsi pour l'Alfa coupé GT, d'après nos données, 50% des participants de notre étude pourraient être gênés par cette hauteur de toit, dont certains la trouveraient inacceptable. Pour la Peugeot 207, le toit gênera moins de 25% des participants mais cet inconfort sera acceptable.

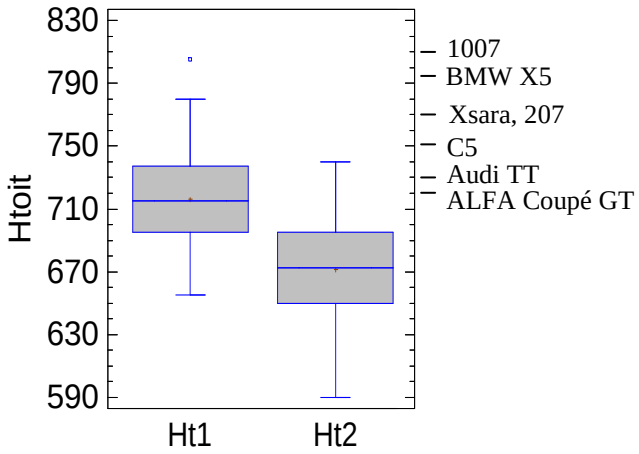


Figure 64 : Présentation sous forme de Box Plot pour les hauteurs de toit *Ht1* et *Ht2* et représentation des hauteurs de toit pour un échantillon composé de 11 véhicules.

L'analyse des relevés des éléments de l'habitacle gênants nous oriente vers l'étude du rôle des interactions dans le mouvement et leur participation à la gestion d'équilibre, l'utilisation des contacts et l'évitement des obstacles. L'étape suivante va consister à corréler l'inconfort avec les paramètres cinématiques et dynamiques du mouvement.

7. Annexes

7.1. Evaluation de la méthodologie de recueil de données

7.1.1. Note d'inconfort

Le Tableau 29 pour la hauteur *Ht1* et le Tableau 30 pour la hauteur *Ht2* présentent la moyenne des écarts des notes d'inconfort entre les trois répétitions pour tous les participants.

Tableau 29 : Valeur des écarts relatifs à *Ht1* sur la note d'inconfort entre les 3 répétitions.

Sujet	Global				Entrée				Sortie			
	Max	2-1	3-1	3-2	Max	2-1	3-1	3-2	Max	2-1	3-1	3-2
01_GM	8	8	4	-4	7	7	7	0	8	8	4	-4
02_NC	15	15	10	-5	16	11	-5	-16	25	20	-5	-25
03_SM	9	9	9	0	13	9	13	4	26	-18	-26	-8
04_EB	14	-6	-14	-8	14	-8	-14	-6	9	-3	-9	-6
05_CH	16	-5	-16	-11	14	-6	-14	-8	9	-1	-9	-8
06_TP	6	6	5	-1	10	10	8	-2	10	10	7	-3
07_SM	2	2	2	0	2	1	-1	-2	13	13	13	0
08_JN	19	10	19	9	14	1	14	13	28	13	28	15
09_SA	13	-7	-13	-6	16	-10	-16	-6	23	-15	-23	-8
10_SP	14	-4	10	14	17	-10	7	17	9	-7	2	9
11_RZ	10	7	-3	-10	10	-6	-10	-4	5	3	-2	-5
12_DA	7	7	1	-6	6	6	0	-6	7	7	1	-6
13_SN	4	4	2	-2	1	0	1	1	8	8	7	-1
14_GM	10	2	-8	-10	10	7	-3	-10	13	3	-10	-13
15_AP	8	5	8	3	8	5	8	3	10	7	10	3
16_RA	5	4	-1	-5	9	9	2	-7	10	10	2	-8
17_SF	9	9	6	-3	7	7	4	-3	7	7	5	-2
18_RP	5	-5	-2	3	3	-3	-2	1	12	-12	-10	2
19_JA	12	-12	-3	9	20	-20	-18	2	17	-17	-14	3
20_FL	12	12	2	-10	8	8	2	-6	20	20	10	-10
21_DP	6	6	6	0	1	0	1	1	10	10	7	-3
22_LP	6	-3	-6	-3	8	-5	-8	-3	8	-5	-8	-3
23_KM	13	-8	-13	-5	11	-7	-11	-4	14	-9	-14	-5
24_EG	8	-8	-1	7	6	-6	0	6	5	-4	1	5
25_OD	8	-6	-8	-2	12	-10	-12	-2	14	-14	-14	0
26_AD	5	-5	-4	1	10	-10	-7	3	1	-1	0	1
Moy. (abs)	9±4	7±3	7±5	5±4	10±5	7±4	7±5	5±4	12±7	9±6	9±6	6±5

Tableau 30 : Valeur des écarts relatifs à *Ht2* sur la note d'inconfort entre les 3 répétitions.

Sujet	Global				Entrée				Sortie			
	Max	2-1	3-1	3-2	Max	2-1	3-1	3-2	Max	2-1	3-1	3-2
01_GM	10	-2	1	3	4	-4	0	4	5	-5	-1	4
02_NC	11	1	-10	-11	11	-11	-10	1	15	-10	-15	-5
03_SM	8	8	1	-7	16	-14	-16	-2	16	-9	-16	-7
04_EB	10	-10	-10	0	17	-13	-17	-4	13	-9	-13	-4
05_CH	3	3	0	-3	3	-3	-1	2	4	3	4	1
06_TP	3	2	3	1	2	2	2	0	2	-2	-2	0
07_SM	4	0	4	4	5	-5	-1	4	6	5	6	1
08_JN	4	-4	-1	3	6	-4	2	6	7	-2	5	7
09_SA	1	1	1	0	3	1	3	2	5	2	-3	-5
10_SP	6	-3	3	6	11	0	11	11	4	-4	-1	3
11_RZ	11	-8	-11	-3	8	-8	-8	0	4	4	0	-4
12_DA	15	-15	-13	2	17	-17	-17	0	15	-15	-7	8
13_SN	10	-8	-10	-2	14	-12	-14	-2	14	-11	-14	-3
14_GM	12	4	-8	-12	7	4	-3	-7	16	4	-12	-16
15_AP	10	-5	5	10	10	-10	0	10	7	-7	-1	6
16_RA	5	5	1	-4	3	1	-2	-3	11	11	1	-10
17_SF	15	15	15	0	16	13	16	3	13	12	13	1
18_RP	5	-3	2	5	4	-1	3	4	6	-2	4	6
19_JA	6	6	1	-5	6	5	6	1	1	-1	0	1
20_FL	28	26	28	2	20	18	20	2	28	28	28	0
21_DP	14	0	-14	-14	15	-5	-15	-10	10	0	-10	-10
22_LP	6	-6	-5	1	7	-7	-7	0	6	-6	-5	1
23_KM	10	-1	-10	-9	10	0	-10	-10	16	-7	-16	-9
24_EG	11	2	-9	-11	11	0	-11	-11	8	-2	-8	-6
25_OD	10	-6	-10	-4	14	-10	-14	-4	14	-10	-14	-4
26_AD	8	6	-2	-8	9	6	-3	-9	7	7	0	-7
Moy. (abs)	9±6	6±6	7±6	5±4	10±5	7±5	8±6	4±4	10±6	7±6	8±7	5±4

7.1.2.Hauteurs de toit

L'analyse de la répétabilité de l'identification des hauteurs de toit se fait tout d'abord sur les essais de la Xsara. Le Tableau 31 présente la moyenne des écarts entre chaque répétition pour les hauteurs *Ht1* et *Ht2* pour tous les participants.

Tableau 31 : Ecart dans l'identification de la première hauteur de toit inconfortable *Ht1* et la dernière acceptable *Ht2* entre les trois répétitions effectuées sur la Citroën Xsara Picasso.

Sujet	Ht1				Ht2			
	Max	2-1	3-1	3-2	Max	2-1	3-1	3-2
01_GM	85	-80	-85	-5	60	-15	-60	-45
02_NC	20	-15	-20	-5	42	42	32	-10
03_SM	90	-80	-90	-10	30	-20	-30	-10
04_EB	40	5	-35	-40	25	20	25	5
05_CH	80	-70	-80	-10	50	-40	-50	-10
06_TP	60	-40	-60	-20	5	5	0	-5
07_SM	80	-70	-80	-10	5	-5	0	5
08_JN	20	-10	10	20	60	30	60	30
09_SA	40	-35	-40	-5	10	-10	-10	0
10_SP	80	-80	-70	10	45	-35	-45	-10
11_RZ	75	-75	-55	20	45	-45	-25	20
12_DA	40	-20	-40	-20	5	5	5	0
13_SN	30	-30	-25	5	35	35	35	0
14_GM	50	-50	-40	10	20	-20	-20	0
15_AP	25	-20	5	25	30	10	-20	-30
16_RA	65	-45	-65	-20	40	-15	-40	-25
17_SF	80	-80	-70	10	80	-55	-80	-25
18_RP	10	10	5	-5	22	-7	-22	-15
19_JA	40	-40	-40	0	65	-65	-50	15
20_FL	35	-30	-35	-5	60	-55	-60	-5
21_DP	0	0	0	0	35	-20	15	35
22_LP	25	-10	-25	-15	15	15	5	-10
23_KM	15	-5	10	15	10	-10	-5	5
24_EG	0	0	0	0	5	-5	0	5
25_OD	10	5	10	5	15	15	5	-10
26_AD	10	0	-10	-10	20	-15	-20	-5
Moy. (abs)	42 ± 29	34.8 ± 29	39 ± 29	11 ± 9	32 ± 21	24 ± 18	28 ± 22	13 ± 12

Le Tableau 32 présente la valeur moyenne pour tous les participants des écarts entre les deux identifications successives des hauteurs de toit en fonction des différentes configurations testées et ce pour les hauteurs de toit *Ht1* et *Ht2*.

Tableau 32 : Ecarts pour chaque participant entre V1 et V2 pour tous les essais (V2-V1).

Sujet	Ht1						Ht2					
	Hs1	Hs2	Hs3	XSA1	XSA2	XSA3	Hs1	Hs2	Hs3	XSA1	XSA2	XSA3
01_GM	-20	5	-15	-5	-10	0	-5	-15	-10	-10	30	0
02_NC	5	15	20	40	-10	10	15	15	15	35	20	0
03_SM	0	-5	10	10	0	-10	10	-5	-5	5	-5	10
04_EB	-5	10	20	10	15	-10	5	10	5	5	5	10
05_CH	10	-5	0	0	0	-5	0	10	-10	15	10	5
06_TP	15	0	5	-10	0	0	0	5	0	-10	0	0
07_SM	0	0	20	15	0	-10	0	5	-5	-15	0	-5
08_JN	-10	15	0	5	10	10	15	0	15	-10	-5	5
09_SA	0	0	0	0	5	-5	0	0	0	0	10	5
10_SP	-5	0	10	-5	0	-15	5	15	0	-10	10	5
11_RZ	-5	20	10	10	-10	0	5	5	5	10	10	0
12_DA	5	-5	5	10	20	10	5	0	-5	-15	-5	0
13_SN	-5	5	20	15	10	5	10	15	5	0	0	5
14_GM	-15	-5	0	10	0	10	-10	-5	0	10	0	-10
15_AP	-10	-5	25	-10	-5	5	5	0	10	-10	-10	5
16_RA	0	0	10	0	-10	-5	5	0	15	20	-10	-5
17_SF	5	-10	0	0	0	0	15	0	-5	0	5	5
18_RP	5	10	5	-10	5	-15	5	10	0	25	10	5
19_JA	0	-5	-10	0	0	-10	-5	-5	-20	0	-15	-10
20_FL	10	5	5	5	5	0	10	5	-5	15	-5	15
21_DP	10	0	0	-10	-5	-10	15	15	-5	5	0	10
22_LP	10	-5	0	0	0	5	5	10	10	-5	0	-10
23_KM	5	25	0	-10	0	0	5	0	5	10	0	0
24_EG	-10	5	0	-5	10	-5	0	0	10	0	-5	10
25_OD	10	0	5	-10	0	5	5	5	0	5	5	0
26_AD	15	0	-10	0	15	5	10	5	-5	10	0	10
Moy.	7 ± 5	6 ± 7	8 ± 8	8 ± 8	6 ± 6	6 ± 5	7 ± 5	6 ± 6	7 ± 5	10 ± 8	7 ± 7	6 ± 4

7.2. Evaluation de l'inconfort

7.2.1. Etude relative à la hauteur de toit

Tableau 33 : Tableau croisé dynamique présentant la note d'inconfort globale en fonction des groupes de stature des participants, de hauteur d'assise et de hauteur de toit.

		P	M	G	Total
Hs1	Ht1	29±10	34±11	31±08	31±09
	HtM	22±07	26±12	28±07	25±09
	Ht2	30±08	34±17	34±11	33±12
Total Hs1		27±09	31±13	31±09	30±11
Hs2	Ht1	18±05	15±09	25±09	19±09
	HtM	21±09	21±08	22±09	21±08
	Ht2	28±11	28±10	27±10	28±10
Total Hs2		22±10	21±10	25±09	23±10
Hs3	Ht1	24±09	13±08	15±06	17±09
	HtM	27±11	15±10	15±07	19±10
	Ht2	31±09	27±07	23±08	27±08
Total Hs3		27±10	18±10	18±08	21±10
Total		26±10	23±12	24±10	24±11

P : Groupe Petite hauteur de buste, M : Groupe hauteur de buste Moyenne, G : Groupe Grande hauteur de buste.

7.2.2. Etude relative à la largeur de bavolet

Tableau 34 : Tableau croisé dynamique de la hauteur de toit en fonction de la stature des participants et de la hauteur d'assise.

		P	M	G	Total
Hs1	**Lb1**	29±10	34±11	31±08	31±09
	LbM	26±08	27±07	28±04	27±06
	Lb2	38±09	35±07	34±07	36±08
Total Hs1		31±10	32±09	31±07	31±09
Hs2	**Lb1**	18±05	15±09	25±09	19±09
	LbM	24±07	17±10	21±05	21±08
	Lb2	38±08	30±04	31±06	33±07
Total Hs2		27±11	21±10	25±08	24±10
Hs3	**Lb1**	24±09	13±08	15±06	17±09
	LbM	25±07	15±09	16±03	19±08
	Lb2	39±07	28±08	27±07	31±09
Total Hs3		29±10	18±10	19±08	23±11
Total		29±10	24±11	25±09	26±10

P : Petite stature, M : stature Moyenne, G : Grande stature.

7.3. Eléments de l'habitacle gênants et parties du corps gênées

Pour rappel, pour chaque essai, le relevé de l'inconfort se déroulait en trois étapes : 1/ l'attribution d'une note d'inconfort puis 2/ l'identification des éléments ayant engendré cet inconfort et 3/ la répercussion de cet inconfort sur le corps du participant. Pour ces deux derniers points, l'expérimentateur relevait les raisons de cet inconfort selon le participant. Le paragraphe suivant va s'intéresser à ces deux derniers points.

7.3.1. Etude de la Hauteur de toit

Le Tableau 35 fait le bilan comptable des éléments de l'habitacle identifiés comme gênants par les participants pour les essais relatifs à l'étude de la hauteur de toit. La Figure 65 présente ces résultats pour les zones de l'habitacle d'une part et pour les parties corporelles gênées d'autre part. Au total, 234 essais ont été réalisés pour cette expérimentation : à raison de 3 hauteurs d'assise étudiées par participant et de 3 hauteurs de toit pour chacune d'elles, sur les 234 essais 78 concernent chacune des hauteurs particulières (*Ht1*, *Ht2* et *HtM*).

Tableau 35 : Eléments de l'habitacle identifiés par les participants comme gênants pour les essais associés à la hauteur de toit (en % du nombre d'essais). Valeurs bleues pour l'entrée et rouges pour la sortie.

Essai	Nb	Siège		Toit		Montant		Bavolet		Plancher		Pied Avant		Pied Milieu		Volant	
Total	234	49	56	71	62	12	1	44	38	19	8	0	0	0	2	33	22
Ht1	78	53	59	62	40	10	1	42	40	19	8	0	0	0	4	38	24
Ht2	78	47	51	92	91	18	1	46	41	21	8	0	0	0	1	28	22
HtM	78	46	58	58	54	8	1	42	35	18	9	0	0	0	0	32	19
Hs1	78	62	71	67	60	13	3	55	56	22	13	0	0	0	1	59	44
Hs2	78	29	35	78	68	12	1	35	40	15	8	0	0	0	3	35	21
Hs3	78	54	64	68	56	13	0	42	21	21	4	0	0	0	0	4	1
P	81	52	65	74	64	27	1	56	52	20	9	0	0	0	0	19	6
M	72	48	52	69	54	6	0	36	40	18	8	0	0	0	0	37	27
G	81	46	49	68	68	2	3	40	19	21	8	0	0	0	6	46	35

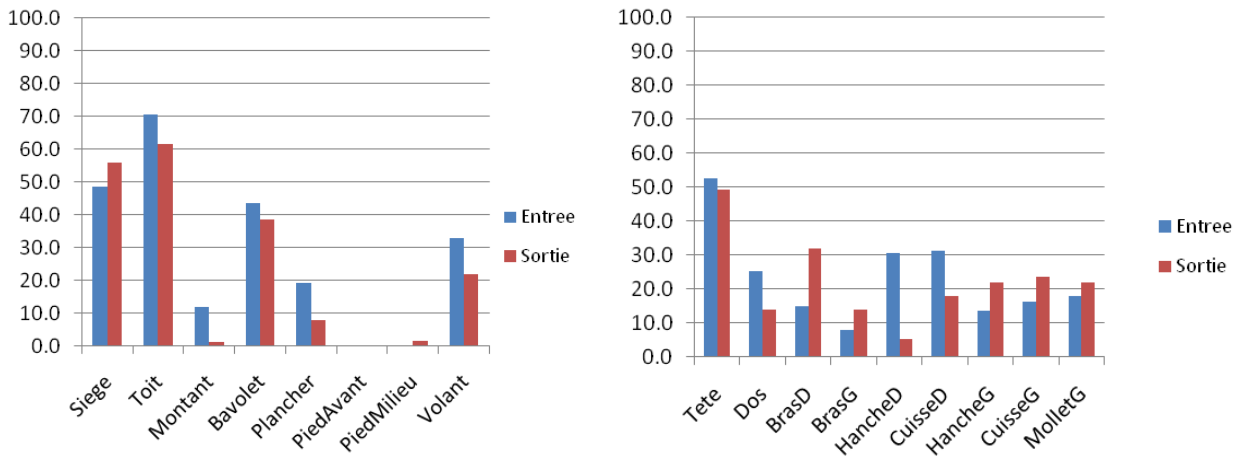


Figure 65 : Importance relative (% nombre d'essais) des zones de l'habitacle identifiées comme gênantes (gauche) et des parties corporelles gênées (droite) pour l'entrée (bleu) et la sortie (rouge).

Comme il était attendu, le toit est l'élément le plus cité au cours de l'expérimentation et ce pour 70% des essais pour l'entrée et 60% des essais pour la sortie ; suit ensuite le siège (avec au moins 50% des essais), et enfin le bavolet (40% des essais). Le montant est quant à lui seulement cité pour l'entrée pour 12% des essais.

Concernant les parties corporelles gênées, une différence apparaît également entre l'entrée et la sortie :
- pour l'entrée, la gêne est notamment localisée au niveau de la jambe droite et du dos ;
- alors que pour la sortie, ce sont surtout la jambe gauche et le bras droit qui ont été gênés.

La tête est la partie corporelle qui a le plus gêné les participants et ce sans distinction de l'entrée ou de la sortie (50% des essais). Au contraire, le dos a été nettement moins cité comme source d'inconfort.

En outre, le tri des remarques des participants, a permis de dégager 3 raisons :
- Concernant les éléments de l'habitacle :
  - la hauteur de toit,
  - la largeur de toit,
  - et le fait que le montant soit trop proche ;
- Concernant les parties corporelles :
  - la flexion frontale et l'inclinaison latérale de la tête,
  - et la flexion frontale et l'inclinaison latérale du dos.

Comme pour les notes d'inconfort, on s'interroge sur l'existence d'un effet de la hauteur d'assise et de l'anthropométrie sur les éléments de l'habitacle gênants et les parties corporelles gênées. La Figure 66 et la Figure 67 répondent à cette question.

Du Tableau 35, il apparaît également qu'il n'y a pas d'effet de la hauteur d'assise sur l'identification du toit comme gênant et sur les parties corporelles gênées.

Considérant l'effet de la hauteur de toit (Tableau 35), le toit a évidemment était plus souvent identifié comme gênant pour la hauteur *Ht2* (90% des essais), alors que pour la hauteur *Ht1* et la hauteur HtM lors de l'entrée (respectivement 62% et 58% des essais), l'écart est très faible. Au regard des raisons expliquant cet inconfort, la hauteur de toit est celle qui a le plus largement gêné les participants (Figure 66-a) ; le montant et la largeur de toit n'ayant été cités que pour au plus 20% des essais. Cette différence s'accentue d'autant plus que la hauteur de toit est basse. La largeur de bavolet est, que ce soit pour l'entrée ou la sortie, une source très peu citée.

Tableau 36 : Causes des gênes des participants pour les essais associés à la hauteur de toit (en % du nombre d'essais). Valeurs bleues pour l'entrée et rouges pour la sortie.

Essai	Nb	Toit Hauteur		Montant		Toit Largeur		Tête Flexion		Tête Inclinaison		Dos Flexion		Dos Inclinaison	
Total	234	70	62	12	1	1	3	28	47	29	5	15	14	12	0
Ht1	78	62	40	10	1	1	0	17	28	19	3	6	4	4	0
Ht2	78	92	91	18	1	1	6	49	77	42	5	28	29	24	0
HtM	78	56	54	8	1	1	4	19	35	26	6	10	9	8	0
Hs1	78	65	60	13	3	1	3	24	46	35	4	19	15	13	0
Hs2	78	78	68	12	1	3	5	32	45	26	9	18	10	6	0
Hs3	78	68	56	13	0	0	3	28	49	27	1	8	17	17	0
P	81	74	57	27	1	3	2	22	44	40	7	11	17	15	0
M	72	68	60	6	0	1	6	22	42	32	2	12	11	13	0
G	81	68	68	2	3	0	63	44	56	11	5	24	14	6	0

Cette tendance est également observée sur les parties corporelles gênées (Figure 67-a). L'écart entre les hauteurs *Ht1* et *HtM* est relativement faible et ce pour l'entrée et la sortie. Alors que pour la hauteur Ht2, les participants ont été particulièrement gênés au niveau du tronc :

- pour l'entrée, c'est l'ensemble du tronc qui a été le plus gêné ;
- alors que pour la sortie, où les participants ne peuvent s'incliner latéralement à cause du toit proche de leur tête, la gêne est principalement issue de la flexion frontale de la tête et du buste.

Les différences, entre les 3 groupes de participants selon la hauteur de buste, ne sont pas significatives pour la gêne liée au toit (Figure 66-b). Toutefois, les participants de petit buste sont particulièrement gênés par le montant lors de l'entrée : le montant a été gênant pour 27% des essais pour les petits bustes, 6% pour les bustes moyens et 2% pour les grands bustes. Au regard des résultats, il apparaît que pour l'entrée des participants de petit buste, l'inclinaison latérale a été plus gênante que la frontale, alors que pour la sortie quelle que soit la hauteur de buste, les participants ont favorisé la flexion frontale et ont donc été plus gênés dans ce mouvement.

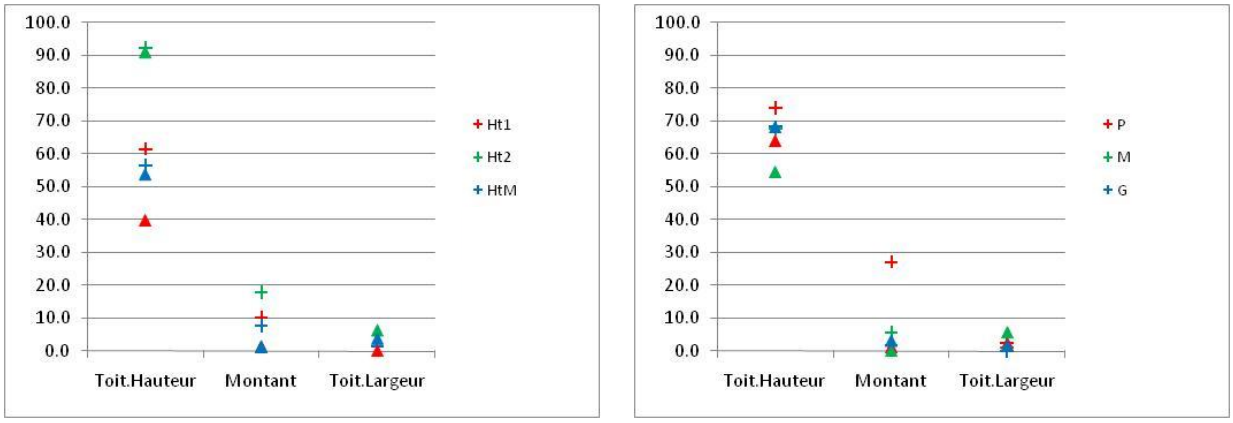


Figure 66 : Importance relative (% du nombre d'essais) des causes de gêne dues au toit pour l'entrée (croix) et pour la sortie (triangles) pour les essais liés à la hauteur de toit suivant la hauteur de toit (gauche) et les groupes de stature (droite).

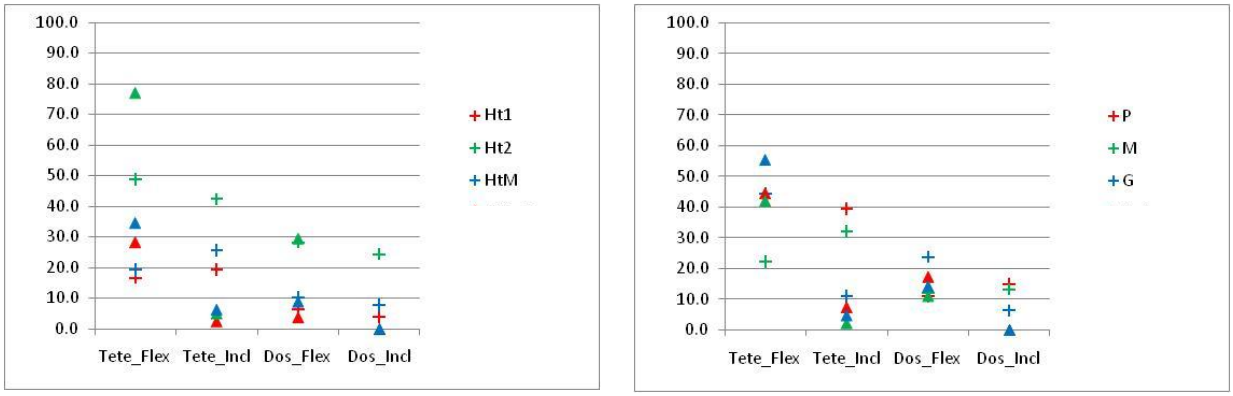


Figure 67 : Importance relative (% du nombre d'essais) des parties corporelles gênées (croix) et la sortie (triangles) pour les essais associés à la hauteur de toit suivant la hauteur de toit (gauche) et les groupes de stature (droite).

7.3.2. Etude de la Largeur de bavolet

Le Tableau 37 fait le bilan comptable des éléments de l'habitacle identifiés comme gênants par les participants pour les essais relatifs à la largeur de bavolet. La Figure 68 présente ces résultats pour les zones de l'habitacle d'une part et pour les parties corporelles d'autre part.

Aucune différence significative n'apparaît entre l'entrée et la sortie pour les éléments de l'habitacle gênants. Ainsi si les participants ont été gênés par un élément pour l'entrée, ils l'ont également été pour la sortie. Concernant les parties corporelles gênées, les mêmes remarques proposées pour la hauteur de toit peuvent être faites.

Sans surprise, le bavolet est pour cette partie de l'expérimentation l'élément le plus gênant (pour 70% des essais), suivi par le siège (variable principale de l'étude et ce pour 50% des essais). Le Tableau 37 confirme que plus le bavolet est éloigné du siège, plus il va être gênant pour le participant et ce sans distinction de l'entrée et de la sortie :

- pour la largeur la plus éloignée *Lb2*, le bavolet a été gênant pour 96% des essais,
- pour la largeur intermédiaire *LbM*, le bavolet a été gênant pour au moins 69% des essais,
- et pour la largeur la plus proche *Lb1*, le bavolet a été gênant pour au moins 40% des essais ;

Tableau 37 : Eléments de l'habitacle identifiés comme gênants pour les essais associés à la largeur de bavolet (% du nombre d'essais). Valeurs bleues pour l'entrée et rouges pour la sortie.

Essai	Nb	Siège		Toit		Montant		Bavolet		Plancher		Pied Avant		Pied Milieu		Volant	
Total	234	47	51	35	25	7	0	71	68	18	9	0	0	0	1	33	22
Lb1	78	53	59	62	40	10	1	42	40	19	8	0	0	0	4	38	24
Lb2	78	41	38	21	13	4	0	96	96	15	8	0	0	0	0	29	21
LbM	78	46	56	24	22	6	0	73	69	18	12	0	0	0	0	32	22
Hs1	78	59	65	40	31	13	1	77	85	21	13	0	0	0	0	62	46
Hs2	78	32	31	33	26	4	0	67	71	15	6	0	0	0	4	33	19
Hs3	78	49	58	33	18	4	0	68	50	17	8	0	0	0	0	5	1
P	81	49	52	37	20	19	0	78	81	14	14	0	0	0	0	9	4
M	72	57	61	29	24	0	0	65	68	15	7	0	0	0	0	42	25
G	81	35	42	40	31	1	1	68	56	23	6	0	0	0	4	51	38

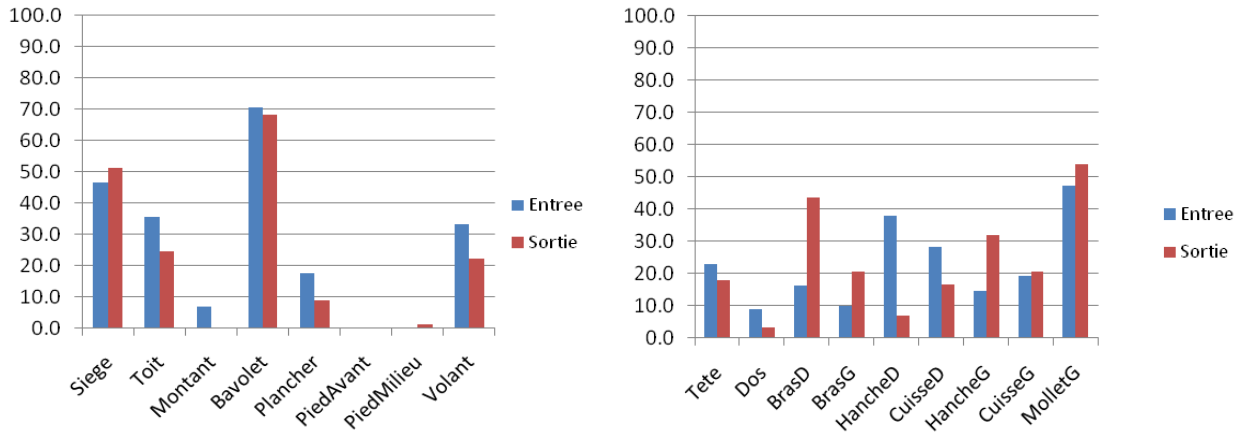


Figure 68 : Importance relative (en % du nombre d'essais) des zones de l'habitacle identifiées comme gênantes pour l'entrée (bleu) et la sortie (rouge) pour les essais liés au bavolet.

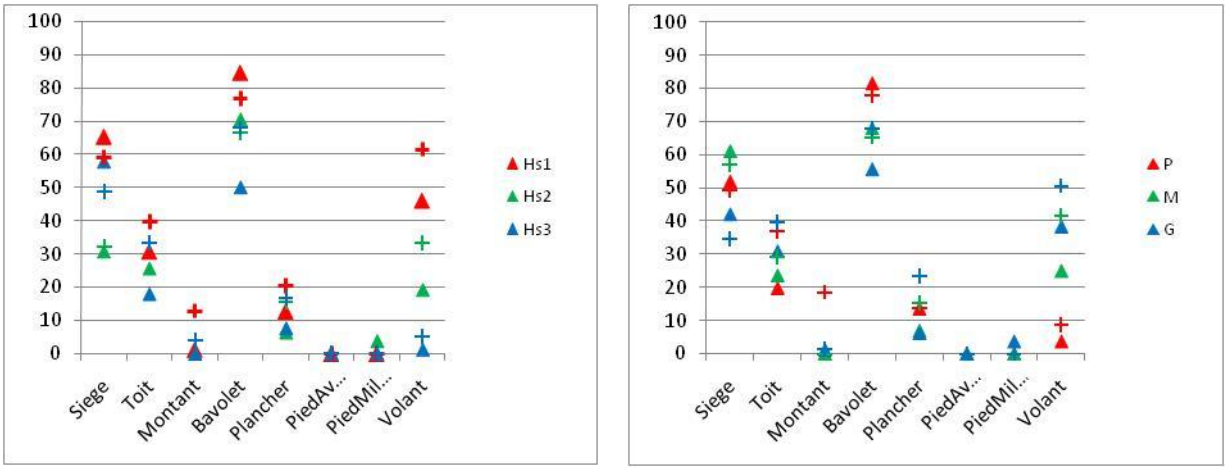


Figure 69 : Importance relative (en % du nombre d'essais) des zones de l'habitacle identifiées comme gênantes pour l'entrée (croix) et la sortie (triangles) pour les essais liés au bavolet suivant les 3 hauteurs d'assises (gauche) et les 3 groupes de stature (droite).

La Figure 69 (a et b) confirme ce qui avait été observé avec la note d'inconfort, à savoir que le bavolet est d'autant plus gênant que les participants sont petits et que la hauteur d'assise est faible. Au contraire, le bavolet a été moins identifié comme gênant pour :

- la sortie de la haute assise Hs3, pour 50% des essais alors que pour les deux autres hauteurs d'assise au moins 67% des essais ;
- et les participants de grande stature, pour 56% des essais alors que pour les deux autres hauteurs d'assise au moins 65% des essais.

Concernant les causes de l'inconfort associé au bavolet, les participants ont été de manière générale plus gênés par la largeur que par la hauteur. Toutefois une tendance semble apparaître suivant l'éloignement du bavolet par rapport au siège (cf. Figure 70-a). De manière générale, les participants ont autant identifié la hauteur de bavolet comme gênante pour toutes les largeurs de bavolet et que ce soit pour l'entrée ou la sortie. Concernant l'analyse des parties corporelles gênées (Figure 70-b), une fois les données triées, quatre types de gêne ayant pour cause la largeur de bavolet ressortent :

- le contact du mollet avec le bavolet,
- l'écartement des jambes,
- le fait de tendre la jambe gauche pour amener le pied en dehors du véhicule lors de la sortie,
- et le fait de lever le genou : genou droit pour l'entrée et genou gauche lors de la sortie.

Tableau 38 : Causes de la gêne des participants pour les essais associés à la largeur de bavolet (en pourcentage du nombre d'essais). Valeurs bleues pour l'entrée et rouges pour la sortie.

Essai	Nb	Bavolet Largeur		Bavolet Hauteur		Mollet Contact		Ecartement Jambes		Jambe Gauche Tendue		Genou Levé	
Total	234	55	59	38	24	48	54	21	19	1	2	18	5
Lb1	78	18	21	37	24	21	24	8	5	1	1	19	6
Lb2	78	96	95	32	24	78	88	44	35	1	3	15	3
LbM	78	51	60	44	23	44	50	10	18	1	3	21	6
Hs1	78	59	67	47	44	53	63	22	23	0	3	9	14
Hs2	78	55	62	27	19	46	56	17	21	0	0	17	1
Hs3	78	51	47	39	9	44	42	23	14	4	4	30	0
P	81	62	68	46	37	48	53	20	27	0	0	22	10
M	72	51	58	29	21	50	60	28	21	4	6	17	0
G	81	52	49	37	14	44	49	15	10	0	1	16	24

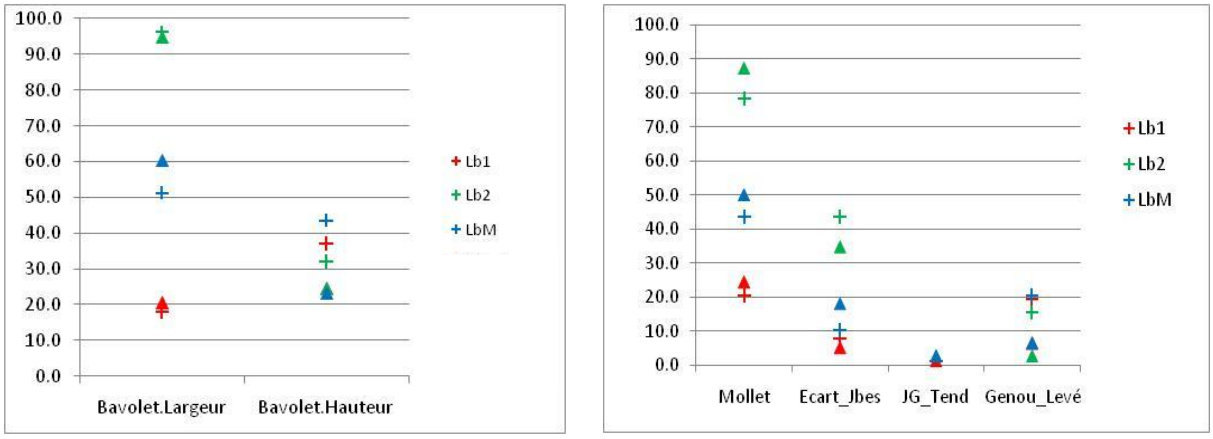


Figure 70 : Importance relative (en % du nombre d'essais) des causes de la gêne (gauche) et des parties corporelles gênées (droite) à cause du bavolet pour l'entrée (croix) et la sortie (triangle).

Le Tableau 38 montre qu'il n'y a pas d'effet de la hauteur d'assise et de la stature des participants sur les parties corporelles gênées. De manière générale, le contact du mollet est à l'origine de la gêne la plus récurrente des participants et logiquement plus le bavolet est éloigné plus le nombre de gênes est important (sans distinction de l'entrée et de la sortie). Ainsi pour l'entrée : pour la largeur *Lb1*, le contact du mollet est gênant pour 21% des essais, 44% des essais pour la largeur intermédiaire *LbM*, et 78% des essais pour la largeur la plus éloignée *Lb2*.

On remarque également que ce n'est pas parce que les participants ont trouvé que le bavolet était trop haut qu'ils ont été gênés par le fait de lever le genou. Ainsi pour l'entrée, si la hauteur de toit a été gênante pour 38% des essais (24% pour la sortie), le fait de lever le genou haut ne l'a été que pour 18% des essais (5% pour la sortie).

7.4. Identification des hauteurs de toit

7.4.1. Première hauteur de toit gênante *Ht1*

Le Tableau 39 présente le tableau croisé dynamique de la hauteur de toit *Ht1* en fonction de la stature et de la hauteur d'assise.

Tableau 39 : Tableau croisé dynamique de la hauteur de toit *Ht1* en fonction de la stature des participants et de la hauteur d'assise.

	P	M	G	Total
Hs1	715±31	707±34	722±25	715±29
Hs2	711±19	708±30	724±38	714±29
Hs3	714±27	713±39	730±27	719±31
Total	713±25	709±33	725±29	716±30

P : Petite stature, M : stature Moyenne, G : Grande stature.

7.4.2. Dernière hauteur de toit acceptable *Ht2*

Le Tableau 40 présente le tableau croisé dynamique de la hauteur de toit *Ht2* en fonction de la stature et de la hauteur d'assise.

Tableau 40 : Tableau croisé dynamique de la hauteur de toit *Ht2* en fonction de la stature des participants et de la hauteur d'assise.

	P	M	G	Total
Hs1	677±29	667±35	682±20	676±28
Hs2	666±26	659±26	683±21	669±26
Hs3	672±19	661±46	672±36	669±34
Total	671±25	662±35	679±23	671±29

P : Petite stature, M : stature Moyenne, G : Grande stature.

7.4.3. Écart *DHt* entre les hauteurs *Ht1* et *Ht2*

Le Tableau 41 ci-dessous présente le tableau croisé dynamique liant ces deux facteurs avec l'écart *DHt* (*DHt=Ht1-Ht2*). Le Tableau 42 présente le détail de ces résultats pour les 26 participants.

Tableau 41 : Tableau croisé dynamique de l'écart *DHt* entre les hauteurs *Ht1* et *Ht2* en fonction de la stature des participants et de la hauteur d'assise.

	P	M	G	Total
Hs1	38±20	40±18	40±26	39±21
Hs2	45±24	49±16	41±35	45±26
Hs3	43±26	51±19	58±29	50±25
Total	42±23	47±18	46±30	45±24

P : Petite stature, M : stature Moyenne, G : Grande stature.

Tableau 42 : Écart *DHt* entre les hauteurs *Ht1* et *Ht2*.

Sujet	Hs1	Hs2	Hs3	Xsa1	Xsa2	Xsa3	Moy	SD
01_GM	100	130	115	150	85	125	117.5	23.0
02_NC	-5	25	50	87.5	30	35	37.1	30.6
03_SM	65	30	30	70	10	10	35.8	26.2
04_EB	45	80	5	65	50	5	41.7	30.9
05_CH	45	35	45	50	20	20	35.8	13.2
06_TP	45	30	75	90	45	30	52.5	24.6
07_SM	40	40	90	110	45	30	59.2	32.6
08_JN	20	70	40	90	50	40	51.7	24.8
09_SA	50	20	25	50	25	20	31.7	14.4
10_SP	40	35	75	75	30	50	50.8	19.9
11_RZ	15	30	40	50	20	20	29.2	13.6
12_DA	20	5	35	75	50	30	35.8	24.4
13_SN	20	30	20	100	35	40	40.8	30.1
14_GM	35	50	45	65	35	45	45.8	11.1
15_AP	20	35	17.5	40	10	65	31.3	20.0
16_RA	15	50	60	55	25	30	39.2	18.3
17_SF	55	35	70	55	30	65	51.7	16.0
18_RP	70	75	80	47.5	65	75	68.8	11.6
19_JA	35	50	65	25	50	35	43.3	14.4
20_FL	35	50	60	50	75	75	57.5	15.7
21_DP	40	30	60	50	70	35	47.5	15.4
22_LP	40	30	25	80	55	50	46.7	19.9
23_KM	40	42.5	50	40	45	55	45.4	6.0
24_EG	60	45	30	50	55	50	48.3	10.3
25_OD	30	25	45	50	40	55	40.8	11.6
26_AD	50	90	60	60	75	70	67.5	14.1
Moy	39.4	44.9	50.5	66.5	43.3	44.6		
SD	21.0	26.0	24.9	26.5	20.0	25.2		

CHAPITRE 4 – ANALYSE BIOMECANIQUE DU MOUVEMENT

1. Introduction **113**
2. Identification des instants clés et analyse de la chronologie du mouvement **113**
2.1. Description du mouvement d'entrée 113
2.2. Description du mouvement de sortie 119
3. Interactions du conducteur avec l'habitacle lors de l'entrée dans l'habitacle **124**
3.1. Passage de la tête sous le toit 124
3.2. Interaction avec le bavolet 128
3.3. Passage de la jambe sous le volant 129
3.4. Utilisation du volant 130
4. Interactions du conducteur avec l'habitacle lors de la sortie de l'habitacle **134**
4.1. Passage de la tête sous le toit 134
4.2. Interaction avec le bavolet 136
4.3. Passage de la jambe sous le volant 138
4.4. Utilisation du volant 139
5. Discussion **144**
5.1. Compréhension de l'identification des hauteurs de toit 144
5.2. Passage de la jambe sous le volant 145
5.3. Collision et gêne avec le bavolet 146
5.4. Rôle de l'appui sur le volant 146

1. Introduction

L'analyse des identifications des hauteurs révèle deux résultats marquants :

- l'exigence pour la hauteur de toit ne dépend ni de la stature ni de la hauteur d'assise. Nous faisons l'hypothèse que ceci est principalement du à l'espace autour du siège qui est réduit pour les petites statures en raison de la position plus avancée du siège et de la posture des participants qui varie très peu d'une configuration à un autre lorsque la tête passe sous le toit.
- seulement 45 mm permettent de passer d'une hauteur de toit sans gêne à une hauteur qui n'est plus acceptable pour le conducteur. Nous supposons que l'espace autour du siège contraint tellement le conducteur qu'il ne lui permet pas une grande liberté de mouvements.

L'analyse des questionnaires d'inconfort a également montré :

- le caractère critique de la largeur de bavolet et notamment la forte gêne du contact entre le bavolet et le mollet mais également entre le renfort de l'assise et le dessous de la cuisse. Ceci nous laisse supposer que la gêne des participants pourrait également être induite par la nécessité de se décaler dans le siège pour se mettre en position de conduite lors de l'entrée et/ou pour amener le pied gauche au sol lors de la sortie. Le volant jouerait dans ce cas un rôle important pour faciliter le décalage des participants.
- la difficulté du passage de la jambe sous le volant. Nous supposons dès lors une influence forte de cette interaction sur la stratégie de mouvement.

Le présent chapitre a pour objectif de vérifier ces hypothèses à travers l'analyse des interactions du conducteur avec l'habitacle et des paramètres biomécaniques internes (angles et couples articulaires). En effet, les interactions conducteur/habitacle ont une influence directe sur le mouvement réalisé et l'inconfort perçu. Deux types d'interactions sont analysés : le contact entre le conducteur et les éléments de l'habitacle (volant, siège), et l'évitement des éléments de l'habitacle (toit, bavolet, volant).

Pour faciliter la lecture, le chapitre s'organise autour de deux parties :

- la première présente l'identification des instants clés et la chronologie du mouvement.
- la seconde tend à analyser l'influence et le rôle des interactions sur le mouvement.

2. Identification des instants clés et analyse de la chronologie du mouvement

Pour comprendre le mouvement d'accessibilité et la manière dont il se déroule, on identifie des instants clés pendant lesquels apparaissent les interactions entre le conducteur et l'habitacle.

2.1. Description du mouvement d'entrée

2.1.1. Instants clés

L'observation des mouvements d'entrée, montre qu'une seule stratégie a été utilisée par les participants : la stratégie « jambe droite en premier » (El Menceur [AIT_08]).

Pour cette stratégie, 8 instants clés sont identifiés à partir des données cinématiques et dynamiques issues de la reconstruction de mouvement. Ces instants clés, illustrés Figure 71, sont les suivants :

- **Quand le pied droit quitte le sol (*PD.Sol*) :** le conducteur commence sa phase d'appui monopodal, pendant laquelle il s'appuie sur son seul pied gauche. Cet instant définit le début du mouvement d'entrée, à partir duquel tous les efforts externes sont mesurés.
  ⇨ Cet instant est identifié quand la pointe du pied droit est au-delà de 10 mm du sol.
- **Quand le pied droit atteint le plancher (*PD.Pla*) :** Il conclut la phase d'appui monopodal, pendant laquelle le conducteur est uniquement en équilibre sur sa jambe gauche et annonce le début du transfert du centre de masse de l'extérieur vers l'intérieur de l'habitacle.
  ⇨ Cet instant est identifié quand la norme de la force sur le plancher est supérieure à 5 N.

- **Quand le conducteur attrape le volant (*Main.Vol*) :** Lors de la détection de cet instant, qui n'est pas systématique, on a rencontré quelques difficultés. En effet, lors du passage de la cuisse droite de la gauche à la droite du volant, celle-ci vient appliquer un effort sur le volant. Dans ce cas, nous ne sommes pas capables de différencier la part d'effort appliqué par la main de celle liée au contact avec la cuisse. Pour s'assurer de ne prendre en compte que celle liée à l'appui de la main sur le volant, on vérifie visuellement, lors de la détection, que la ou les mains sont sur le volant et que la direction de l'effort est cohérente avec la position des mains.
  ⇨ Cet instant est identifié quand la norme de la force sur le volant est supérieure à 5 N.
- **Quand le conducteur commence à s'assoir dans le siège (*Pel.Sie*) :** à partir de cet instant, le conducteur est en posture stable assise.
  ⇨ Il est identifié quand la composante verticale de la force appliquée sur le siège est supérieure à 10% du poids du participant.
- **Quand la tête passe sous le toit (*Tete.Toi*) :**
  ⇨ Cet instant est identifié lorsque la coordonnée suivant l'axe Y (du repère global, cf. Chapitre 3) du vertex dépasse celle du milieu de la barre de toit.
- **Quand la distance entre la jambe gauche et le bavolet est la plus faible (*JG.Bav*) :** Il permet d'évaluer la collision entre le mollet et le bavolet.
  ⇨ Cet instant est identifié quand la distance entre la droite joignant le genou gauche et la cheville gauche et la droite joignant les marqueurs EMB1 et EMB6 caractérisant le bavolet est la plus faible.
- **Quand le pied gauche quitte le sol (*PG.Sol*) :** Au-delà de cet instant, il n'y a plus d'interactions critiques et le mouvement se fait sans difficulté.
  ⇨ Cet instant est identifié quand la norme de la force sur le sol est inférieure à 5 N.
- **Quand le genou droit passe sous le volant (*GenD.Vol*) :**
  ⇨ Cet instant est identifié quand la coordonnée suivant l'axe Y de l'articulation du genou droit dépasse celle du centre du volant.

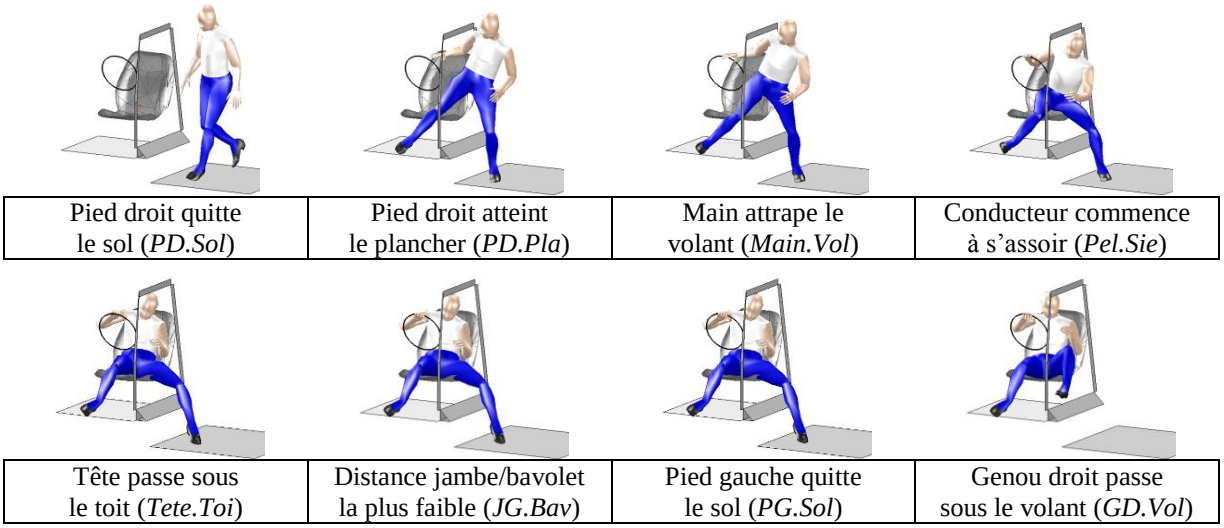


Figure 71 : Les 8 instants clés identifiés pour le mouvement d'entrée.

2.1.2. Chronologie du mouvement

Pour comparer les essais entre eux, les données sont recalées et normées temporellement de 0 à 100% de la durée du mouvement d'entrée (*%DE*). Les essais commencent quand le pied droit quitte le sol et se termine quand le pied gauche quitte le sol (cf. Figure 72, illustrant la chronologie du mouvement d'entrée). Nous choisissons de terminer la durée du mouvement quand le pied gauche quitte le sol car cet instant est déterminable aisément et qu'au-delà de cet instant, il n'y a plus d'interactions critiques.

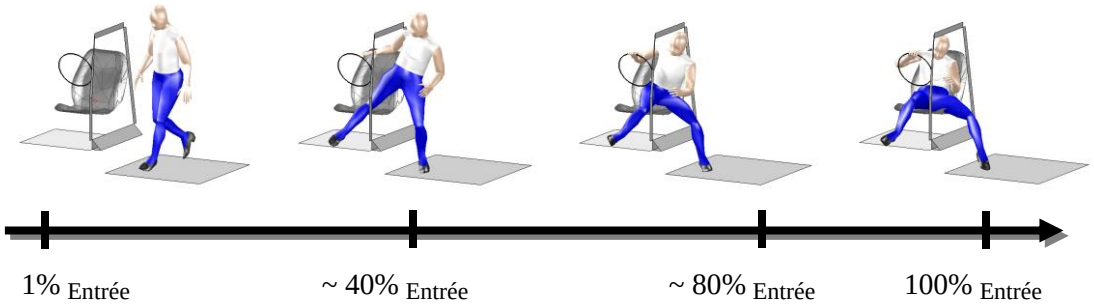


Figure 72 : Echantillonnage des essais pour le mouvement d'entrée.

Le Tableau 43 présente les valeurs moyennes et les écarts types d'apparition des instants clés en secondes et en pourcentages de la durée des essais normés.

Tableau 43 : Valeurs moyennes et écarts types des instants pour la chronologie de l'entrée en fonction des groupes de stature et des hauteurs d'assise.

Variables	Hs1	Hs2	Hs3	Petit	Moyen	Grand	Tous
dT (s)	1.5±0.2	1.4±0.2	1.3±0.2	1.3±0.2	1.5±0.3	1.4±0.2	1.4±0.2 ^{S***,G***,B***}
PD.Pla (%DE)	42±7	42±7	45±8	40±6	45±8	44±7	43±8 ^{S***,G***}
Main.Vol (%DE)	61±31	60±27	66±30	73±16	56±25	58±38	62±29 ^{G***}
Pel.Sie (%DE)	83±5	82±5	80±7	82±6	82±5	82±6	82±6 ^{S**}
Tete.Toi (%DE)	104±10	105±08	108±09	110±11	105±07	102±07	106±09 ^{S***,G***}
JG.bav (%DE)	91±6	91±6	91±7	89±7	92±5	92±6	91±6 ^{S***,G**}
GenD.Vol (%DE)	153±22	132±23	117±25	142±20	126±29	135±30	134±28 ^{S***,G***,B**}

* : p<0.05, ** : p<0.01, *** : p<0.001, S : hauteur siège, T : hauteur toit, G : groupe stature, B : largeur bavolet.

La Figure 73 présente un exemple type de l'enchaînement des interactions entre les éléments de l'habitacle et deux participants, une petite femme (graphiques de gauche) et un grand homme (graphiques de droite) pour les trois hauteurs d'assise. Les barres horizontales indiquent quand les effecteurs (mains, tête, bassin, pieds) sont en contact avec un élément de l'habitacle. Le trait en pointillés indique quand la tête passe sous le toit et le trait intermédiaire pour le pied gauche quand ce dernier passe au dessus du bavolet.

Le relevé des données relatives à la durée des essais pour rentrer dans l'habitacle montre que la durée moyenne des échantillons est de 1.4±0.2 secondes pour tous les essais de l'expérimentation (variable *dT* dans le Tableau 43) et que les mouvements sont d'autant plus longs que l'assise est basse et que la largeur de bavolet est importante (écart de 0.3s entre *Lb1* et *Lb2*).

La chronologie du mouvement permet d'identifier les quatre phases successives proposées par Chateauroux [CHA_09] lors de son analyse des stratégies de mouvement :

- **la phase d'appui monopodal**, au cours de laquelle le conducteur rentre sa jambe droite dans l'habitacle. Elle commence quand le pied droit quitte le sol (*PD.Sol*) et se termine quand il atteint le plancher (*PD.Pla*). Au cours de cette phase, le conducteur doit enjamber le bavolet et éviter le siège, le tout en conservant son équilibre sur son seul pied gauche.
  - ⇨ De manière générale, le pied droit atteint le plancher au bout de 43±8 %DE, soit un peu moins de la moitié de la durée des essais normés.
- **la phase d'appui bipodal**, qui débute quand le pied droit atteint le plancher (*PD.Pla*) et se termine quand le participant est assis dans le siège. Le conducteur doit alors transférer son centre de masse de l'extérieur à l'intérieur de l'habitacle et éviter pour certains que leur tête heurte le toit.
  - ⇨ En moyenne, les participants commencent à s'assoir au bout de 82 %DE (*Pel.Sie*). Sans surprise, les participants s'assoient en moyenne d'autant plus vite que l'assise est haute et

donc qu'elle est proche de leur bassin. Les petites femmes mettent autant de temps à s'assoir que les grands hommes.
De plus, pendant cette phase, l'interaction entre le mollet et le bavolet est la plus critique. L'instant où la distance entre la jambe gauche et le bavolet est la plus faible (*JG.Bav*), intervient au bout de 91±6 %DE (Tableau 43). Cet instant survient pour tous les essais entre le moment où les participants commencent à s'assoir et celui où leur pied gauche quitte le sol. Les écarts entre les différentes statures restent assez faibles ; la distance minimale étant détectée légèrement plus tôt pour les petites femmes.

- **L'entrée de la jambe gauche**. Une fois assis, le conducteur rentre sa jambe à l'intérieur de l'habitacle en évitant le bavolet. Pendant cette phase, il peut être amené à passer la tête sous le toit et à faire passer sa jambe droite d'un côté à l'autre du volant.
  ⇨ La tête passe ainsi en moyenne au bout de 106 %DE (*Tete.Toi*), soit un peu après que le pied gauche ait quitté le sol. Les participants sont donc déjà assis dans le siège (Figure 73).

- La dernière phase consiste à se **positionner dans le siège** pour se mettre en posture de conduite. Un ajustement de la position dans le siège est nécessaire notamment quand le conducteur s'est assis sur le renfort côté de embrasure. Dans ce cas, il doit décaler son corps au milieu du siège, et le cas échéant prendre appui sur le volant pour faciliter son mouvement. Il peut également profiter de ce décalage pour passer sa jambe droite de l'autre côté du volant.

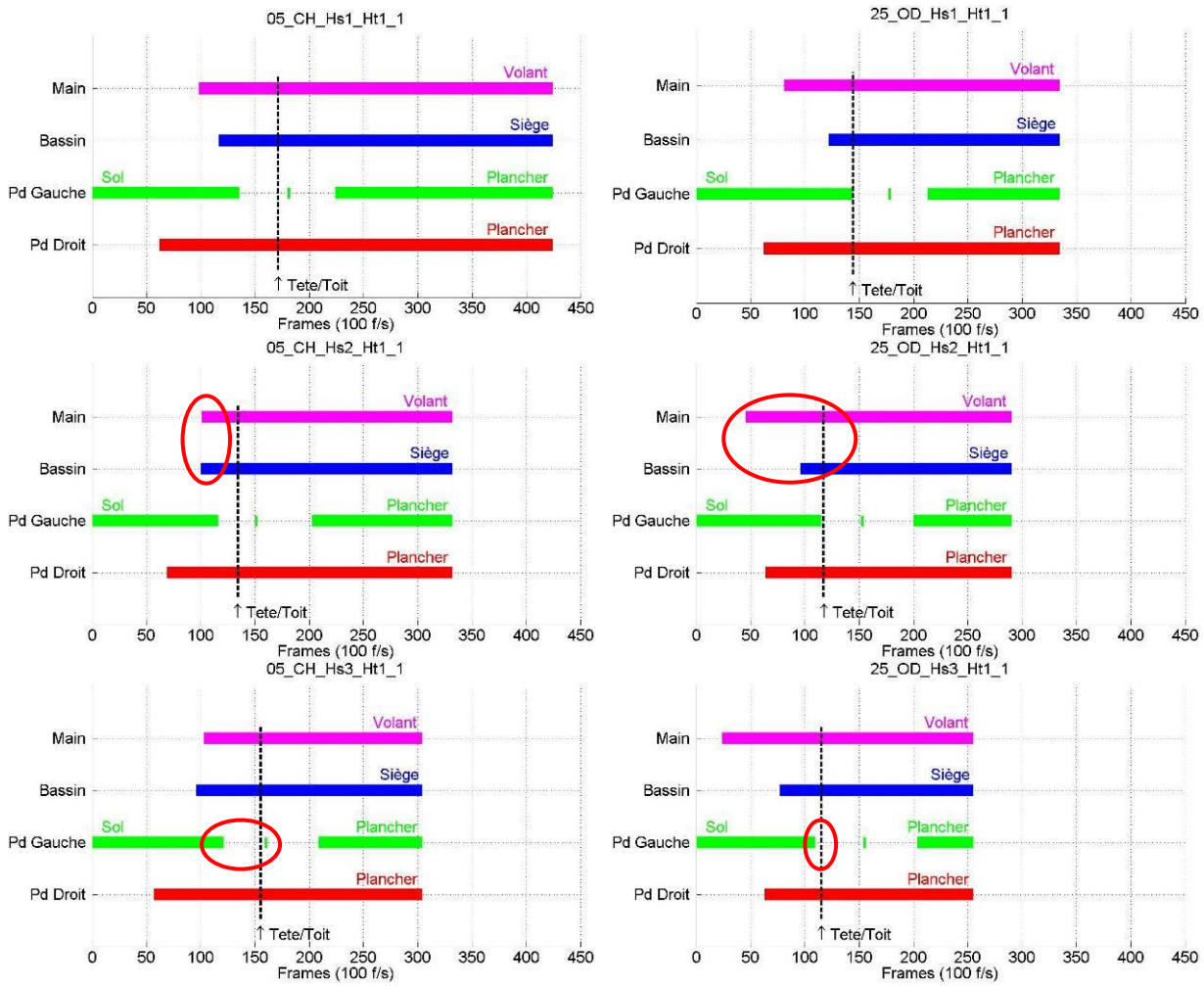


Figure 73 : Enchainement des interactions lors de l'entrée entre l'habitacle et 2 participants, un de petite (1ère colonne) et un de grande (2ème colonne) statures en fonction des 3 hauteurs d'assise. 1ère ligne pour l'assise *Hs1*, 2ème ligne pour *Hs2*, et 3ème ligne pour *Hs3*.

Le passage de la tête sous le toit et celui de la jambe droite sous le volant et l'utilisation du volant sont étudiés plus en détail pour mieux comprendre les interactions des participants avec l'habitacle.

2.1.2.1. Passage de la tête sous le toit

Lorsque les participants passent leur tête sur le toit, ils ont déjà commencé à s'assoir et ce quelle que soit leur stature ou la hauteur d'assise (cf. *Tete.Toi* dans le Tableau 43). La Figure 73, montre ainsi que le passage de la tête sous le toit (représenté par la ligne en pointillés) est proche de l'instant où le pied gauche passe au dessus du bavolet (trait intermédiaire vert) pour la petite femme, alors que pour le grand homme cet instant est proche de l'instant où il commence à s'assoir et où le pied gauche quitte le sol. Ceci est également illustré sur la Figure 74 qui présente la posture adoptée par une petite femme et grand homme quelques instants avant et après que leur tête passe sous le toit.

L'instant *Tete.Toi* est d'autant plus proche de *Pel.Sie* que les participants sont de grande stature et que l'assise est haute : un écart de 7 %DE (soit environ ¼ de seconde) est observé entre la plus haute et la plus basse hauteur d'assise et de 9 %DE entre les participants de grande et de petite statures entre ces deux instants. Cette différence atteint 11 %DE entre les petites femmes et les grands hommes pour la hauteur d'assise basse *Hs1*. Le passage de la tête se fait en même temps pour *Ht1* ou *Ht2*.

On constate également que le passage sous le toit se fait en moyenne après que le pied gauche quitte le sol *PG.Sol* (correspond à 100 %DE, cf. Tableau 43). Plus les participants sont de grandes statures plus ces deux instants sont proches. Ainsi, quand la tête passe sous le toit, les petits participants ont leur pied gauche qui est déjà en train de rentrer dans l'habitacle alors que pour les grands participants, le pied est encore posé sur le sol ou en train de le quitter (cf. Figure 74).

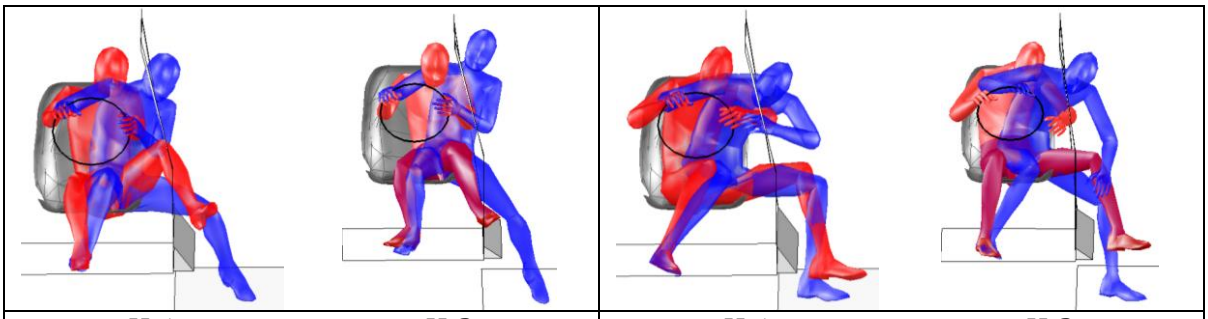


Figure 74 : Posture adoptée par deux participants, une petite femme (2 graphiques de gauche) et un grand homme (2 graphiques de droite) pour les hauteurs d'assise *Hs1* et *Hs3*, quelques frames avant (en bleu) et après (en rouge) le passage de la tête sous le toit.

2.1.2.2. Passage de la jambe droite sous le volant

Pour le passage de la jambe droite sous le volant, deux situations sont observées (cf. la Figure 75 qui présente la position du genou droit quand les participants commencent s'assoir dans le siège) :

1. Pour la quasi-totalité des participants (24/25) le genou droit passe sous le volant une fois que les participants sont déjà assis dans le siège.
2. Seul un participant de grande stature (10_SP), le plus grand, positionne directement son genou à la droite du volant, évitant ainsi le volant dès le début du mouvement avant de s'assoir.

Ainsi pour la quasi-totalité des participants, l'analyse de l'instant *GenD.Vol* montre qu'il intervient dans la dernière phase du mouvement, au bout de 134 %DE, soit une fois qu'ils sont assis dans le siège et qu'ils ont déjà commencé à entrer le pied gauche dans l'habitacle. Le Tableau 43 montre que l'instant *GenD.Vol* et *Tete.Toi* sont d'autant plus proches que l'assise est haute et donc que l'espace entre le volant et le plancher est important.

Dans le cas d'une assise basse, une majorité des participants ont attendu que leur tête soit passée sous le toit et que leur pied gauche soit dans l'habitacle, pour faire passer leur jambe droite sous le volant : seulement pour 14/372 essais, des participants de moyenne et de petite statures passent leur genou sous le volant alors que leur pied gauche est à l'extérieur de l'habitacle. Pour l'assise la plus haute *Hs3* (donc la moins gênante), *GenD.Vol* intervient pour tous les essais des participants de moyenne et de grande statures alors que le pied gauche est encore à l'extérieur de l'habitacle.

Figure 75 : Position du genou droit quand les participants commencent à s'assoir pour tous les essais (vue de dessus) et présentation des 2 situations d'évitement du volant observées.

2.1.2.3. Utilisation du volant

Enfin concernant l'utilisation du volant, on regarde si des différences existent entre les groupes de stature, les hauteurs d'assise et les largeurs de bavolet. A cette fin, deux variables sont calculées :

- Quand c'est possible, l'écart entre l'instant où le conducteur attrape le volant et celui où il commence à s'assoir (*MainV-PelS*) ;
- Le nombre d'essais pour lesquels les participants attrapent le volant avant de commencer à s'assoir dans le siège (*MainVol.Nb*) ;

Le Tableau 44 récapitule les résultats pour les variables étudiées et ce en fonction des groupes de stature et des hauteurs d'assise.

Tableau 44 : Valeurs moyennes et écarts types des variables expliquant l'utilisation du volant. Les variables sont exprimées en fonction des groupes de stature, des hauteurs d'assise. Pour les variables de comptage, la première valeur correspond au nombre d'essais identifiés et la seconde à la valeur relative par rapport au nombre d'essais total (% du nombre d'essais).

Variables	Hs1	Hs2	Hs3	Petit	Moyen	Grand	Tous
MainV-PelS (%DE)	-22±30	-22±27	-15±29	-09±16	-25±25	-25±37	-20±29 ^{S***,G***}
MainVol.Nb	115 (93)	111 (90)	89 (71)	88 (75)	109 (91)	118 (88)	315 (85)

* : p<0.05, ** : p<0.01, *** : p<0.001, S : hauteur siège, T : hauteur toit, G : groupe stature, B : largeur bavolet.

L'analyse de l'instant où le volant commence à être attrapé (*Main.Vol*) montre que son utilisation est relativement disparate suivant les participants (cf. Figure 73 et Tableau 43). Ainsi, on relève que pour 85 % des essais, l'instant *Main.Vol* apparait avant que les participants ne commencent à s'assoir dans le siège (cf. *MainVol.Nb* dans le Tableau 44). Ainsi, *MainVol.Nb* est plus important pour les participants de grande stature et la hauteur d'assise la plus basse. En outre, la largeur de bavolet n'affecte pas l'utilisation du volant.

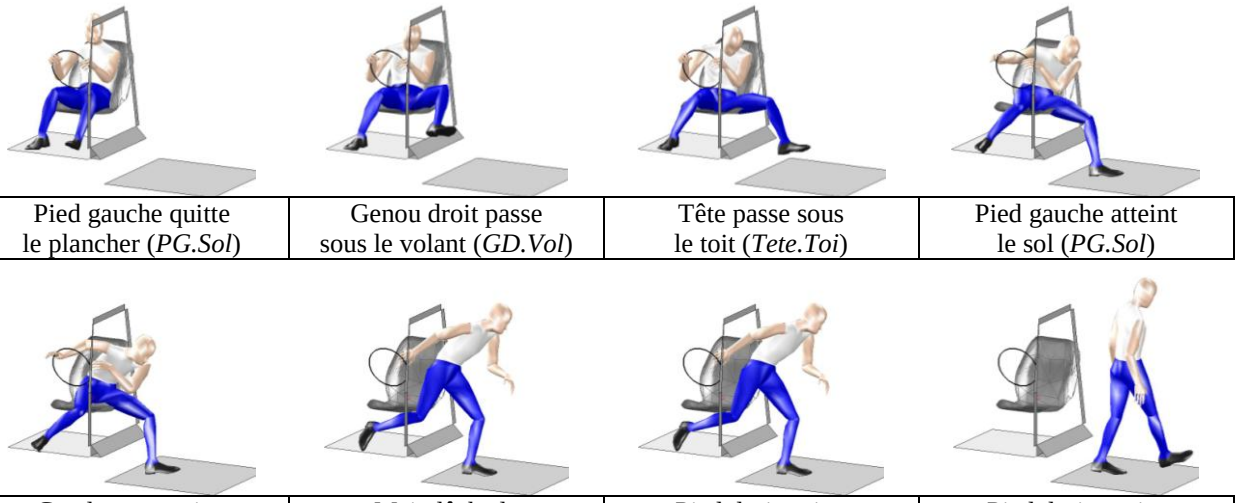
De la variable *MainVol-PelS*, on remarque que plus l'assise est basse et plus les participants sont de grande stature, plus le volant est attrapé tôt dans le mouvement avant de commencer à s'assoir dans le siège, laissant supposer qu'il contribue plus activement au mouvement. On note ainsi un écart de 7

%DE (soit environ ¼ de seconde) entre la valeur moyenne de l'assise la plus haute *Hs3* et les deux autres hauteurs d'assise et un écart plus important de 16 %DE entre les petites statures et les deux autres groupes. Une différence est également observée pour les petites femmes suivant les hauteurs d'assise avec un écart de 20 %DE entre la valeur moyenne des assises *Hs1* et *Hs3*, et une valeur moyenne de +3 %DE (soit après *Pel.Sie*) pour cette dernière.

2.2. Description du mouvement de sortie

2.2.1. Instants clés

On répète la même démarche pour la chronologique de la sortie. L'observation des mouvements, montre que seule la stratégie jambe gauche en premier est utilisée (El Menceur [AIT_08]).



Pied gauche quitte le plancher (*PG.Sol*)	Genou droit passe sous le volant (*GD.Vol*)	Tête passe sous le toit (*Tete.Toi*)	Pied gauche atteint le sol (*PG.Sol*)
Conducteur quitte le siège (*Pel.Sie*)	Main lâche le volant (*Main.Vol*)	Pied droit quitte le plancher (*PD.Pla*)	Pied droit atteint le sol (*PD.Sol*)

Figure 76 : Les 8 instants clés identifiés pour le mouvement de sortie.

L'analyse du mouvement de sortie à partir des interactions entre l'habitacle et le conducteur, permet d'identifier 8 instants clés. Ceux-ci sont illustrés sur la Figure 76. Pour la majorité d'entre eux, la définition est la même que celle pour le mouvement d'entrée :

- **Quand le pied gauche quitte le plancher (*PG.Pla*) :** cet instant initie la première phase du mouvement, la sortie de la jambe gauche à l'extérieur de l'habitacle.
  - ⇨ Cet instant est identifié quand la norme de la vitesse de la cheville gauche devient supérieure à 10 mm/s.
- **Quand le genou droit passe sous le volant (*GenD.Vol*) :**
  - ⇨ Cet instant est identifié quand la coordonnée suivant l'axe y de l'articulation du genou gauche dépasse celle du centre du volant.
- **Quand la tête passe sous le toit (*Tete.Toi*) :**
  - ⇨ Cet instant est identifié quand la coordonnée suivant Y du vertex dépasse celle du milieu de la barre de toit.
- **Quand le pied gauche atteint le sol (*PG.Sol*) :**
  - ⇨ Cet instant est identifié quand la norme de la force sur le sol devient supérieure à 5 N.
- **Quand le conducteur quitte le siège (*Pel.Sie*) :** à cet instant, le conducteur passe d'une posture stable assise à une gestion de l'équilibre sur deux pieds.
  - ⇨ Cet instant est identifié quand la composante verticale de la force appliquée sur le siège est inférieure à 10% du poids du participant.

- **Quand le conducteur lâche le volant (*Main.Vol*) :** Pour la sortie, nous n'avons pas le problème du passage de la cuisse sous le volant.
  ⇨ Cet instant est identifié quand la norme de la force sur le volant est inférieure à 5 N.
- **Quand le pied droit quitte le plancher (*PD.Pla*) :** c'est le dernier contact du conducteur avec l'habitacle. Après cet instant, le conducteur se retrouve en équilibre sur son seul pied gauche.
  ⇨ Cet instant est identifié quand la norme de la force sur le plancher est inférieure à 5N.
- **Quand le pied droit atteint le sol (*PD.Sol*) :** le conducteur termine sa phase d'appui monopodal, pendant laquelle il s'appuie sur sa seule jambe gauche. Jusqu'à cet instant, tous les efforts externes sont connus.
  ⇨ Cet instant est identifié quand le talon arrive à moins de 10 mm du sol.

2.2.2. Chronologie du mouvement

Pour comparer les essais entre eux, les données des essais de la sortie sont également recalées et normées temporellement de 0 à 100% de la durée du mouvement de sortie (%DS). Les essais commencent et se terminent respectivement quand le pied gauche quitte le plancher et que le pied droit arrive sur le sol (cf. Figure 77). En moyenne, la durée des échantillons est de 2.5±0.3 secondes pour tous les essais de l'expérimentation.

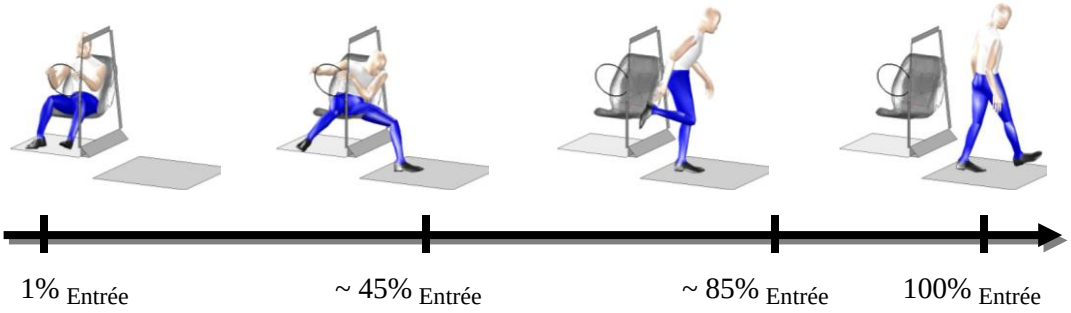


Figure 77 : Echantillonnage des essais pour le mouvement de sortie.

Le Tableau 45 présente les valeurs moyennes et les écarts types d'apparition de ces instants clés pour le mouvement de sortie. La Figure 78 présente un exemple de l'enchaînement des interactions entre les éléments de l'habitacle et une petite femme (gauche) et un grand homme (droite) pour les trois assises.

Tableau 45 : Valeurs moyennes et écarts types des instants pour la chronologie de la sortie en fonction des groupes de stature et des hauteurs d'assise.

Variables	Hs1	Hs2	Hs3	Petit	Moyen	Grand	Tous
dT (s)	267±35	247±27	240±23	246±23	263±33	246±32	251±31 ^{S***,G***,B**}
PG.Sol (%DS)	42±5	43±5	47±4	46±6	44±5	42±4	44±5 ^{S***,G***}
GenD.Vol (%DS)	5±11	9±8	16±8	11±6	13±10	7±11	10±9 ^{S***,G***}
Tete.Toi (%DS)	37±6	35±6	34±5	33±5	37±5	37±6	36±6 ^{S***,G***}
Pel.Sie (%DS)	53±5	54±4	59±4	57±6	55±4	54±4	55±5 ^{S***,G***}
Main.Vol (%DS)	67±7	64±8	64±10	61±11	67±8	66±5	65±9 ^{S***,G***}
PD.Pla (%DS)	76±5	75±5	73±5	74±4	73±7	76±3	74±5 ^{S***,G***}

* : p<0.05, ** : p<0.01, *** : p<0.001, S : hauteur siège, T : hauteur toit, G : groupe stature, B : largeur bavolet.

Le relevé des données relatives à la durée des essais pour sortir de l'habitacle essais (*dT* dans le Tableau 45), montre que plus l'assise est basse et la largeur de bavolet importante plus le mouvement va être long (écart de 0.2 s entre *Lb1* et *Lb2*).

La chronologie du mouvement permet d'identifier 3 phases successives :

- **La sortie de la jambe gauche**. le conducteur est assis dans le siège et son poids est réparti entre le siège, le plancher et le volant. Il commence par sortir sa jambe gauche en évitant le bavolet, pivote son corps face à l'embrasure et se décale sur le renfort du siège.
  ⇨ Pendant cette phase, le conducteur passe la jambe droite sous le volant (en moyenne au bout de 10 %DS) et la tête sous le toit (en moyenne 36 %DS). Il peut être amené à utiliser le volant pour se décaler et pivoter dans le siège. Le pied gauche atteint le sol au bout de 44±5 %DS, soit un peu moins de la moitié de la durée des essais normés.

- **la phase d'appui bipodal**, qui débute quand le pied gauche atteint le sol et qui se termine quand le pied droit quitte le plancher. Une fois le pied gauche sur le sol, le conducteur s'extrait du siège et transfère son poids de l'intérieur vers l'extérieur de l'habitacle. Pendant cette période, le volant peut également être utilisé (cf. Figure 78).
  ⇨ Les participants quittent le siège assez rapidement après que le pied gauche ait atteint le sol ; en moyenne, au bout de 55±5 %DS. Plus l'assise est haute, plus les participants mettent du temps à quitter le siège. De plus, l'instant pendant lequel, la distance entre la jambe gauche et le bavolet est la plus faible intervient au bout de 47±6 %DS, c'est-à-dire juste avant que les participants commencent à quitter le siège, laissant supposer qu'ils peuvent prendre appui dessus pour s'extraire.

- **la phase d'appui monopodal**, pendant laquelle le conducteur sort sa jambe droite. Elle commence quand le pied droit quitte le plancher et se termine quand il atteint le sol.
  ⇨ Le pied droit quitte en moyenne le plancher au bout de 74±5 %DS. Ensuite, il est en équilibre sur son seul pied gauche, car il a déjà lâché le volant (en moyenne 65±9 %DS).

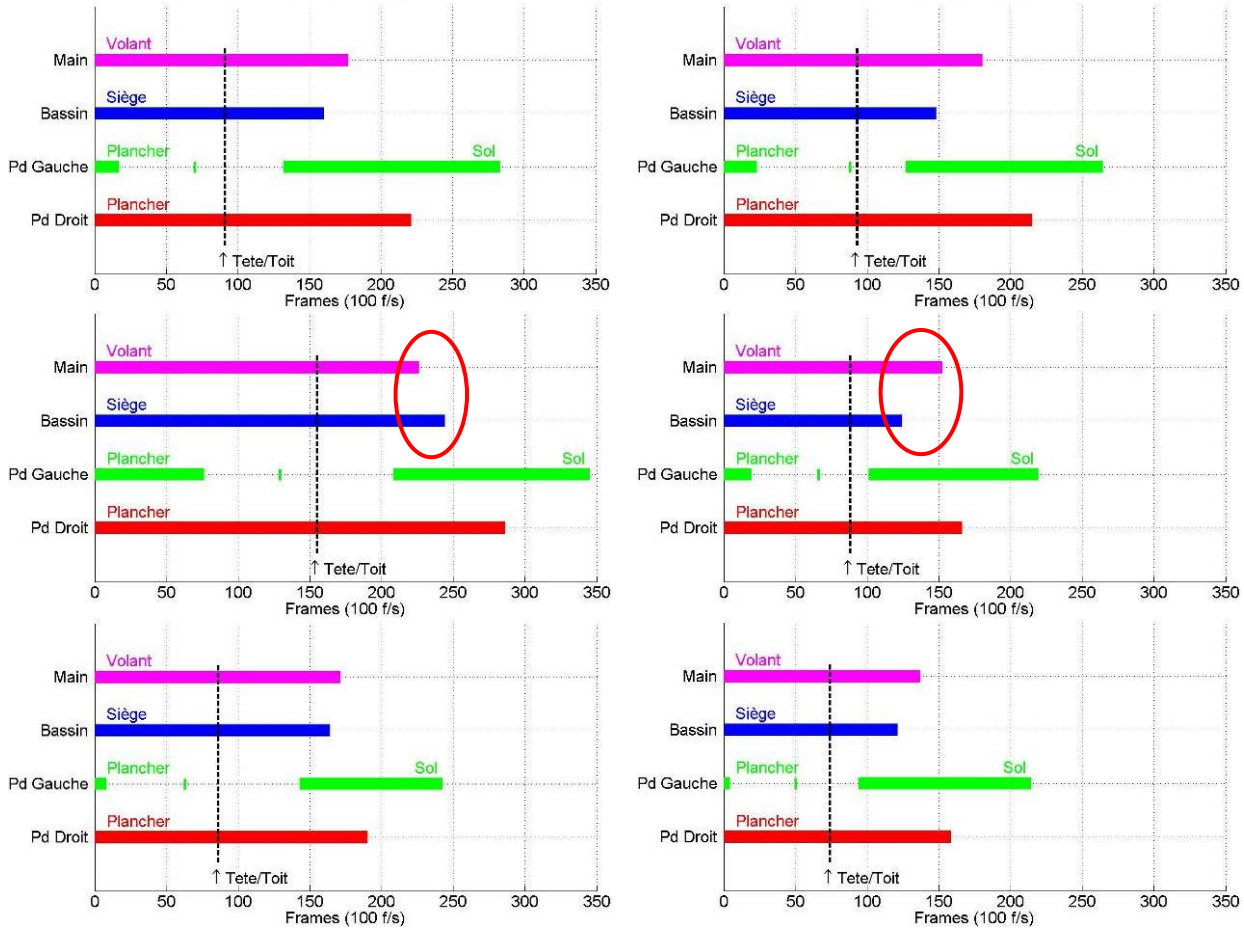


Figure 78 : Enchainement des interactions lors de la sortie entre l'habitacle et deux participants, une petite femme (1ère colonne) et un grand homme (2ème colonne) en fonction des 3 hauteurs d'assise. 1ère ligne pour l'assise *Hs1*, 2ème ligne pour *Hs2*, et 3ème ligne pour *Hs3*.

Comme pour l'entrée, nous décidons d'approfondir notre compréhension de l'interaction des participants avec le toit et le volant.

2.2.2.1. Passage de la tête sous le toit

De la Figure 79 et la Figure 80, nous pouvons observer que le passage de la tête se fait très tôt dans le mouvement et ce bien avant que les participants ne quittent le siège. Déjà quand le pied gauche atteint le sol, la grande majorité des participants a la tête à l'extérieur de l'habitacle. Les seuls qui n'ont pas encore passé la tête à cet instant sont des participants de grande stature et quelques participants de stature moyenne sur les plus basses hauteurs d'assise *Hs1* et *Hs2*.

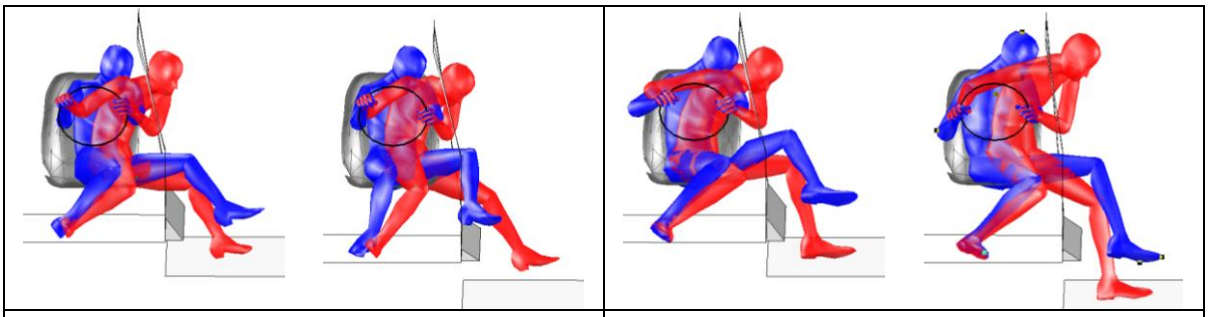


Figure 79 : Posture adoptée par deux participants, une petite femme (2 graphiques à gauche) et un grand homme (2 graphiques à droite) pour les hauteurs d'assise *Hs1* et *Hs3*, quelques instants avant (en bleu) et après (en rouge) le passage de la tête sous le toit.

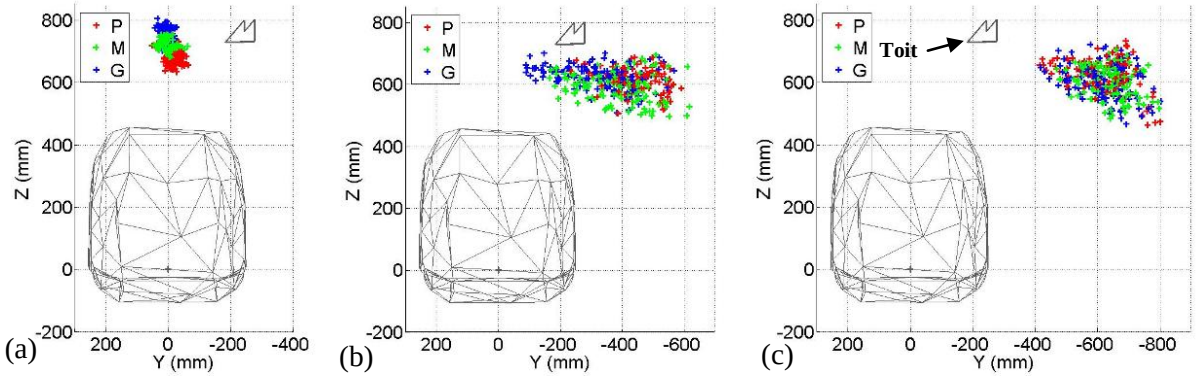


Figure 80 : Position de la tête (vertex) en posture de conduite (a), quand le pied gauche atteint le sol (b) et quand le participant quitte le siège (c) pour tous les essais de l'expérimentation (vue de face). Rouge, vert et bleu pour les participants de petite, moyenne et grande statures.

2.2.2.2. Passage de la jambe droite sous le volant

L'examen de la position du genou droit, montre que le passage du genou se fait dès le début du mouvement de sortie, systématiquement avant que le pied gauche atteigne le sol *PG.Sol* (Figure 81-c).

Dans le détail, on remarque que quand le pied gauche quitte le plancher, le genou droit est déjà passé de l'autre côté du volant pour 12 % des essais et cela concerne principalement les participants de moyenne et de grande stature (Figure 81-a) et uniquement l'assise la plus basse assise *Hs1* qui a l'espace entre le plancher et le volant le plus restreint, donc pour laquelle la gêne du volant est la plus importante. Quand le pied gauche est au-dessus du bavolet (Figure 81-b), le genou est passé à gauche du volant pour plus de 90% des essais. Les participants n'ayant pas encore passé leur genou sont en grande majorité des participants de moyenne stature pour des configurations avec une hauteur d'assise *Hs3* avec le plus grand espace volant/plancher, donc avec la gêne du volant la plus faible

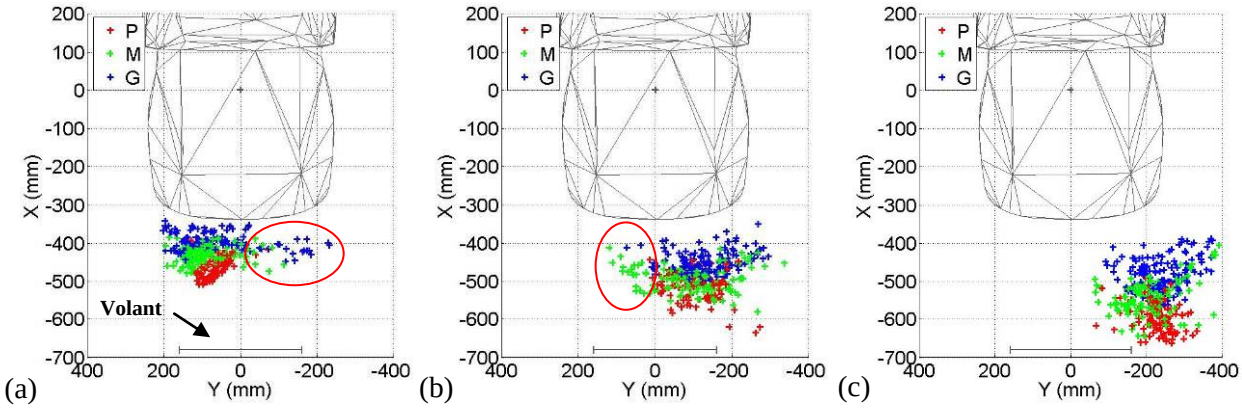


Figure 81 : Position du genou droit quand le pied gauche quitte le plancher(a), passe au-dessus du bavolet(b) et atteint le sol (c) et ce pour tous les essais de l'expérimentation (vue de dessus). Rouge, vert, bleu pour respectivement les participants de petite, moyenne et grande statures.

2.2.2.3. Utilisation du volant

Concernant l'utilisation du volant, on s'intéresse à l'instant où les participants lâchent le volant (*Main.Vol*), et on le compare avec celui où les participants quittent le siège (*MainV-PelS*). On relève également le nombre d'essais pour lesquels le volant est lâché avant que les participants quittent le siège (*MainVol.Nb*). L'idée est de savoir si le volant a été utilisé pour faciliter l'extraction du siège.

Le Tableau 46 récapitule les résultats pour les variables étudiées et ce en fonction des groupes de stature et des hauteurs d'assise.

Tableau 46 : Valeurs moyennes et écarts types des variables expliquant l'utilisation du volant exprimées en fonction des groupes de stature, des hauteurs d'assise. Pour les variables de comptage, la première valeur correspond au nombre d'essais identifiés et la seconde à la valeur relative par rapport au nombre d'essais total (% du nombre d'essais).

Variables	Hs1	Hs2	Hs3	Petit	Moyen	Grand	Tous
MainV-PelS (%DS)	13±07	10±09	05±11	04±11	12±09	12±06	09±10 ^{S***,G***}
MainVol.Nb	3 (2)	16 (13)	38 (30)	44 (37)	11 (9)	2 (1)	57 (15)

* : p<0.05, ** : p<0.01, *** : p<0.001, S : hauteur siège, T : hauteur toit, G : groupe stature, B : largeur bavolet.

Comme pour le mouvement d'entrée, l'utilisation du volant apparait disparate. Par exemple sur la Figure 78 pour la hauteur d'assise *Hs2* (2ème ligne), le participant de petite stature lâche le volant alors qu'il n'a pas encore quitté le siège alors que celui de grande stature le lâche bien après avoir quitté le siège un peu avant que le pied droit quitte le plancher.

L'analyse de *MainVol.Nb* montre que le volant est lâché avant de quitter le siège pour une minorité d'essais, seulement 15%. Dans ce cas, le volant n'a pas été utilisé pour faciliter l'extraction du siège. Ces 15% d'essais concernent principalement les petites femmes et l'assise la plus haute *Hs3*. Notons également, que la modification de la largeur de bavolet n'affecte pas l'utilisation du volant.

En outre, au regard de l'instant où le volant est lâché, on remarque que plus l'assise est haute et plus les participants sont de petite stature, plus le volant est lâché tôt dans le mouvement (*Vol.Main* dans le Tableau 45). Si on compare cet instant et celui où les participants quittent le siège (*MainV-PelS*), on constate que plus l'assise est haute plus les participants lâchent le volant proche de l'instant où ils quittent le siège. De plus, les participants de petite stature se différencient des deux autres groupes de stature en lâchant le volant plus proche de l'instant où ils quittent le siège. Pour l'assise la plus haute, les participants de petite stature lâchent le volant alors qu'ils n'ont pas encore quitté le siège.

3. Interactions du conducteur avec l'habitacle lors de l'entrée dans l'habitacle

Sur la base des observations sur la chronologie du mouvement et des hypothèses présentées en introduction, nous décidons d'approfondir la compréhension des interactions entre les participants et l'habitacle sur la cinématique et la dynamique du mouvement et de nous intéresser en particulier :

- Au passage de la tête sous le toit pour comprendre les effets de la modification de la hauteur de toit sur la cinématique du mouvement ;
- A la gêne liée à la largeur de bavolet due au risque de la collision entre le mollet et le bavolet;
- Au passage de la jambe d'un côté à l'autre du volant ;
- Et au rôle du volant sur le volant à partir des mesures d'efforts.

3.1. Passage de la tête sous le toit

Nous commençons par étudier l'effet de la variation de la hauteur de toit sur la posture des participants pour comprendre pourquoi les participants de petite stature n'ont pas identifié une hauteur de toit plus basse que les participants des autres groupes de stature et pourquoi la hauteur entre le siège et toit reste presque la même quelle que soit la hauteur d'assise. Rappelons que lorsque la tête passe sous le toit, les participants sont déjà assis dans le siège.

Pour cela, on définit des variables permettant de caractériser la posture des participants et d'estimer la proximité des participants avec les éléments de l'habitacle quand la tête passe sous le toit (*Tete.Toi*) :

- La position du bassin par rapport au siège (*X_bas*, *Y_bas* et *Z_bas*), définie comme le point milieu entre les centres articulaires des hanches et exprimée dans le repère global ;
- L'orientation du bassin (*Θ_bas/sie*) par rapport au siège, qui correspond à l'angle entre l'axe Y du repère global et le plan vertical contenant les centres articulaires de la hanche droite et de la hanche gauche (cf. Figure 82-a).
- L'orientation des épaules (*Θ_epa/sie*) par rapport au siège, définie comme l'angle entre l'axe Y du repère global et le plan vertical contenant le vecteur liant les marqueurs RACR et LACR posés sur les acromions droit et gauche (cf. Figure 82-b) ;
- L'angle de flexion de la hanche gauche (*Θ_hg/Z*), calculé entre l'axe vertical Z du repère global et le vecteur liant le centre articulaire de la hanche gauche et du genou gauche ;
- L'angle de flexion du dos (*Θ_dos/Z*), défini entre l'axe vertical Z du repère global et le vecteur liant les centres articulaires GBB (équivalent de l'articulation entre la 8ème et 9ème thoracique) et GHB (entre la 4ème et 5ème thoracique) du modèle Ramsis (Figure 83-a) ;
- L'angle de flexion du cou (*Θ_cou/Z*), défini entre l'axe vertical Z du repère global et le vecteur liant le marqueur C7T1 sur la 7ème cervicale et le vertex (Figure 83-b).
- La distance du buste au volant (*D_bus/vol*), définie comme la distance entre le centre du volant et le marqueur USTR placé sur l'incisure jugulaire du sternum ;
- Les plus faibles distances entre la tête et le toit (*D_tet/toi*), et la tête et le montant (*D_tet/mtt*). Elles correspondent à la distance la plus faible entre les nœuds du maillage de la tête du modèle Ramsis et la droite définie par les marqueurs EMB3 et EMB4 pour le toit et EMB4 et EMB5 pour le montant (cf. Chapitre 3 §7.2.2.).

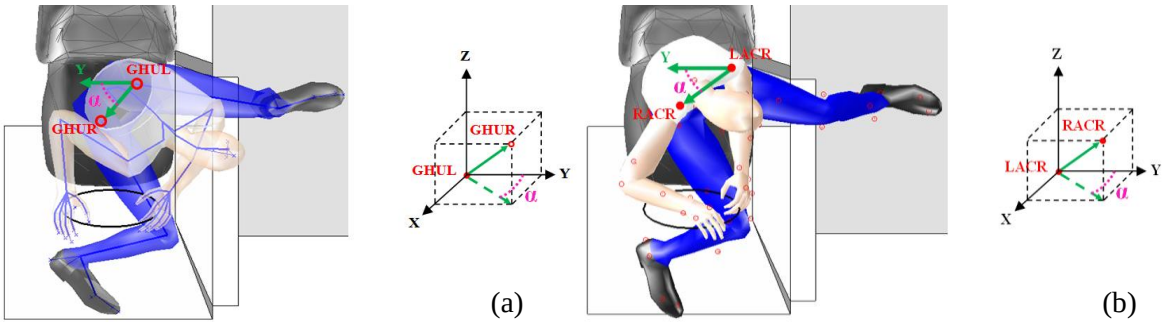


Figure 82 : Définition de l'angle de pivotement du bassin (a) et des épaules (b) par rapport au siège.

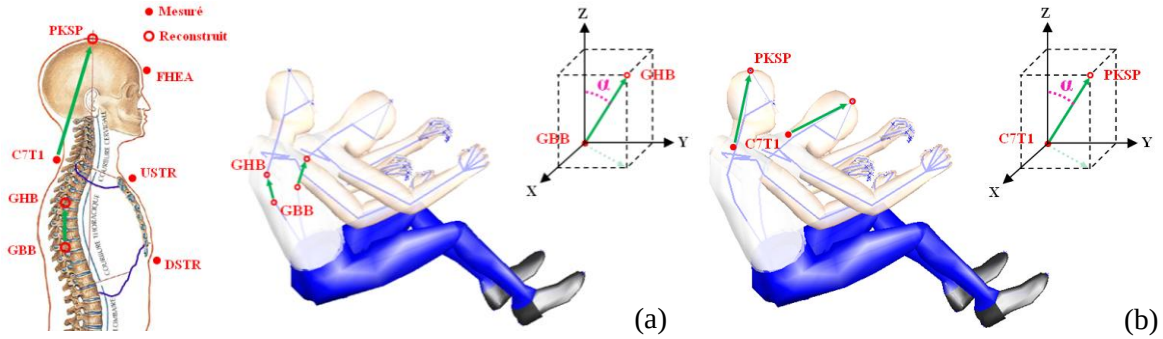


Figure 83 : Définition des angles définissant la flexion du dos (a) et du cou (b) par rapport à l'axe vertical Z du repère global.

Le Tableau 47 présente les valeurs moyennes et les écarts types de ces variables quand la tête des participants passe sous le toit pour les seuls essais s'intéressant à l'identification de la hauteur de toit.

Tableau 47 : Valeurs moyennes et écarts types des variables permettant de définir la posture des participants et leur proximité vis-à-vis de l'habitacle quand leur tête passe sous le toit (*Tete.Toi*). Les valeurs tiennent compte seulement des essais s'intéressant à la hauteur de toit (*Ht1*, *Ht2* et *HtM*) et sont fonction des groupes de stature, des hauteurs d'assise et des hauteurs de toit.

Variables	Hs1	Hs2	Hs3	Petit	Moyen	Grand	Ht1	HtM	Ht2	Tous
X_bas (mm)	-24±55	-18±59	-28±66	-88±28	-18±36	29±40	-23±60	-24±61	-24±60	-23±60 ^{G***}
Y_bas (mm)	-22±27	-25±26	-76±43	-66±35	-42±40	-19±24	-44±43	-39±41	-41±41	-41±41 ^{S***,G***}
Z_bas (mm)	-5±18	-5±16	-1±18	2±15	0±16	-12±17	-2±18	-4±18	-5±15	-4±17 ^{G***}
Θ_bas/sie (°)	31±11	26±09	18±08	23±10	27±12	26±11	25±11	25±11	25±11	25±11 ^{S***,G*}
Θ_epa/sie (°)	22±7	19±6	16±6	13±5	19±8	22±4	18±7	20±7	19±7	19±7 ^{S***,G***}
Θ_dos/Z (°)	32±09	29±10	28±09	22±10	32±07	34±07	30±10	30±09	29±09	30±09 ^{S**,G***}
Θ_cou/Z (°)	55±12	57±11	58±13	45±10	59±10	64±09	52±11	56±12	62±11	56±12 ^{S*,T***,G***}
Θ_hg/Z	83±10	88±11	101±13	89±19	92±11	90±10	92±13	90±13	90±15	90±13 ^{S***}
D_bus/vol (mm)	337±51	331±51	323±40	291±33	326±39	368±32	327±48	330±47	333±47	330±47 ^{S***}
D_tet/toi (mm)	64±28	62±25	49±21	50±25	59±29	64±22	64±28	60±23	50±24	58±26 ^{S***,G**,T***}
D_tet/mtt (mm)	141±36	151±30	148±28	142±30	140±35	157±27	153±33	149±30	138±30	147±31 ^{G**,T**}

* : p<0.05, ** : p<0.01, *** : p<0.001, S : hauteur siège, T : hauteur toit, G : groupe de stature.

3.1.1. Analyse de la posture quand la tête passe sous le toit

Il apparait tout d'abord que la position du bassin quand la tête des participants passe sous le toit, est affectée par la stature des participants et la hauteur d'assise. La Figure 84 présente la position du bassin quand la tête passe sous le toit suivant les trois groupes de stature (figures de gauche) et les trois hauteurs d'assise (figures de droite). On relève ainsi que :

- Suivant l'axe X, le bassin est d'autant plus avancé que les participants sont de petite stature. Un écart de 120 mm est constaté entre les valeurs des petites femmes et des grands hommes ;
- Suivant l'axe Y, plus l'assise est haute et plus les participants sont petits, plus ils ont tendance à s'assoir sur le renfort du siège. De plus, pour les petites femmes, plus l'assise est haute plus elles vont avoir tendance à s'assoir vers l'extérieur du siège : un écart de 77 mm est observé entre la position de leur bassin pour les hauteurs d'assise *Hs1* et *Hs3*. Ceci n'est pas surprenant, étant donné que la hauteur du siège est proche de la hauteur de leur bassin, elles ne peuvent s'assoir que sur le renfort du siège.
- La position verticale du bassin (*Z_bas*) montre un effet de la stature, mais pas de la hauteur d'assise (p>0.05). Toutefois, un écart de seulement 15 mm entre les valeurs moyennes est observé entre les participants de petite et ceux de grande sature. Le fait de s'assoir sur le renfort du siège ne surélève donc pas le bassin.

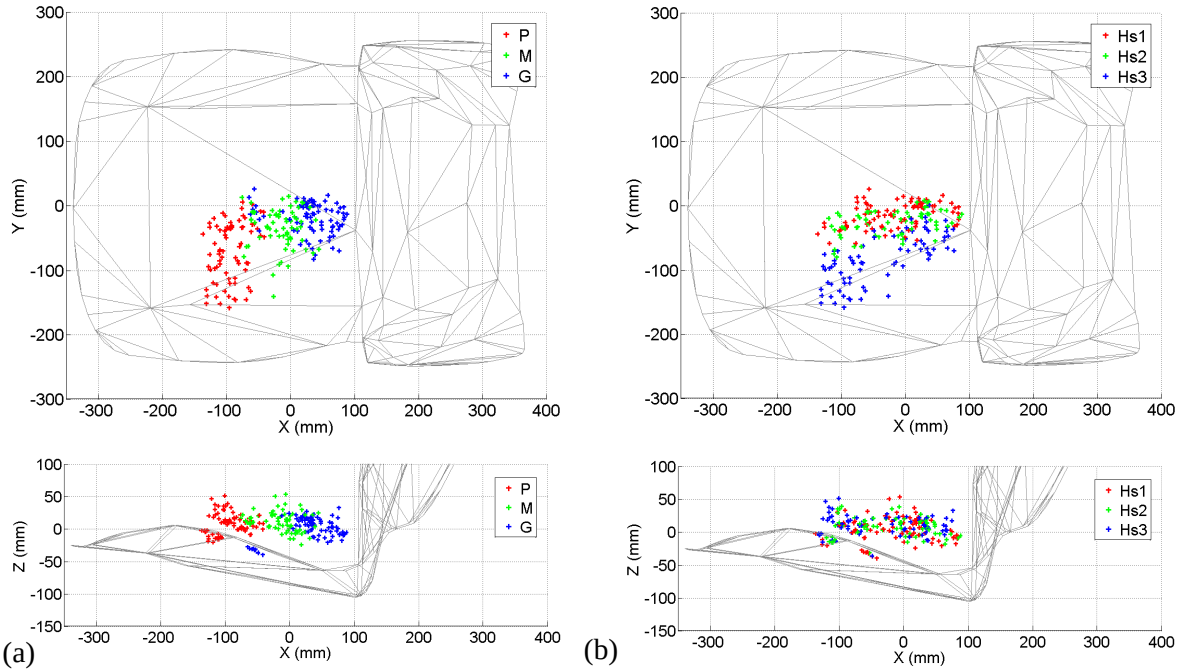


Figure 84 : Position du bassin quand la tête passe sous le toit en vue de dessus et de côté pour les essais s'intéressant à la hauteur de toit. Les figures de gauche (a) en fonction des groupes de stature (rouge : Petits, vert : Moyens et bleu : Grands) et celles de droite (b) en fonction des hauteurs d'assise (rouge : *Hs1*, vert : *Hs2* et bleu : *Hs3*).

L'analyse de l'angle de pivotement du bassin (*Θ_bas/sie*) et des épaules (*Θ_epa/sie*) montre que les participants ont d'autant plus pivoté le haut du corps par rapport au siège qu'ils sont grands et que l'assise est basse (cf. exemple sur la Figure 85). En particulier, les participants de petite stature ont en moyenne les épaules pivotées de 13±5° pour la hauteur d'assise la plus haute *Hs3*, alors que pour les grands cet angle est de 22±4° pour l'assise la plus basse *Hs1*. Ainsi, plus les participants s'assoient vers le milieu du siège, plus ils vont se tourner vers l'embrasure.

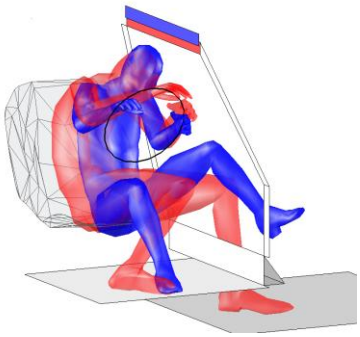


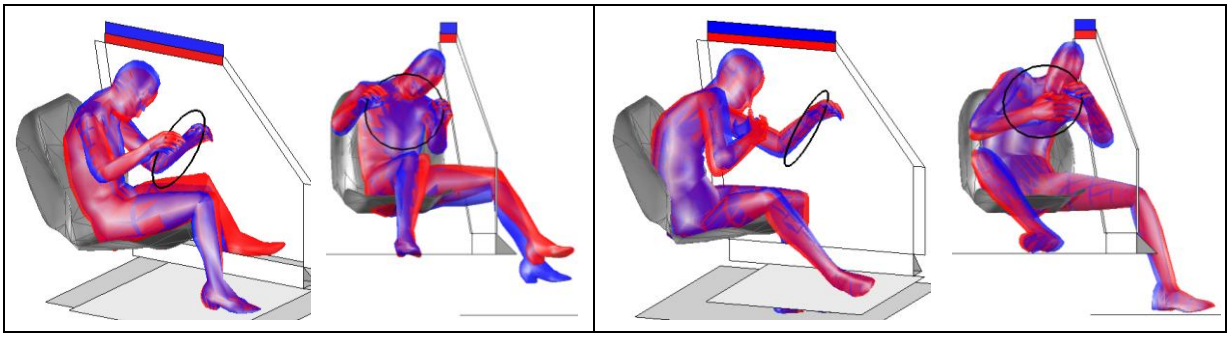
Figure 85 : Posture deux participants, un de petite stature (en bleu) et un de grande stature (en rouge) quand leur tête passe sous le toit pour une hauteur de toit *Ht2* et une assise *Hs2*.

L'analyse de la chronologie du mouvement a montré que le passage sous le toit des petites femmes se faisait en même temps que l'entrée du pied gauche à l'intérieur de l'habitacle. Toutefois, il apparait du Tableau 47, que la flexion de la hanche gauche (*Θ_hg/Z*) est en moyenne aussi importante pour tous les groupes de stature ($p>0.05$).

De plus, comme nous l'avions supposé, les participants de petite stature ont moins fléchi le dos et le cou que ceux de grande stature et ce quelle que soit la hauteur d'assise (Tableau 47). Ainsi, un écart de 10° sépare la flexion du dos des petites femmes de celle des grands hommes et de 20° pour la flexion

du cou (cf. exemple Figure 87). De plus, l'ANOVA montre un effet de la hauteur d'assise sur ces deux variables. Toutefois, l'écart est seulement de 4° entre les valeurs moyennes de *Hs1* et *Hs3* pour la flexion du dos et du cou, suggérant qu'une assise basse n'affecte pas la flexion du haut du corps.

Enfin, il est intéressant de noter que la hauteur de toit a uniquement un effet significatif sur la flexion du cou (Tableau 47). Ceci peut également être observé sur la Figure 86 qui présente les postures adoptées par un participant de petite stature et un de grande stature pour les hauteurs de toit *Ht1* (en bleu) et *Ht2* (en rouge). On observe ainsi que la posture adoptée par une même personne est très similaire pour les deux hauteurs de toit, et ce au regard de l'utilisation du volant, du pivotement dans le siège, et de la posture d'évitement du toit. La première hauteur de toit gênante *Ht1* et la dernière acceptable *Ht2* diffèrent ainsi uniquement d'un angle de 10±9° sur la flexion du cou.



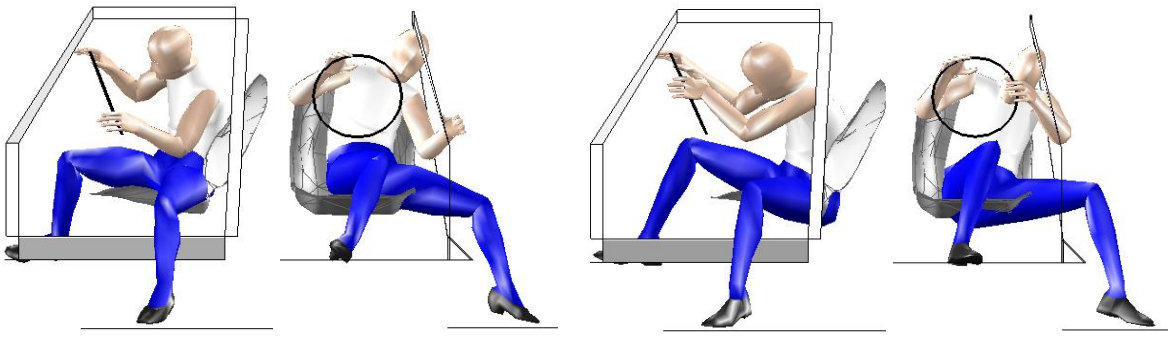
Participant de petite stature | Participant de grande stature

Figure 86 : Posture de deux participants, un de petite (2 graphiques de gauche) et un de grande stature (2 graphiques de droite) quand la tête passe sous le toit pour les deux hauteurs de toit identifiées par les participants *Ht1* (en bleu) et *Ht2* (en rouge).

3.1.2. Proximité avec les éléments de l'habitacle quand la tête passe sous le toit

On s'intéresse ensuite à la proximité des participants avec les éléments de l'habitacle (toit, montant et volant). Pour cela, on observe la distance du buste au volant, la plus faible distance entre la tête et le toit et celle entre la tête et le montant.

L'analyse de la distance entre le buste et le volant quand la tête passe sous le toit, montre que les participants de petite stature bénéficient de moins d'espace pour fléchir leur tronc. En effet, ils sont en moyenne 77 mm plus proches du centre du volant que les participants de grande stature (cf. Figure 87). En outre, l'ANOVA montre l'effet de la stature ($p<0.001$), mais n'identifie pas d'effet de la hauteur d'assise. Ils n'ont donc pas plus fléchi le dos en fonction des différentes assises.



Petite femme | Grand homme

Figure 87 : Posture de deux participants, un de petite (2 graphiques de gauche) et de grande stature (2 de droite) quand leur tête passe sous le toit lors de l'entrée – cas de l'assise *Hs2*.

L'analyse de la distance entre la tête et le toit et le montant montre que globalement les participants ont en moyenne, leur tête à 58±26 mm du toit et 141±31 mm du montant. Les participants sont d'autant plus proches du toit et du montant qu'ils sont de petite stature, mais l'écart est assez faible entre les groupes de stature. Un écart moyen de 15 mm est observé entre les valeurs des groupes de petite et de grande stature. Ceci confirme que les participants de grande taille ont plus fléchi leur haut du corps que les sujets de petite taille. Enfin, plus le toit est bas, plus la tête est proche du toit. Un écart de seulement 15 mm est observé entre les valeurs moyennes des hauteurs *Ht1* et *Ht2*.

3.2. Interaction avec le bavolet

L'objectif est d'observer comment les participants modifient leur mouvement suivant les largeurs de bavolet et comment ils interagissent avec le bavolet suivant leur stature et la hauteur d'assise. Pour cela, les variables suivantes sont calculées pour définir la position des participants par rapport à l'habitacle quand la distance entre la jambe gauche et le bavolet est la plus faible (*JG.Bav*) :

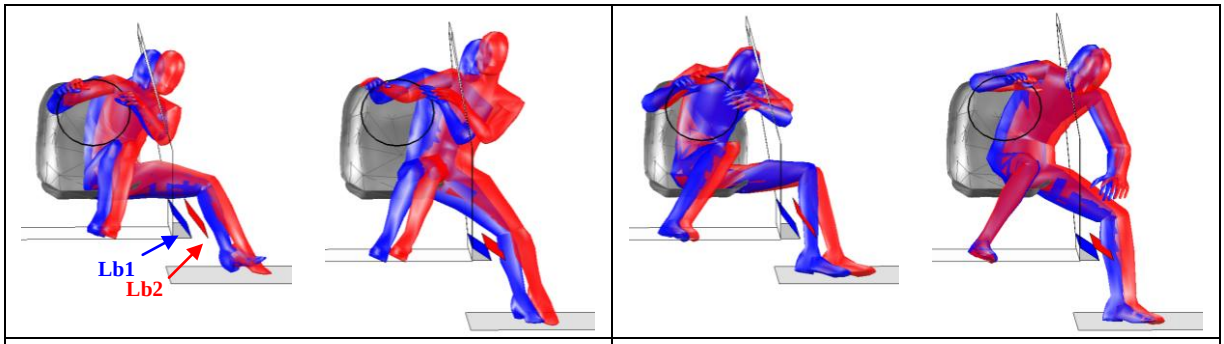
- La distance la plus faible entre la jambe gauche et le bavolet (*D_jg/bav*). On calcule la distance la plus courte entre la droite joignant le genou gauche et la cheville gauche et la droite joignant les marqueurs EMB1 et EMB6 caractérisant la feuillure du bavolet ;
- La position du bassin (*Y_bas*) définie à partir du point milieu entre les deux centres articulaires des hanches et exprimée dans le repère global ;
- La position de la cheville gauche (*Y_chg*) suivant l'axe Y du repère globale. Elle correspond au centre articulaire de la cheville gauche GSPL du modèle Ramsis.

Le Tableau 48 présente les valeurs moyennes et les écarts types de ces variables quand la distance entre la jambe gauche et le bavolet est la plus faible. La Figure 88 présente la posture adoptée par deux participants, une petite femme et un grand homme quand la distance entre la jambe gauche et le bavolet est la plus faible et fonction des largeurs de bavolet (*Lb1* en bleu et *Lb2* en rouge).

Tableau 48 : Valeurs moyennes et écarts types des variables définissant la posture des participants et leur proximité vis-à-vis de l'habitacle quand la distance entre la jambe gauche et le bavolet est la plus faible. Les valeurs sont moyennées pour tous les participants et pour les essais de l'expérimentation s'intéressant à la largeur de bavolet (*Lb1*, *Lb2* et *LbM*).

Variables	Hs1	Hs2	Hs3	Petit	Moyen	Grand	Lb1	LbM	Lb2	Tous
D_jg/bav (mm)	34±20	42±21	49±18	37±23	51±19	37±16	51±21	40±18	34±19	42±21 ^{S***,B***,G***}
Y_bas (mm)	70±53	83±43	149±56	139±60	99±51	69±53	79±59	98±55	126±62	101±62 ^{S***,B***,G***}
Y_chg (mm)	634±41	632±43	624±39	629±43	641±40	621±39	596±29	627±30	666±30	630±41 ^{B***,G***}

* : p<0.05, ** : p<0.01, *** : p<0.001, S : hauteur siège, T : hauteur toit, G : groupe stature, B : largeur bavolet



Hs1 Hs3 — Petite femme

Hs2 Hs3 — Grand homme

Figure 88 : Posture de deux participants, une petite femme (figures de gauche) et un grand homme (figures de droite) quand la jambe gauche est au plus proche du bavolet et ce pour la hauteur d'assise *Hs1* et *Hs3* (vue de face). Bleu et rouge pour les largeurs de bavolet *Lb1* et *Lb2*.

L'analyse de la distance minimale entre la jambe et le bavolet montre qu'en moyenne quand la jambe est la plus proche du bavolet, elle se trouve à 42±21 mm. De l'ANOVA, un effet de la hauteur d'assise, des groupes de stature et de la largeur de bavolet sur la distance entre la jambe et le bavolet est identifié. Toutefois l'analyse des valeurs moyennes montre que les écarts entre les différentes largeurs de bavolet, hauteurs d'assise et groupes de stature n'excèdent pas 17 mm (cf. *D_jg/bav* dans le Tableau 48). Ainsi par exemple, la distance de la jambe au bavolet passe de 51±21 mm pour la largeur *Lb1* à 34±19 mm pour la largeur *Lb2*, laissant supposer que les participants passent d'une posture avec le mollet gauche proche du bavolet à une autre où le mollet appuie dessus.

Dans la continuité, l'analyse de la position de la cheville suivant l'axe Y (*Y_chg*) montre que l'appui du pied gauche, suit la largeur de bavolet. Un écart de 70 mm est ainsi observé entre les valeurs moyennes de la largeur *Lb1* et *Lb2*. La même observation est faite pour la position du bassin (*Y_bas*) et de la hanche gauche, mais l'écart entre *Lb1* et *Lb2* n'est que de 47 mm.

De plus de la Figure 88, nous pouvons voir que les postures sont très proches entre les largeurs *Lb1* et *Lb2*. La variation de la largeur du bavolet implique donc une translation latérale du corps.

3.3. Passage de la jambe sous le volant

Pour étudier l'interaction avec le volant, trois variables sont utilisées pour caractériser le mouvement de la jambe droite passe sous le volant (*GenD.Vol*) :

- l'angle de pivot du genou droit par rapport au plan vertical quand le genou passe sous le volant (*Θ_gend*). Il est calculé par rapport à l'axe de pivot défini par le centre de la hanche droite et celui de la cheville droite (cf. définition Figure 89-a) ;
- la position de la cheville droite (*Y_ched*) quand le pied droit atteint le plancher (*PD.Pla)* suivant l'axe Y du repère global ;
- la distance entre les positions de la cheville droite quand les participants commencent à s'assoir et quand ils sont dans leur posture de conduite finale (*D_pied*).

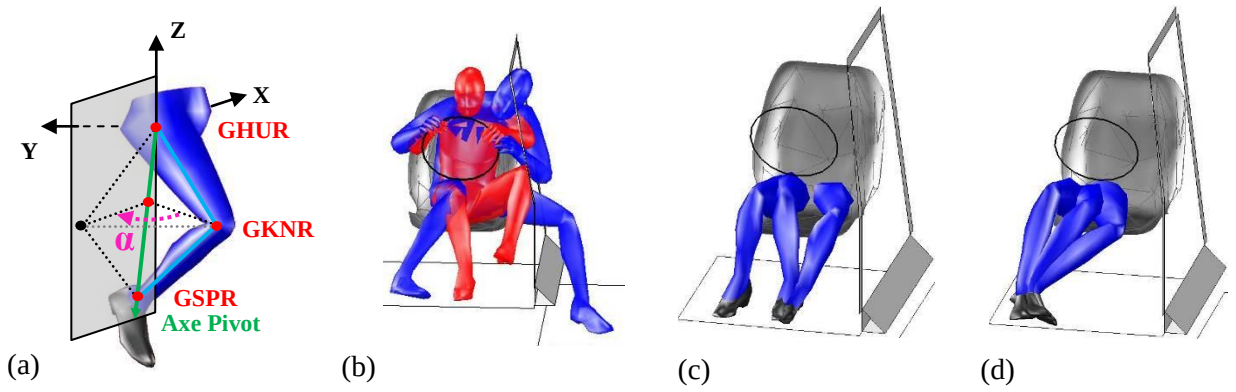


Figure 89 : Passage de la jambe droite sous le volant. a- Définition de l'angle de pivot du genou droit (*Θ_gend*). b,c et d - Présentation des 2 situations observées : pivotement et déplacement de la jambe.

Le Tableau 49 présente les valeurs moyennes et les écarts types pour ces variables en fonction des groupes de stature et des hauteurs d'assise.

Tableau 49 : Moyennes et écarts types des variables définissant la posture des participants quand le genou droit passe sous le volant. Les valeurs sont moyennées pour tous les participants et pour les essais de l'expérimentation s'intéressant à la largeur de bavolet (*Lb1, Lb2* et *LbM*).

Variables	Hs1	Hs2	Hs3	Petit	Moyen	Grand	Tous
Θ_gend (°)	-20±15	-15±12	-08±12	-03±07	-09±12	-18±15	-10±13 ^{S**,G***}
Y_ched (mm)	129±93	138±99	129±99	212±63	113±81	079±84	132±98 ^{G***}
D_pied (mm)	135±81	105±71	093±57	121±55	127±81	085±62	111±62 ^{S***,G***}

* : p<0.05, ** : p<0.01, *** : p<0.001, S : hauteur siège, T : hauteur toit, G : groupe stature, B : largeur bavolet.

L'analyse de ces variables et l'observation de la posture des participants quand leur jambe droite passe sous le volant, permet d'identifier deux situations liées à la stature des volontaires. La première situation, dite de « **décalage** », est observée pour les petites femmes (Figure 89-b en rouge et Figure 89-c). Le passage sous le volant se fait en deux temps :

- Les participants amènent leur pied droit sur le plancher entre le volant et le bavolet. Plus les participants sont petits, plus leur pied est proche du bavolet. Notons que les participants n'ont pas amené leur pied plus ou moins loin suivant la hauteur d'assise et la largeur de bavolet.
- Une fois assis et le pied gauche dans l'habitacle, les participants décalent leur jambe droite de l'autre côté du volant (*D_pied*), et ce sans pivoter le genou droit L'ANOVA montre que l'angle de pivotement du genou droit (Θ*_gend*) est d'autant plus important que les participants sont de grande stature et que l'assise est basse. Les petites femmes n'ont donc pas besoin ou peu de pivoter la hanche droite pour passer la jambe sous le volant. De plus l'espace entre le volant et le plancher augmentant avec la hauteur d'assise, une hauteur d'assise haute rend le passage d'un côté à l'autre du volant de la jambe droite plus aisé.

La deuxième situation observée, dite de « **pivotement** », est propre aux participants de grande stature qui sont plus gênés lors du passage de la jambe sous le volant (cf. Figure 89-b en bleu et Figure 89-d) :

- Au contraire de la première situation, les participants amènent leur pied droit nettement plus loin dans l'habitacle et pivotent plus leur genou droit. Ainsi, quand le pied droit atteint le plancher, l'angle de pivot est en moyenne de -51°.
- Une fois assis et pendant l'entrée du pied gauche dans l'habitacle, les participants pivotent uniquement leur genou droit de l'autre côté du volant. Dans ce cas de figure, seul le genou droit pivote ; le pied droit bouge relativement peu de sa position initiale sur le plancher. Ainsi, pour les participants de grande stature, la distance entre la position du pied droit quand il passe sous le volant et celle dans la posture de conduite finale est de 85 mm alors que pour les petits qui « translatent » leur jambe elle est de 121 mm. En outre, sans surprise, l'angle de pivotement du genou droit quand celui-ci passe sous le volant, est d'autant plus élevé que l'assise est basse et donc que l'espace entre le volant et le plancher est faible.

3.4. Utilisation du volant

L'objectif ici est de répondre aux questions suivantes : le volant sert-il à retenir la chute des participants et/ou à se positionner par rapport à l'habitacle ? Sert-il à se décaler dans le siège pour se mettre en position de conduite ?

A cette fin, l'analyse se fait en deux temps. Dans un premier temps, on s'intéresse aux efforts appliqués avant que le pied gauche quitte le sol (*P1*), et ensuite après qu'il le quitte (*P2*). On suppose que dans la première situation *P1*, si le volant est utilisé, il sert à **retenir la chute dans le siège** et/ou **au maintien de l'équilibre** et/ou **à se positionner par rapport à l'habitacle**, et dans la seconde situation *P2*, à se décaler dans le siège pour **se mettre en posture de conduite**.

On choisit de couper le mouvement par rapport à l'instant où le pied gauche quitte le sol et non par rapport à celui où les participants commencent à s'assoir. En effet, entre l'instant où le conducteur commence à s'assoir et celui où il est **réellement assis**, il s'écoule un laps de temps alors que logiquement quand le pied gauche quitte le sol, l'assise est complète dans le siège.

On calcule alors le nombre d'essais présentant une valeur pic pour la norme de la force appliquée sur le volant avant (*P1.Nb*) et après (*P2.Nb*) que le pied gauche des participants quitte le sol. Identifier le nombre d'essais à partir de la présence d'une valeur pic nous permet de dissocier les essais pour lesquels les participants ont **appuyé de manière effective sur le volant**, de ceux où la main est seulement posée dessus. La variable *MainVol.Nb* dans le Tableau 44 prenait en compte ces deux situations. Pour cela, nous supposons que l'utilisation du volant est effective lorsque la norme est supérieure au poids de l'ensemble du bras (bras + avant-bras, soit 4 % du poids total pour les femmes et 4.7 % pour les hommes d'après Dumas et al. [DUM_07]).

Pour comprendre l'effet des variables de l'étude (hauteur d'assise, de toit, largeur de bavolet et groupes de stature), seuls les 25% des essais qui ont la plus importante norme de force normalisée (par le poids des participants, %Pds) sont considérés. On relève ainsi pour ces seuls essais :

- Le nombre d'essais présentant une valeur pic pour la norme de la force appliquée sur le volant avant (*P1_25.Nb*) et après (*P2_25.Nb*) que le pied gauche des participants quitte le sol;
- L'intensité de la norme de la valeur pic appliquée (*P1_25.Fn* pour *P1* et *P2_25.Fn* pour *P2*) ;
- Et les projections de la norme sur le repère global (*P1_25.Fx, P1_25.Fy* et *P1_25.Fz* pour *P1* et *P2_25.Fx, P2_25.Fy* et *P2_25.Fz* pour *P2*).

Le Tableau 50 présente les valeurs moyennes et les écarts types de ces variables. La Figure 90 présente les deux utilisations du volant, quand une valeur pic est identifiée en *P1* (graphique de gauche) et quand une valeur pic est identifiée en *P2* (graphique de droite).

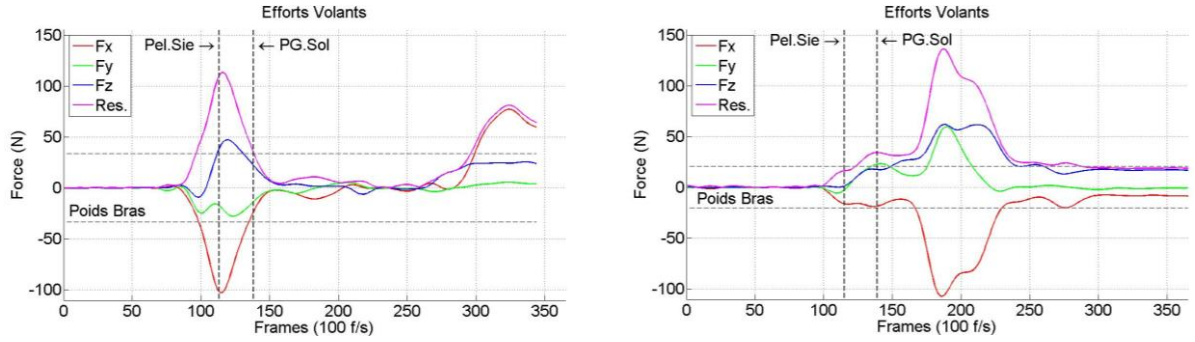


Figure 90 : Deux situations observées pour l'utilisation du volant lors de l'entrée dans l'habitacle. Figure de droite pour le pic *P1* et figure de gauche pour le pic *P2*.

3.4.1. Appui sur le volant avant que le pied gauche quitte le sol (*P1*)

On commence par s'intéresser à l'utilisation du volant en *P1*, c'est-à-dire pour aider le participant à retenir sa chute et/ou à se positionner par rapport à l'habitacle.

L'analyse de l'apparition des valeurs pics nous permet d'une part d'apprécier si le volant est utilisé de manière effective, pour aider le mouvement, ou si les participants ont uniquement posé la main dessus. Pour 62 % des essais (*P1.Nb*), une valeur pic supérieure au poids du bras des participants est observée avant que le pied gauche quitte le sol (*PG.Sol*). Les valeurs pics sont en grande partie observées pour les grands hommes et l'assise la plus basse *Hs1*. Dans cette situation, on peut penser que le volant est donc utilisé pour **retenir la chute dans le siège** et/ou **le maintien de l'équilibre**.

De plus, quand les participants attrapent le volant avant qu'ils commencent à s'assoir, ils n'appliquent pas toujours d'effort significatif (supérieur au poids de l'ensemble bras+avant-bras) et ont donc juste posé la main dessus pour 85 essais (*MainVol.Nb - P1.Nb*). Ces essais concernent principalement les petites femmes et l'assise la plus haute *Hs3*. Dans cette situation, on peut penser que le volant est utilisé pour **se positionner par rapport à l'habitacle**.

La norme de la force appliquée au volant vaut en moyenne 97±37 N (représentant 14±5 % du poids des participants) et atteint au maximum 243 N. Les 25 % des essais où la norme est la plus importante concernent principalement l'assise la plus basse *Hs1* et le groupe des grandes statures. Aucune différence suivant les largeurs de bavolet (cf. *P1_25.Nb* dans le Tableau 50) n'est constatée.

La norme de la force appliquée sur le volant (*P1_25.Fn*) est d'autant plus importante que les participants sont de grande stature ($p<0.05$). Ainsi, un écart d'environ 50 N sépare les valeurs moyennes de la norme de l'effort appliqué par les petites femmes de celles des grands hommes. Toutefois, aucun effet de la hauteur d'assise et de la largeur de bavolet n'est observé ($p>0.05$).

Tableau 50 : Valeurs moyennes et écarts types des variables expliquant l'utilisation du volant. Pour les variables de comptage, la première valeur correspond au nombre d'essais identifiés et la seconde à la valeur relative par rapport au nombre d'essais total (% du nombre d'essais).

Variables	Hs1	Hs2	Hs3	Petit	Moyen	Grand	Lb1	LbM	Lb2	Ht1	HtM	Ht2	Tous
P1.Nb	98 (80)	80 (65)	52 (42)	48 (41)	87 (73)	95 (71)	44 (59)	45 (62)	50 (67)	44 (59)	47 (63)	44 (59)	230 (62)
P1_25.Nb	39	10	9	15	19	24	14	13	14	14	9	8	58
P1_25.Fn (N)	144±40	128±19	135±31	117±17	125±27	166±35	131±30	144±45	153±42	131±30	132±30	135±15	140±36 ^{G*}
P1_25.Fx (N)	-128±37	-111±16	-119±34	-104±16	-110±27	-147±34	-112±28	-128±40	-138±41	-112±28	-116±31	-120±17	-123±34 ^{G*}
P1_25.Fy (N)	7±38	24±39	54±20	23±24	18±46	12±43	8±44	8±44	27±32	8±44	24±40	20±39	17±40 ^{S**}
P1_25.Fz (N)	49±28	10±48	16±26	41±15	7±37	59±26	42±33	44±35	36±38	42±33	35±30	21±45	37±26 ^{S**,G***}
P2.Nb	78 (63)	78 (63)	90 (72)	80 (68)	92 (77)	74 (55)	50 (67)	46 (63)	56 (75)	50 (67)	47 (63)	47 (64)	246 (66)
P2_25.Nb	14	14	34	33	18	11	8	12	22	8	10	10	62
P2_25.Fn (N)	164±45	148±30	149±40	137±30	150±31	202±38	141±34	156±37	161±48	141±34	147±34	145±30	152±39 ^{G***}
P2_25.Fx (N)	-117±80	-106±75	-107±47	-87±53	-104±34	-182±40	-111±40	-121±50	-100±70	-111±40	-110±50	-111±27	-109±68 ^{G***}
P2_25.Fy (N)	15±24	14±17	24±29	28±26	12±23	7±24	18±17	11±26	24±32	18±17	22±21	20±22	20±26
P2_25.Fz (N)	39±28	71±24	85±42	66±36	80±60	61±50	60±50	60±51	68±60	60±50	81±29	79±45	69±45 ^{S***}

* : p<0.05, ** : p<0.01, *** : p<0.001, S : hauteur siège, T : hauteur toit, G : groupe stature, B : largeur bavolet.

Concernant la direction de la réaction de l'effort, celle-ci est principalement appliquée suivant l'axe X- (*P1_25.Fx*). La force de réaction est en moyenne de -123±34 N suivant X (représentant 88 % de la norme), de 17±40 N suivant Y (soit 14 % de la norme), et de 37±26 N suivant l'axe Z (représentant 26 % de la norme).

Dans le détail, il apparait que pour l'assise la plus basse *Hs1*, la force est appliquée principalement suivant l'axe X, mais on constate également qu'elle est plus importante suivant l'axe Z et quasi nulle suivant les Y. Pour l'assise la plus haute *Hs3*, on constate une force plus importante sur l'axe Y. Un écart de 47 N sépare ainsi les valeurs moyennes de *Hs1* et *Hs3* pour la force suivant Y.
Concernant l'effet de la stature, il apparait que les participants de grande stature ont beaucoup plus appuyé suivant l'axe X (écart de 43 N avec la valeur moyenne du groupe de petite stature). De plus, il apparait que les participants de moyenne stature ont très peu appliqué d'effort suivant l'axe vertical Z.

3.4.2. Appui sur le volant <u>après</u> que le pied gauche quitte le sol (*P2*)

On s'intéresse dans un second temps, à l'utilisation du volant quand les participants sont assis, après que le pied gauche quitte le sol (*P2*). Dans cette situation, on suppose que le volant est utilisé pour se décaler dans le siège et se mettre en posture de conduite.

Pour 66 % des essais (*P2.Nb*), une valeur pic est observée après que le pied gauche quitte le sol (*PG.Sol*). Les valeurs pics sont principalement observées pour l'assise la plus haute et les participants de petite et moyenne statures. On constate également que pour les essais des petites femmes, plus l'assise est haute plus elles utilisent le volant : 18 essais pour Hs1, 26 pour Hs2 et 36 pour Hs3.

La norme vaut en moyenne 103±43 N (représentant 16±7 %Pds) et atteint au maximum pour cette expérimentation 266 N. Les 25% des essais où la norme est la plus importante concernent cette fois-ci l'assise la plus haute *Hs3* et les participants de petite stature (*P2_25.Nb*). De plus, il apparait sans surprise que P2 a été privilégiée pour la largeur de bavolet la plus importante *Lb2* : 8 essais concernent *Lb1*, 12 essais *LbM*, et 32 essais *Lb2*.

Comme pour la situation *P1*, la norme de la force appliquée est d'autant plus importante que les participants sont de grande stature : un écart de 65 N sépare les valeurs moyennes des participants de petite stature de ceux de grande stature (Tableau 50). Aucun effet de la hauteur d'assise et de la largeur de bavolet n'est observé.

De plus dans cette situation, la réaction des forces est principalement dirigée suivant la direction -X (vers l'avant) et la direction +Z (vers le haut). La force de réaction est en moyenne de -109±68 N suivant X (représentant 71 % de la norme), de 20±26 N suivant Y (soit 15 % de la norme), et de 69±51N suivant l'axe Z (soit 47 % de la norme).

Dans le détail, l'assise a uniquement un effet sur la force appliquée suivant les Z. Celle-ci est d'autant plus grande que l'assise est haute. Ainsi 56 N (ou 9 % du Poids) séparent la valeur moyenne de la force appliquée suivant Z entre l'assise *Hs1* et l'assise *Hs3*.
Enfin, suivant leur stature, les participants ont sollicité différemment le volant. Les participants de petite stature ont appliqué leur effort autant suivant les X (64% de la norme) et les Z (50% de la norme), alors que pour les participants de grande stature l'axe X a été privilégié (90 % de la norme suivant X et 28 % suivant Z). En outre, plus les participants sont de grande stature, plus la force appliquée suivant X est importante et faible suivant Y. Un écart de 95 N (9 %Pds) et 21 N (5 %Pds) sépare ainsi les groupes de petite et de grande statures pour respectivement l'axe X et l'axe Y.

4. Interactions du conducteur avec l'habitacle lors de la sortie de l'habitacle

On réitère la même démarche pour le mouvement de sortie, avec les mêmes objectifs de compréhension de l'influence des interactions entre l'habitacle et le conducteur sur le mouvement réalisé. L'analyse va se dérouler en 4 temps : l'analyse du passage de la tête sous le toit, de l'interaction de la jambe gauche avec le bavolet, du passage de la jambe droite sous le volant et le rôle de l'appui sur le volant.

4.1. Passage de la tête sous le toit

Comme pour le mouvement d'entrée, on regarde comment la hauteur de toit influence le mouvement réalisé. Les variables suivantes sont étudiées à l'instant où la tête passe sous le toit (*Tete.Toi*) :

- La position du bassin par rapport au siège (*X_bas*, *Y_bas* et *Z_bas*) ;
- Le pivotement du bassin (*Θ_bas/sie*) et des épaules (*Θ_epa/sie*) par rapport au siège ;
- L'angle de flexion du dos (*Θ_dos/Z*) et du cou (*Θ_cou/Z*) ;
- La distance du buste au volant (*D_bus/vol*) ;
- La plus faible distance entre la tête et le toit (*D_tet/toi*), et la tête et le montant (*D_tet/mtt*).

La définition de chacune de ces variables a été présentée au §3.1. Le Tableau 51 présente les valeurs moyennes et les écarts types de ces variables quand la tête des participants passe sous le toit pour les seuls essais s'intéressant à l'identification de la hauteur de toit.

Tableau 51 : Valeurs moyennes et écarts types des variables permettant de définir la posture des participants et leur proximité vis-à-vis des éléments de l'habitacle quand leur tête passe sous le toit (*Tete.Toi*). Les valeurs sont moyennées pour tous les participants et tiennent compte seulement des essais s'intéressant à la hauteur de toit (*Ht1*, *Ht2* et *HtM*).

Variables	Hs1	Hs2	Hs3	Petit	Moyen	Grand	Ht1	HtM	Ht2	Tous
X_bas (mm)	-69±53	-62±51	-58±56	-123±30	-54±29	-18±32	-65±53	-64±53	-59±53	-63±53 ^{G***}
Y_bas (mm)	-18±25	-15±23	-20±23	-31±19	-10±25	-14±20	-21±24	-18±23	-16±24	-18±23 ^{G***}
Z_bas (mm)	-1±15	-2±19	2±21	9±17	1±15	-10±18	2±19	-1±18	-2±19	0±19 ^{G***}
Θ_bas/sie (°)	53±12	48±12	42±12	42±12	51±13	49±12	48±12	48±14	47±12	48±13 ^{S***,G***}
Θ_epa/sie (°)	38±10	35±08	32±08	31±08	39±10	35±06	34±9	36±9	35±8	35±9 ^{S***,G***}
Θ_dos/Z (°)	26±9	27±7	28±7	25±7	29±9	28±7	27±8	27±7	27±8	27±8 ^{G**}
Θ_cou/Z (°)	62±11	63±13	64±13	51±10	68±09	70±07	60±11	63±12	66±12	63±12 $^{G***, T***}$
D_bus/vol (mm)	347±50	339±43	341±37	314±24	327±38	379±34	341±45	340±41	345±45	342±44 ^{G***}
D_tet/toi (mm)	61±26	58±21	56±26	65±26	60±25	51±20	67±26	57±21	50±23	58±24 $^{G***, T***}$
D_tet/mtt (mm)	164±40	181±34	207±41	194±34	171±41	187±46	199±38	183±40	170±44	184±42 ^{S***,G***,T***}

* : p<0.05, ** : p<0.01, *** : p<0.001, S : hauteur siège, T : hauteur toit, G : groupe de stature.

4.1.1. Analyse de la posture quand la tête passe sous le toit

De manière générale, on retrouve des résultats proches de ceux observés pour l'entrée.

Concernant l'analyse de la position du bassin, il est d'autant plus avancé que les participants sont de petite stature (sans effet de la hauteur d'assise et de la hauteur de toit) (cf. Figure 91). Pour la position latérale, il y a seulement un effet des groupes de stature, mais l'écart entre les valeurs moyennes des petites femmes et celles des grands hommes n'est que de 17 mm (Tableau 51). La position verticale du bassin est seulement affectée par la stature des participants, mais l'écart est seulement de 19 mm entre les participants de petite et de grande satures.

Par ailleurs, quels que soient les groupes de stature, les hauteurs d'assise ou les hauteurs de toit, le bassin est plus proche du volant pour la sortie qu'il ne l'est pour l'entrée (un peu plus de 40 mm séparent leurs valeurs moyennes). Le bassin est également proche du milieu du siège, laissant un espace plus important entre le conducteur et la barre de toit.

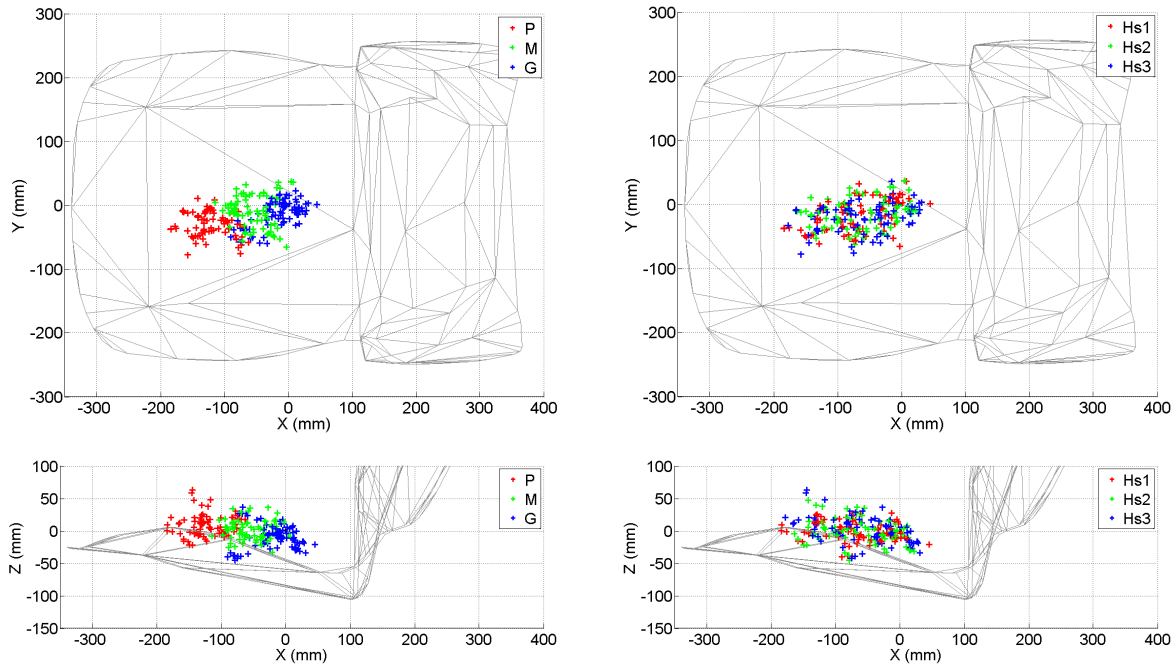


Figure 91 : Position du bassin quand la tête passe sous le toit en vue de dessus (1ère ligne) et de côté (2ème ligne) pour les essais s'intéressant à la hauteur de toit. Les figures de gauche en fonction des groupes de stature (rouge : Petits, vert : Moyens et bleu : Grands) et les figures de droite en fonction des hauteurs d'assise (rouge : *Hs1*, vert : *Hs2* et bleu : *Hs3*).

On constate également que les participants ont pris le temps de pivoter dans le siège pour se mettre dans l'espace situé entre le volant et le siège. Ainsi, lorsque la tête des participants passe sous le toit, les épaules forment en moyenne un angle de 35±10° avec le siège (*Θ_epa/sie*). En comparaison, pour le mouvement d'entrée cet angle était 19±7°. Les participants se retrouvent donc, avant même d'avoir quitté le siège, en face de l'embrasure et peuvent de ce fait fléchir librement la tête (Figure 92). En outre, même si l'ANOVA montre que l'angle de pivotement des épaules est affecté par les groupes de stature et la hauteur d'assise, leurs effets restent limités et les valeurs moyennes de tous les groupes de stature et pour toutes les hauteurs d'assise sont toutes supérieures à 30 °.

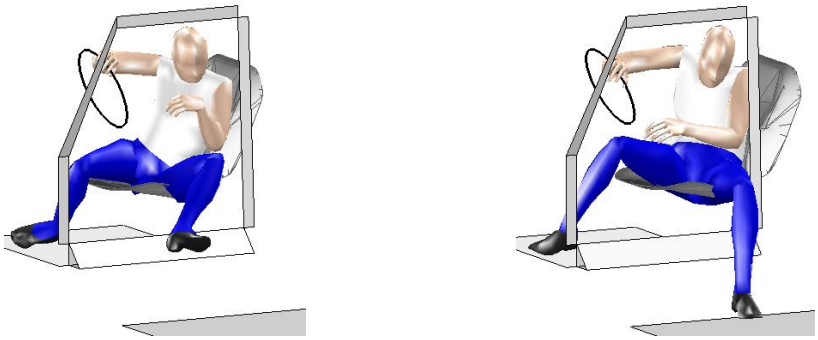
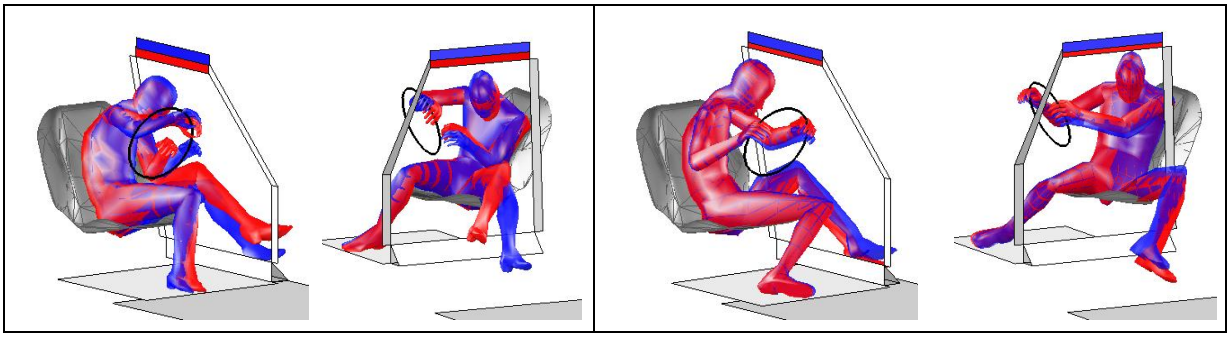


Figure 92 : Posture adoptée par une petite femme (figure à droite) et un grand homme (figure à gauche) pour la configuration *Hs2_Ht2*, pendant que le passage de la tête sous le toit.

Enfin, en ce qui concerne la flexion du haut de corps quand la tête passe sous le toit, il apparait que l'évitement du toit se fait en fléchissant le cou. En effet, l'angle de flexion du dos (*Θ_dos/Z*), dont les valeurs sont proches de celles observées pour l'entrée, varie très peu suivant le groupe de stature, la hauteur d'assise et la hauteur de toit (Tableau 51). Au contraire, les écarts pour l'angle de flexion du cou (*Θ_cou/Z*) entre les groupes de stature et les hauteurs de toit sont significatifs (pas d'effet de la hauteur d'assise) : ainsi 19 ° séparent la valeur moyenne de *Θcou/Z* entre le groupe des petites femmes

et celle des grands hommes, et seulement 6 ° entre la hauteur de toit *Ht1* et celle *Ht2*. On constate également que l'angle de flexion du cou est en moyenne, et ce pour toutes ces variables, systématiquement supérieur à celui de l'entrée.



Participant de petite stature | Participant de grande stature

Figure 93 : Posture de deux participants, un de petite (2 graphiques de gauche) et un de grande stature (2 graphiques de droite) quand la tête passe sous le toit pour les deux hauteurs de toit identifiées par les participants *Ht1* (en bleu) et *Ht2* (en rouge) pour l'assise *Hs2*.

Enfin, tout comme pour l'entrée, la hauteur de toit a un effet significatif uniquement sur la flexion du cou (Tableau 51). Ceci peut également être observé sur la Figure 93 qui présente les postures adoptées par un participant de petite et par un de grande statures et ce suivant les hauteurs de toit *Ht1* (en bleu) et *Ht2* (en rouge). On observe ainsi que la posture adoptée par une même personne est très similaire pour les deux hauteurs de toit, et ce en particulier au regard de la position des mains (et donc de l'utilisation du volant), du pivotement dans le siège, et de la posture d'évitement du toit.

4.1.2. Proximité avec les éléments de l'habitacle quand la tête passe sous le toit

Etant donné la position avancée de leur siège et donc de leur bassin, les participants de petite stature ont sans surprise le buste plus proche du volant (Tableau 51).

En moyenne, les participants ont leur tête à 58 ± 26 mm du toit (comme pour l'entrée). L'ANOVA montre qu'il y a un effet de la hauteur de toit et des groupes de stature, mais pas de la hauteur d'assise. Ainsi, la distance de la tête au toit est d'autant plus faible que les participants sont de grande stature et que la hauteur de toit est basse. Toutefois les écarts sont relativement faibles : Un écart de 17 mm est observé entre les valeurs moyennes des hauteurs *Ht1* et *Ht2* et de 14 mm entre les groupes des participants de petite et de grande statures.

Il apparait également que plus la hauteur de toit est haute plus les participants ont la tête éloignée du montant (*D_tet/mtt* dans le Tableau 51) : un écart de 30 mm est ainsi observé entre la valeur moyenne de *Ht1* et *Ht2*. Ceci nous laisse supposer que plus la hauteur de toit est basse, plus la flexion frontale prend le dessus sur la flexion latérale du dos et du cou. On peut également constater que les participants de petite et de grande statures ont en moyenne la tête aussi proche du montant.

4.2. Interaction avec le bavolet

L'analyse a été guidée par les mêmes interrogations que pour le mouvement d'entrée : comprendre comment une augmentation de la largeur de bavolet influe sur le mouvement réalisé. Pour cela, on utilise les mêmes variables que pour le mouvement d'entrée à l'instant où la distance entre la jambe gauche et le bavolet est la plus faible (*JG.Bav*), à savoir :

- La distance la plus faible entre la jambe gauche et le bavolet (*D_jg/bav*) ;
- La position suivant l'axe transversal Y du repère global du bassin (*Y_bas*) et de la cheville gauche (*Y_chg*).

Le Tableau 52 présente les valeurs moyennes et les écarts types de ces variables quand la distance entre la jambe gauche et le bavolet est la plus faible. La Figure 94 présente la posture adoptée par une petite femme (deux figures de gauche) et un grand homme (deux figures de droite), quand la distance et la largeur de bavolet est minimale en fonction des largeurs de bavolet (*Lb1* en bleu et *Lb2* en rouge).

Tableau 52 : Valeurs moyennes et écarts types des variables permettant de définir la posture des participants et leur proximité vis-à-vis de l'habitacle quand la distance entre la jambe gauche et le bavolet est la plus faible. Les valeurs sont moyennées pour tous les participants et pour les essais de l'expérimentation s'intéressant à la largeur de bavolet (*Lb1*, *Lb2* et *LbM*).

Variables	Hs1	Hs2	Hs3	Petit	Moyen	Grand	Lb1	LbM	Lb2	Tous
D_jg/bav (mm)	38±16	48±20	56±20	34±13	50±18	58±21	56±19	42±16	30±10	48±20 ^{S***,B***,G***}
Y_bas (mm)	44±53	59±36	134±39	126±59	70±51	48±36	73±58	85±59	99±58	80±54 ^{S***,B***,G***}
Y_chg (mm)	638±43	617±40	607±36	615±48	627±36	620±40	602±29	637±25	675±26	621±42 ^{S***,B***}

* : p<0.05, ** : p<0.01, *** : p<0.001, S : hauteur siège, T : hauteur toit, G : groupe stature, B : largeur bavolet.

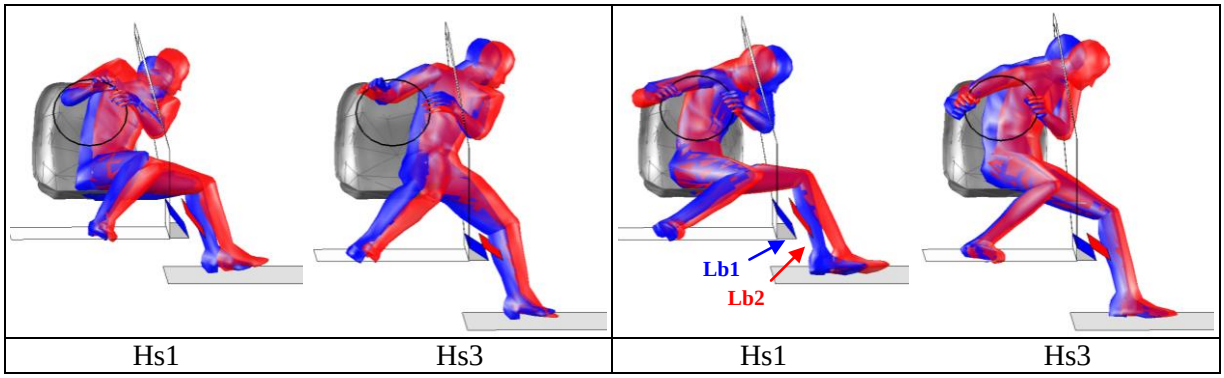


Figure 94 : Posture de deux participants, une petite femme (figures de gauche) et un grand homme (figures de droite) quand la jambe gauche est la plus proche du bavolet (vue de face). Bleu et rouge pour respectivement les largeurs de bavolet *Lb1* et *Lb2*.

Pour la sortie, la distance minimale entre la jambe et le bavolet (*D_jg/bav*) est en moyenne à 48±20 mm. Cette distance est affectée par l'ensemble des facteurs (stature, hauteur de siège et bavolet). Ainsi, en toute logique, la distance est d'autant plus faible que les participants sont de petite stature, que l'assise est basse et que le bavolet est loin du siège. Par exemple pour la largeur de bavolet, un écart de 26 mm sépare les largeurs *Lb2* et *Lb1*, laissant supposer que les participants passent d'une posture avec le mollet gauche proche du bavolet à une autre où il est en appui dessus.
En outre, plus la largeur de bavolet est importante plus l'écart entre les valeurs moyennes des groupes de stature est important : ainsi, pour la largeur *Lb1*, 29 mm séparent les valeurs moyennes des petites femmes et celles des grands hommes, 20 mm pour la largeur *LbM* et 5 mm pour la largeur *Lb2*.

De la Figure 94, nous constatons que les postures sont très proches entre les largeurs *Lb1* et *Lb2*. L'analyse de la position de la cheville (*Y_chg*) montre que l'appui du pied gauche, suit la largeur de bavolet. Un écart de 73 mm sépare ainsi les valeurs moyennes de la largeur *Lb1* et celles de *Lb2*.

Concernant la position du bassin, on constate que plus la largeur de bavolet est importante, plus le bassin est proche du renfort du siège, mais l'écart entre les valeurs moyennes de *Lb1* et celles de *Lb2* n'est que de 26 mm. Il apparait également que les participants sont plus assis au milieu du siège qu'ils ne le sont lors de l'entrée et ce quelles que soient leur stature, la hauteur d'assise et la largeur de bavolet. Les participants ont donc plus tendu leur jambe la positionnant en conséquence plus en appui sur le bavolet que lors de l'entrée.

La variation de la largeur du bavolet implique donc conjointement une translation latérale de l'ensemble du corps et une extension du genou gauche pour amener le pied jusqu'au sol.

4.3. Passage de la jambe sous le volant

Pour étudier la posture adoptée pour le passage de la jambe sous le volant pendant la sortie, on utilise :

- l'angle de pivot du genou droit par rapport au plan vertical (*Θ_gend*) quand le genou passe sous le volant ;
- la distance entre les positions de la cheville droite quand les participants sont dans leur posture de conduite et quand le pied gauche atteint le sol (*D_pied*).

L'analyse de ces variables et l'observation des vidéos des essais, révèlent également deux situations pour la sortie : une situation de décalage et une autre de pivotement. La Figure 95 illustre les deux situations observées. Le Tableau 53 présente les valeurs moyennes et les écarts types pour les variables étudiées en prenant soin de distinguer les deux situations observées.

Tableau 53 : Moyennes et écarts types des variables définissant la posture des participants quand le genou droit passe sous le volant. Les valeurs sont moyennées pour tous les participants et pour les essais de l'expérimentation s'intéressant à la largeur de bavolet (*Lb1*, *Lb2* et *LbM*)

Variables		Hs1	Hs2	Hs3	Petit	Moyen	Grand	Tous
S1	Θ_gend (°)	10±6	4±3	4±2	7±6	6±4	8±6	7±5 ^{S**}
	D_pied (mm)	218±40	166±43	182±27	211±17	172±45	219±36	193±45 ^{S**,G**}
S2	Θ_gend (°)	-24±10	-18±07	-17±07	-16±07	-20±08	-23±09	-20±08 ^{S***,G***}
	D_pied (mm)	102±64	81±50	74±37	72±34	92±66	92±51	85±52 ^{S***,G**}

* : p<0.05, ** : p<0.01, *** : p<0.001, S : hauteur siège, T : hauteur toit, G : groupe stature, B : largeur bavolet.

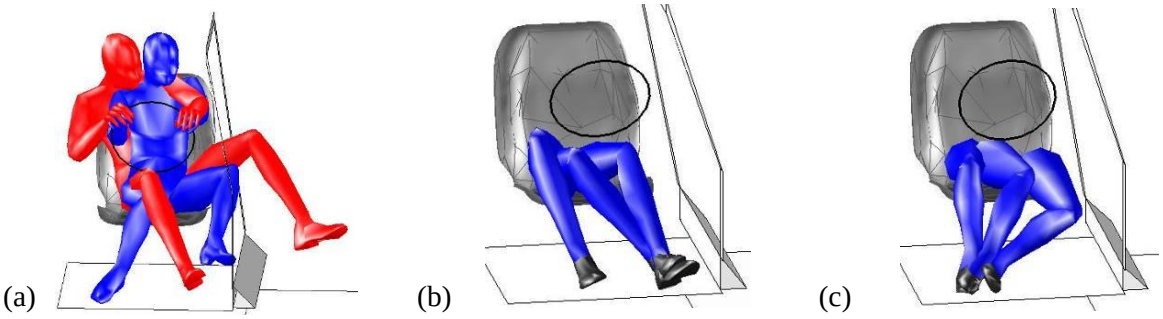


Figure 95 : Passage de la jambe droite sous le volant. Présentation des deux situations observées : situation de pivotement (b) et de décalage (c) de la jambe droite pour 3 instants particuliers (quand le pied gauche quitte le plancher, passe au-dessus du bavolet et atteint le sol).

La première situation observée, dite de « **décalage** » (*S1*), consiste à translater la jambe d'un côté à l'autre du volant (cf. Figure 95-b). Elle concerne seulement 8% (28/372) des essais de notre expérimentation et n'est observée que pour 3 participants : une petite femme sur l'assise la plus basse *Hs1*, une participante de stature moyenne sur toutes les assises, et le participant le plus grand sur les 2 assises les plus basses *Hs1* et *Hs2*.

Pour cette situation, les participants font une rotation latérale de la hanche droite, tendent la jambe (extension simultanée de la hanche et du genou) et pivotent le bassin dans le siège vers l'extérieur de l'habitacle. Pour le pivotement, ils s'aident du volant et basculent le bassin vers l'arrière. Lorsque le genou passe sous le volant, l'angle de pivotement du genou droit (*Θ_gend*) est positif et égal en moyenne à 7±5° (cf. définition Figure 89-a). On constate également que le passage de la jambe droite sous le volant peut se faire soit avant la sortie de la jambe gauche (93% (26/28) des essais pour laquelle la situation de décalage est observée soit en même temps (7% ou 2/28 essais).

La deuxième situation observée, dite de « **pivotement** » (*S2*), consiste à faire pivoter la jambe droite de l'autre côté du volant (cf. Figure 95-c). Elle a été la plus observée pendant cette expérimentation et concerne plus de 92% (342/372) des essais et 22 des 25 participants l'utilisent quelle que soit la hauteur d'assise étudiée. Les participants pivotent seulement le genou droit d'un côté à l'autre du

volant et le font en même temps que le pied gauche sort de l'habitacle ; le pied bouge relativement peu sur le sol (cf. Figure 95-b). En comparaison avec la première situation, l'angle de pivotement du genou est négatif et vaut en moyenne -20±8° et la distance *D_pied* est de 86±53 mm alors qu'elle est de 193±45 mm pour la situation de décalage *S1*.

Dans ce cas, l' ANOVA sur les angles de pivotement (*Θ_gend*) montre un effet de la hauteur d'assise et des groupes de stature. Ainsi, plus l'assise est basse (et donc l'espace entre le volant et le plancher étroit) et plus les participants sont de grande stature, plus les particiapnts ont tendance à fléchir la jambe droite. En moyenne, pour les participants de grande stature l'angle passe de -29±9° pour l'assise la plus basse *Hs1* (grand pivotement) à -18±6° pour l'assise la plus haute *Hs3*, alors que pour les participants de petite stature, pour qui le passage est plus aisé, il reste proche de -16±7° (-17±6° pour *Hs1* et -15±7° pour *Hs3*).

4.4. Utilisation du volant

Finalement, nous souhaitons comprendre comment le volant a été utilisé en étudiant les intensités des efforts appliqués sur le volant et en regardant si l'appui sur le volant a facilité le mouvement en limitant les couples articulaires développés dans le membre inférieur.

On calcule alors le nombre d'essais présentant une valeur pic pour la norme de la force appliquée sur le volant avant (*P1.Nb*) et après (*P2.Nb*) que le pied gauche des participants quitte le sol. On étudie ensuite pour les 25% des essais qui ont la plus importante norme de force normalisée (par le poids des participants, %Pds) :

- Le nombre d'essais présentant une valeur pic pour la norme de la force appliquée sur le volant avant (*P1_25.Nb*) et après (*P2_25.Nb*) que le pied gauche des participants quitte le sol;
- L'intensité de la norme de la valeur pic appliquée (*P1_25.Fn* pour le premier pic *P1* et *P2_25.Fn* pour le second *P2*) ;
- Et les projections de la norme sur le repère global (*P1_25.Fx*, *P1_25.Fy* et *P1_25.Fz* pour le première pic *P1*, et *P2_25.Fx*, *P2_25.Fy* et *P2_25.Fz* pour le second pic *P2*).

On s'interroge sur le rôle du volant lors de l'extraction du siège et en particulier si l'effort d'appui tend à réduire les couples articulaires développés dans le membre inférieur. A cette fin, on commence par analyser les couples articulaires maximaux de flexion/extension des articulations des genoux et des hanches développés après que le pied gauche atteigne le sol (*HD.Max* et *HG.Max* pour les hanches droite et gauche, et *GD.Max* et *GG.Max* pour les genoux droit et gauche). L'objectif est de savoir quelle articulation des jambes développe le plus d'efforts lors de la sortie. Les couples articulaires sont exprimés en Nm et sont positifs pour l'extension des genoux et des hanches. Par exemple, dans le cas de genou gauche, il s'agit du couple généré par la force d'appui au sol du fémur sur le tibia ;

On compare ensuite les couples articulaires de flexion/extension des genoux et des hanches avec les couples correspondants générés par la force de contact du volant. L'objectif est de voir si l'appui sur le volant aide à réduire les efforts développés. On étudie également les 25% des essais, qui ont la plus importante force d'appui sur le volant. On dispose donc de deux séries de variables :

- les couples articulaires de flexion/extension des articulations des genoux et des hanches à l'instant du pic *P2* (*HD_CA.P2_25* et *HG_CA.P2_25* pour les hanches droite et gauche, et *GD_CA.P2_25* et *GG_CA.P2_25* pour les genoux droit et gauche). Les valeurs sont exprimées en Nm et sont positives pour l'extension des genoux et des hanches.
- La part des couples articulaires due à l'appui sur le volant, projetée sur l'axe de flexion /extension pour les articulations des genoux (*GD_Vol.P2_25* et *GG_Vol.P2_25*) et des hanches (*HD_Vol.P2_25* et *HG_Vol.P2_25)*.

Le Tableau 54 présente les valeurs moyennes et les écarts types de ces variables. La Figure 96 présente les deux utilisations du volant, quand une valeur pic est identifiée en *P1* (graphique de gauche) et quand une valeur pic est identifiée en *P2* (graphique de droite).

Tableau 54 : Valeurs moyennes et écarts types des variables expliquant l'utilisation du volant. Pour les variables de comptage, la première valeur correspond au nombre d'essais identifiés et la seconde à la valeur relative par rapport au nombre d'essais total (% du nombre d'essais).

Variables	Hs1	Hs2	Hs3	Petit	Moyen	Grand	Lb1	LbM	Lb2	Ht1	HtM	Ht2	Tous
P1.Nb	108 (88)	103 (83)	112 (90)	96 (81)	114 (95)	113 (84)	64 (85)	63 (86)	64 (85)	64 (85)	68 (91)	64 (86)	323 (87)
P1_25.Nb	37	19	25	17	35	29	14	16	22	14	17	12	81
P1_25.Fn (N)	142±35	133±21	140±35	110±12	143±29	152±34	148±42	145±26	130±25	148±42	142±36	134±33	139±32 ^{G***}
P1_25.Fx (N)	-89±76	-87±56	-106±35	-85±13	-106±31	-84±95	-91±69	-110±26	-91±51	-91±69	-92±79	-83±77	-94±61
P1_25.Fy (N)	-34±31	-37±33	-48±31	-36±14	-38±37	-42±34	-48±31	-48±33	-35±33	-48±31	-33±30	-32±24	39±32
P1_25.Fz (N)	54±50	68±22	69±20	55±19	65±47	62±41	83±29	61±44	45±30	83±29	63±29	67±26	62±40
P2.Nb	117 (95)	92 (74)	42 (34)	63 (53)	88 (73)	100 (75)	49 (65)	44 (60)	54 (72)	49 (65)	50 (67)	54 (73)	251 (67)
P2_25.Nb	47	13	3	10	17	36	11	11	17	11	12	12	63
P2_25.Fn (N)	209±47	219±44	181±25	144±40	204±37	231±32	202±40	214±49	217±50	202±40	211±49	203±50	210±46 ^{S*,G***}
P2_25.Fx (N)	-153±85	-164±69	-159±31	-38±98	-157±80	-188±27	-152±73	-168±74	-146±80	-152±73	-163±67	-157±65	-156±79 ^{S*,G***}
P2_25.Fy (N)	-53±37	-55±34	-35±12	-59±35	-55±31	-49±38	-55±34	-47±33	-54±41	-55±34	-56±33	-48±39	-52±36 ^{G***}
P2_25.Fz (N)	102±29	117±27	78±2	85±19	89±18	117±29	99±25	110±26	104±34	99±25	107±27	101±31	104±29 ^{S*,G***}
HG.Max (Nm)	111±34	103±34	88±29	69±18	102±27	127±24	101±35	102±32	98±33	101±35	100±35	101±34	101±34 ^{S***,G***}
GG.Max (Nm)	66±26	55±23	29±21	32±18	52±26	64±28	51±25	47±30	47±27	51±25	51±29	53±29	50±28 ^{S***,G***}
HD.Max (Nm)	9±10	11±10	13±11	6±6	12±11	15±12	9±10	12±11	16±12	9±10	10±10	10±09	11±11 ^{S**,G***}
GD.Max (Nm)	77±27	73±22	55±18	51±19	67±22	84±22	69±26	70±24	72±26	69±26	66±24	63±23	68±25 ^{S***,G***}
HG_CA.P2_25 (Nm)	33±39	19±36	-16±18	29±34	31±39	26±41	38±38	21±34	8±47	38±38	41±36	39±24	28±39
GG_CA.P2_25 (Nm)	-6±17	-5±13	-3±5	14±16	-9±18	-9±10	-9±20	-3±13	1±16	-9±20	-12±14	-8±14	-5±16 ^{G*}
HD_CA.P2_25 (Nm)	-3±16	4±09	2±10	0±10	-7±16	2±14	0±14	-3±7	4±19	0±14	-5±11	-4±14	-1±14
GD_CA.P2_25 (Nm)	37±25	46±25	55±11	33±15	33±21	45±28	41±20	38±30	40±27	41±20	48±22	34±25	40±25
HG_Vol.P2_25 (Nm)	-26±14	-30±13	-27±02	-17±11	-27±07	-29±15	-28±20	-26±13	-27±10	-28±20	-27±12	-24±12	-26±13 ^{G*}
GG_Vol.P2_25 (Nm)	57±31	73±29	44±25	65±15	51±20	63±37	57±16	64±28	64±35	57±16	60±29	52±40	60±31
HD_Vol.P2_25 (Nm)	-26±14	-30±13	-27±2	-17±11	-27±7	-29±15	-28±20	-26±13	-27±10	-28±20	-27±12	-24±12	-26±13 ^{G*}
GD_Vol.P2_25 (Nm)	34±12	49±11	54±04	41±07	36±13	38±15	41±13	40±16	39±14	41±13	38±10	33±16	38±14 ^{S***}

* : p<0.05, ** : p<0.01, *** : p<0.001, S : hauteur siège, T : hauteur toit, G : groupe stature, B : largeur bavolet.

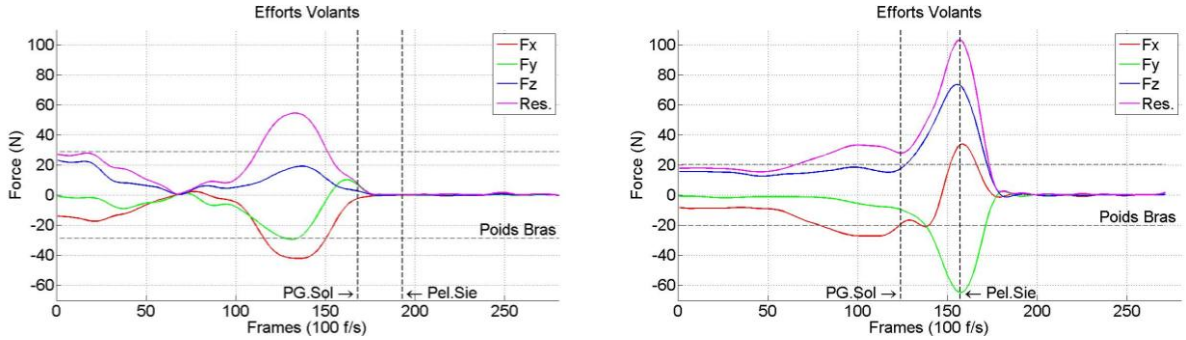


Figure 96 : Deux situations observées pour l'utilisation du volant lors de l'entrée dans l'habitacle. Figure de droite pour le pic *P1* et figure de gauche pour le pic *P2* (rouge, vert, bleu et violet pour respectivement la force d'appui sur le volant suivant l'axe X, l'axe Y, l'axe Z et la résultante).

4.4.1. Appui sur le volant <u>avant</u> que le pied gauche atteigne le sol (*P1*)

Ainsi, pour 87 % des essais (*P1.Nb*), une valeur pic supérieure au poids du bras des participants est observée **avant que le pied gauche atteigne le sol**. Les valeurs pics sont observées pour tous les groupes de stature et les largeurs de bavolet. Une utilisation légèrement plus importante est observée pour les assises *Hs1* et *Hs3*.

La norme de la force appliquée sur le volant vaut en moyenne 94±14 N (représentant 14±5 % du poids des participants) et atteint au maximum pour cette expérimentation 271 N. Les 25 % des essais où la norme est la plus importante concernent principalement la faible hauteur d'assise *Hs1* et le groupe de stature moyenne et la largeur de bavolet la plus importante *Lb2* (cf. *P1_25.Nb* dans le Tableau 54). La force appliquée sur le volant augmente avec la sature des participant mais pas avec la hauteur d'assise ni avec la largeur de bavolet et la hauteur de toit. Un écart de 42 N (soit 12 %Pds) est ainsi observé entre les groupes de petite et de grande statures.

Concernant la direction de la force appliquée, la réaction appliquée au participant est dirigée principalement suivant l'axe X- (vers l'avant) et l'axe vertical Z+ (cf. Tableau 54). La force de réaction est en moyenne de -94±61 N suivant X (représentant 67 % de la norme), de -39±32 N suivant Y (soit 28 % de la norme), et de 62±40 N suivant l'axe Z (soit 44 % de la norme). Dans le détail, l'utilisation du volant est assez similaire quels que soient la hauteur d'assise et le groupe de stature. En effet pour les 3 directions, l'écart de force entre les valeurs des groupes de stature et des hauteurs d'assise ne dépasse pas 20 N (ou 5 %Pds).

4.4.2. Appui sur le volant <u>après</u> que le pied gauche atteigne le sol (*P2*)

Dans un second temps, le volant est utilisé pendant l'extraction du siège. Pour 67 % des essais (*P2.Nb*), une valeur pic est observée **après que le pied gauche atteigne le sol,** soit 20% de moins qu'en *P1* pour se décaler et pivoter dans le siège. Plus les participants sont de grande stature et plus l'assise est basse, plus le volant est utilisé. Le volant apparait donc particulièrement utile pour les participants de grande stature (le volant est utilisé pour 75 % de leurs essais) et pour l'assise Hs1 (95 % des essais) pour s'extraire du siège.

La norme vaut en moyenne 127±65 N (représentant 18±9 % du poids des participants) et atteint au maximum pour cette expérimentation 322 N. Pour les 25% des essais qui ont l'effort sur le volant le plus élevé, la norme de force *P2* est principalement observée pour la plus faible hauteur d'assise *Hs1* qui demande au conducteur le plus d'efforts pour s'extraire du siège et le groupe des grands hommes (*P2_25.Nb* dans le Tableau 54). Parmi ces essais, aucun ne concerne la sortie de participants de petite et de grande statures sur l'assise la plus haute *Hs3*. On constate également que *P2* est privilégiée pour la largeur de bavolet la plus importante *Lb2*.

L'ANOVA montre un effet de la hauteur d'assise et de la stature des participants, mais pas de la hauteur de toit ni de la largeur de bavolet. Un écart de 28 N est ainsi observé entre les hauteurs d'assise *Hs1* et *Hs3*, et atteint 87 N entre le groupe de petite et celui de grande statures. De plus, la norme de force *P2* est systématiquement supérieure à celle relevée pour *P1*.

Si on s'intéresse à la distribution de forces, la réaction est principalement appliquée suivant l'axe X- et l'axe vertical Z. Elle est en moyenne de -156±79 N suivant X (représentant 69 % de la norme), de -52±36 N suivant Y (soit 27 % de la norme) et de 104±29 N suivant Z (50 % de la norme). Concernant l'axe longitudinal X, la force diminue avec la stature : un écart de 150 N (21 %Pds) est observé entre le groupe des petites et des grandes statures. La même observation est faite pour l'axe Z, mais l'effet est de moindre mesure. Il apparait également que la force est principalement appliquée suivant l'axe vertical pour le groupe de petite stature.

Concernant, les couples articulaires maximaux développés dans le membre inférieur à l'instant du pic *P2*, les articulations les plus sollicitées sont la hanche gauche et le genou droit. Pour la hanche gauche, un couple maximal de 101 Nm est ainsi développé en moyenne sur l'ensemble de l'expérimentation. Pour le genou droit, le couple est de 68 Nm en moyenne. Les 2 autres articulations, sont moins sollicitées : malgré tout, pour le genou gauche, le couple atteint en moyenne 50 Nm (cf. Figure 97).

L'ANOVA, récapitulée au Tableau 54, montre un effet de la hauteur d'assise et des groupes de stature sur les couples articulaires, mais pas de la hauteur de toit ni de la largeur de bavolet. Toutefois, pour les couples articulaires développés sur la hanche droite sont très faibles et sont très peu affectés par la hauteur d'assise et les groupes de stature.
Concernant l'effet de la hauteur d'assise, l'effet est particulièrement important pour les couples articulaires développés sur le genou gauche. Un écart de 23 Nm, 34 Nm et de 22 Nm est ainsi observé entre les valeurs moyennes de l'assise *Hs1* et celle *Hs3* pour respectivement la hanche gauche, le genou gauche et le genou droit.
Concernant l'effet de la stature, les participants de grande stature ont développé un couple plus important que les autres groupes et ce sur toutes les articulations du membre inférieur. L'écart entre les valeurs moyennes des grands et des petits sont de 58 Nm, 32 Nm et 33 Nm pour la hanche gauche, le genou gauche et le genou droit.

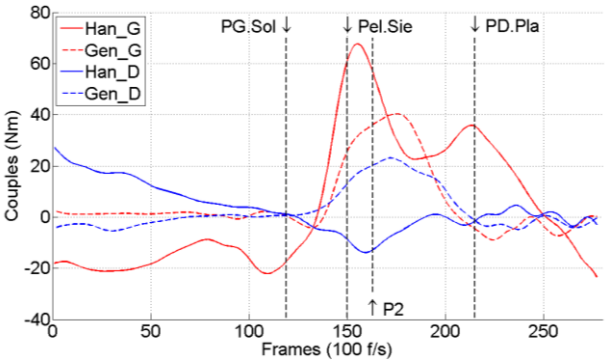


Figure 97 : Exemple de couples articulaires développés pendant la sortie. Les hanches en trait plein et les genoux en pointillés. Rouge et bleu pour la jambe droite et gauche.

On s'intéresse à la contribution de la force d'appui sur le volant lors de l'extraction du siège et en particulier à l'instant du pic *P2*. La Figure 98 présente pour les articulations du membre inférieur les couples articulaires et les couples induits par l'appui sur le volant. Pour savoir si l'appui sur le volant aide à réduire les efforts développés, on regarde si les couples induits par l'appui sur le volant et les couples articulaires sont orientés dans le même sens (et sont donc de même signe) et lequel des deux est le plus élevé.

Comme le montre le Tableau 54, la contribution du volant est particulièrement élevée pour l'extension du genou gauche et dans une moindre mesure pour le genou droit. Dans le détail, pour la quasi-totalité des essais 98 % (62/63) le couple lié à la contribution du volant est supérieur à celle du couple articulaire pour le genou gauche, alors que pour les hanches droite et gauche, pour 90% des essais (57/63) il est inférieur. De plus, on constate également comme pour l'entrée, que pour les genoux la valeur est systématiquement positive et négative pour les hanches. Ce qui voudrait dire que le volant contribue à l'extension des genoux et à la flexion des hanches.

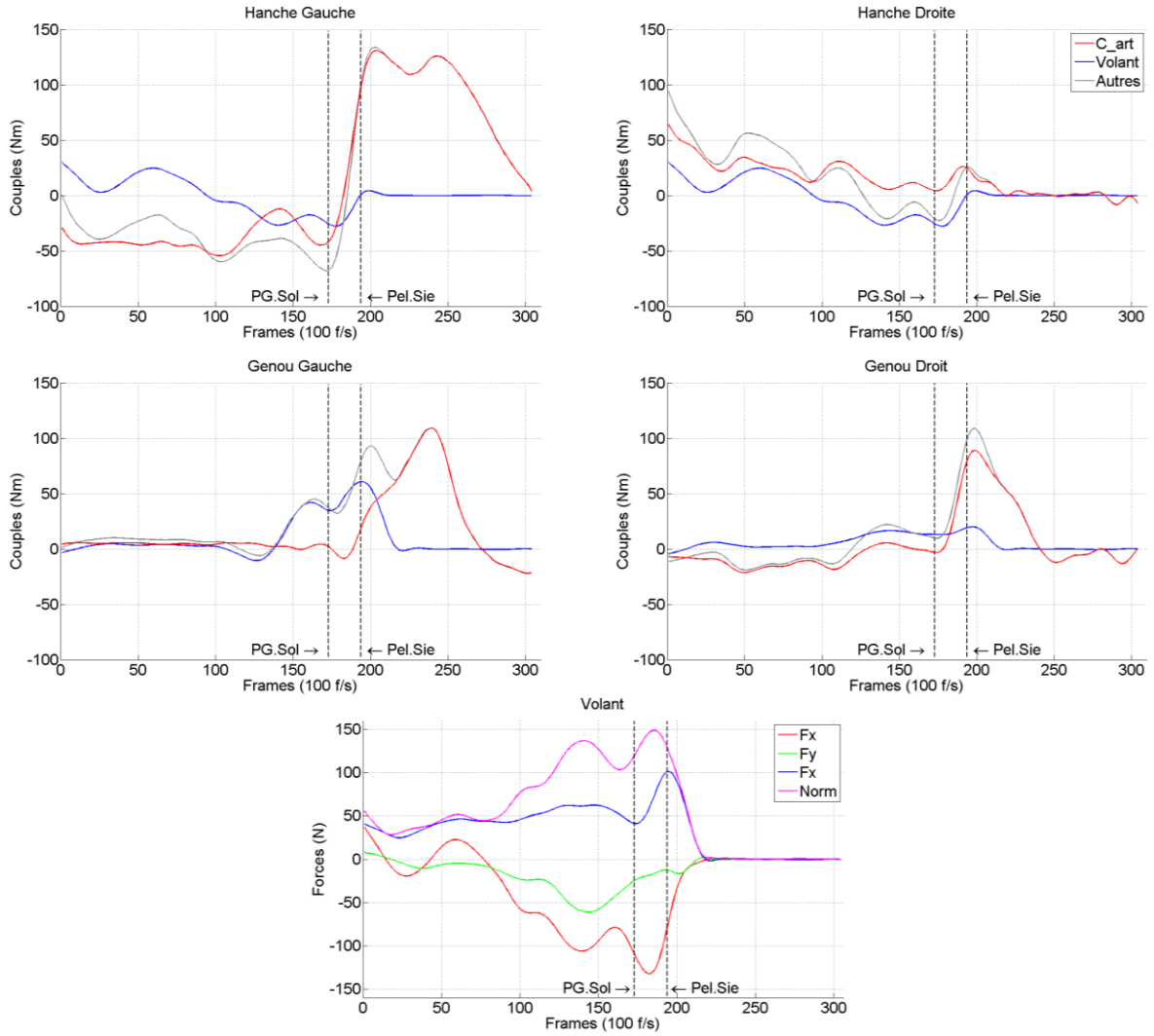


Figure 98 : Contribution de la force de contact appliquée au volant sur les couples articulaires d'extension. La courbe rouge présente les couples articulaires et la bleue la contribution du volant et la grise le reste pour satisfaire à l'équilibre dynamique. Le dernier graphique présente la réaction de la force appliquée par le participant sur le volant (rouge, vert, bleu et violet pour respectivement Fx, Fy Fz et la norme).

5. Discussion

Concernant la stratégie de mouvement, seule les stratégies « jambe droite en premier » pour l'entrée et « jambe gauche en premier » pour la sortie ont été utilisées par les participants lors de l'expérimentation. La raison est principalement liée aux consignes de l'expérimentateur concernant les postures initiale et finale et au fait de devoir poser les pieds sur les plates-formes.

5.1. Compréhension de l'identification des hauteurs de toit

La première attente vis-à-vis de cette étude était de déterminer les effets de la hauteur de toit sur la cinématique du mouvement d'entrée/sortie et comprendre pourquoi les hauteurs de toit *Ht1* et *Ht2* ne sont influencées ni par la hauteur de siège ni par la stature des participants et pourquoi elles diffèrent seulement de 45 mm en moyenne, quels que soient les hauteurs d'assise et les groupes de stature.

- **Les participants ont été plus gênés lors de l'entrée pour le passage de la tête sous le toit**

Les stratégies de mouvement utilisées par les participants pour passer la tête sous le toit, nous laisse supposer que l'entrée dans l'habitacle est plus critique pour le conducteur que ne l'est la sortie.

Lors de l'entrée, le conducteur a plus d'interactions à gérer simultanément pour éviter une collision avec l'habitacle. Le passage de la tête sous le toit se fait en même temps que l'assise dans le siège et l'entrée du pied gauche. De ce fait, il doit éviter les éléments de l'habitacle (volant, dossier et pied milieu) et le cas échéant contrôler son équilibre.

Pour la sortie, le passage de la tête sous le toit se fait très tôt dans le mouvement alors que les participants sont toujours assis dans le siège. De ce fait, le conducteur n'a pas besoin de contrôler son équilibre et il n'a pas d'autres collisions avec l'habitacle à gérer simultanément. Etant encore assis au milieu du siège (donc éloigné du toit), et ayant pivoté face à l'espace entre le volant et le siège, il est donc en posture stable assis et n'est pas gêné dans son mouvement par les éléments de l'habitacle (volant, montant, toit) pour fléchir le dos (cf. Figure 79).

- **Une petite femme n'identifie pas une hauteur de toit plus basse qu'un grand homme**

Le résultat le plus inattendu de cette étude est que les participants de petite stature réclament la même hauteur de toit que ceux de grande stature pour l'entrée/sortie de véhicule. Cette observation est surprenante considérant qu'une différence de 12 cm sépare la hauteur de buste du groupe des petites femmes de celui des grands hommes. L'étude de la cinématique du mouvement a permis d'apporter des éléments de réponse liés à la contrainte posturale quand la tête passe sous le toit et au pivotement du corps par rapport au siège, et à la proximité des éléments de l'habitacle,

Lors de l'entrée, l'analyse détaillée de la posture quand la tête passe sous le toit a ainsi montré que les petits participants ont adopté une posture plus droite/redressée que les grands. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'espace autour du siège est plus réduit pour les petites statures en raison de la position plus avancée du siège dans l'habitacle. Ce positionnement fait qu'ils disposent de moins d'espace que ceux de grande stature pour fléchir leur tronc car ils sont gênés dans leur mouvement par le volant et le montant. L'analyse de la distance entre le buste et le volant et de la distance de la tête au montant montre que les participants de petite stature sont en moyenne à 77 mm plus proches du volant et à 15 mm du montant que ceux de grande stature alors qu'ils ont moins fléchi le tronc.

Enfin, les résultats de l'étude du pivotement du corps par rapport au siège montrent que les participants de grande stature ont plus pivoté dans le siège que ceux de petite stature et ce d'autant plus que la hauteur d'assise est importante. Ainsi, déjà moins gênés par la proximité du volant et du montant, les grandes statures ont en outre la possibilité de fléchir/pivoter plus aisément le dos.

L'analyse de la chronologie du mouvement a montré que le passage sous le toit des petites femmes se faisait en même temps que l'entrée du pied gauche à l'intérieur de l'habitacle. Toutefois, il apparait du Tableau 47, que la flexion de la hanche gauche est en moyenne aussi importante pour tous les groupes de stature ($p>0.05$). Ceci laisse supposer que les petites femmes et les hommes grands ont donc été autant gênés par la présence de la cuisse pour la flexion du dos.

- **Les participants n'identifient pas des hauteurs de toit différentes suivant que l'assise du siège est plus ou moins haute.**

Il a également été observé que les hauteurs de toit identifiées par les volontaires sont proches pour les trois hauteurs d'assise.

Tout d'abord, la même position de siège a été conservée pendant toute l'expérimentation. Quand la tête passe sous le toit, les participants sont toujours assis dans le siège et l'espace entre le volant et le siège est donc resté le même pour toutes les configurations testées. Ce choix était motivé par le fait que la distance entre le volant et le haut du corps du conducteur est principalement déterminé par la longueur des bras.

Par ailleurs, les résultats de l'analyse des hauteurs de toit normées par la hauteur de buste montrent que les participants n'ont pas plus fléchi le buste pour l'une des hauteurs d'assise. Ces résultats sont confirmés par ceux de la cinématique de mouvement montrant que même si la hauteur d'assise a un effet sur la flexion du dos et de la tête, cet effet est relativement faible, puisque 4° séparent les valeurs de *Hs1* et de *Hs3*.

- **Une modification de la hauteur de toit n'a pas d'incidence que sur la flexion du cou**

Les résultats de la cinématique du mouvement, montrent qu'une modification de la hauteur de toit n'a d'effet significatif que sur la flexion du cou et ce quels que soient les groupes de stature des participants et la hauteur d'assise. En effet, la posture générale adoptée par les participants est très similaire pour les deux hauteurs de toit *Ht1* et *Ht2* et notamment pour l'utilisation et l'évitement du volant, l'orientation du dos ou l'emplacement de l'assise sur le siège.

Le faible écart de 45 mm en moyenne (cf. Chapitre 4) enregistré entre les hauteurs *Ht1* et *Ht2*, s'explique par la flexion plus ou moins importante de la tête et seulement de celle-ci. En moyenne, une différence de 10 ° est observée entre ces deux hauteurs de toit pour la flexion du cou lors de l'entrée. Ceci tend également à confirmer que le mouvement du haut du corps est fortement contraint par l'espace disponible autour du siège.

5.2. Passage de la jambe sous le volant

La deuxième attente était de déterminer la gêne des participants par rapport au volant pour le passage de la jambe droite. Les principales observations de cette étude sont les suivantes :

- Le passage de la jambe droite sous le volant apparait plus critique pour l'entrée,
- Et les participants adoptent une stratégie différente selon leur stature.

Les résultats de l'analyse du mouvement ont permis de confirmer la gêne due au passage de la jambe sous le volant et de dégager les différentes stratégies de mouvement utilisées par les participants.

L'analyse de l'angle de pivot du genou droit montre que lors de l'entrée dans l'habitacle, le volant perturbe le décalage du bassin vers le milieu du siège. Le passage du genou droit de l'autre coté du volant se fait une fois assis dans le siège et le dos entré dans l'habitacle (à l'exception d'un seul participant). Au contraire, pour le mouvement de sortie, le volant occasionne une moindre gêne. Le passage du genou droit de l'autre côté du volant se fait en position assise et en début de mouvement de sortie (constaté pour la totalité des essais).

Les résultats mettent en avant que les participants adoptent une stratégie différente selon leur stature **pour l'entrée**. Ces résultats s'expliquent par le fait que pour les participants de grande taille (plus gênés par le volant) et pour l'assise la plus basse (avec la hauteur plancher/siège la plus faible), le passage de la jambe est plus compliqué car le volant bloque le passage de la cuisse droite d'un côté à l'autre. Le passage de la jambe se fait alors par pivotement du genou. Cette stratégie implique qu'ils sont assis au milieu du siège et qu'ils amènent le pied droit plus loin dans l'habitacle.
Au contraire pour les participants de petite stature (moins gênés par le volant), le passage de la jambe se fait plus aisément par décalage de la jambe d'un côté à l'autre du volant. Ils n'ont donc pas besoin de pivoter la hanche droite pour passer la jambe sous le volant. En outre comme les participants de petite stature ont tendance à s'assoir plus vers l'extérieure du siège, ceci a également l'avantage de ne pas perturber leur décalage dans le siège pour se mettre en posture de conduite.

Pour la sortie de l'habitacle, si les deux stratégies (décalage et pivotement) sont également utilisées par les participants et ce quelle que soit leur stature, les résultats de l'analyse du mouvement fait ressortir que la stratégie de pivotement (92% des essais) est largement privilégiée ; La stratégie de décalage ayant été utilisée par seulement trois participants.
Ces résultats montrent ainsi que pour limiter la gêne du volant, les participants commencent par décaler leur pied vers la droite (côté frein à main) avant de pivoter la jambe. La gêne avec le volant entraine alors un pivotement plus ou moins important du genou et la nécessité de prendre le temps de passer la jambe droite de l'autre côté du volant avant même de commencer à sortir le pied gauche de l'habitacle. Ceci est notamment observé pour les participants de grande stature et l'assise la plus basse.

5.3. Collision et gêne avec le bavolet

La troisième attente était de déterminer l'influence de la largeur du bavolet sur les mouvements d'entrée et de sortie de véhicule. L'analyse de la distance minimale entre la jambe gauche et le bavolet fait ressortir que la jambe est d'autant plus proche du bavolet que la largeur de ce dernier est importante, que les participants sont de petite stature et que l'assise est haute. Rappelons les résultats du Chapitre 4 sur les notes d'inconfort, qui montraient que les participants ont été d'autant plus gênés que le bavolet était large et ce que ce soit pour l'entrée ou la sortie de l'habitacle.

Pour l'entrée, les résultats indiquent que plus le bavolet est large plus les participants sont non seulement positionnés vers l'extérieur du siège mais qu'ils doivent ensuite se décaler au milieu du siège pour se mettre en posture de conduite.
Pour la sortie, ils prennent le temps de se décaler dans le siège et de tendre plus la jambe pour amener le pied au sol. Ils sont également obligés de prendre appui dessus. La gêne perçue par les participants provient non seulement du contact (plus ou moins important) entre le mollet et le bavolet, mais également du contact entre la cuisse et le siège généré par le fait de s'assoir sur le renfort avant et après le décalage pour l'entrée et la sortie.

Les résultats sur l'utilisation du volant ont également révélé que les participants ont besoin du volant pour se décaler dans le siège quand la largeur de bavolet est importante et notamment s'ils sont de petite stature et si l'assise est basse.

5.4. Rôle de l'appui sur le volant

Les principales observations concernant l'appui sur le volant sont les suivantes :

- Pour l'entrée, son utilisation est double : il sert non seulement à retenir la chute en permettant notamment de produire le couple d'extension nécessaire aux genoux, mais également une fois assis à se décaler dans le siège pour se mettre en posture de conduite au milieu du siège ;
- Pour la sortie : il est dans un premier temps utilisé pour permettre le décalage et le pivotement des participants dans le siège pour se mettre face à l'embrasure, et dans un second temps pour faciliter l'extraction du siège en participant à la production du couple d'extension nécessaire au genou gauche.

Les résultats montrent que l'utilisation du volant est dépendante de la stature des participants et de la hauteur d'assise. Sans surprise, le volant a été principalement utilisé pour l'assise la plus basse et les participants de grande stature et ce que ce soit pour l'entrée ou la sortie. Ces résultats s'expliquent par le fait que les participants de grande stature doivent fournir un plus grand effort pour retenir leur chute (bassin plus haut) et pour s'extraire du siège (poids plus important à soulever). Concernant la hauteur d'assise, pour l'entrée les participants commencent par s'assoir sur le renfort de l'assise et utilisent le volant ensuite pour se déplacer au milieu du siège, alors que pour la sortie les participants n'ont pas besoin de pousser sur les bras et les jambes pour se lever mais qu'à se laisser glisser sur le renfort du siège. Rappelons également, que l'assise la plus basse a été la plus mal notée par les participants.

Les résultats issus de l'analyse des couples articulaires ont montré que pour s'extraire du siège lors de la sortie, la contribution du volant est particulièrement élevée pour l'extension du genou gauche et dans une moindre mesure pour le genou droit. Ces résultats montrent que le volant tend à faciliter le mouvement en réduisant les efforts développés dans les jambes.

Toutefois, il ne nous semble pas possible d'aller plus loin dans l'analyse, et ce parce que les données cinématiques et dynamiques sont conditionnées par l'utilisation du volant par le participant. Si ce dernier n'avait pas utilisé le volant, le mouvement n'aurait pas été le même et le manque de cet appui aurait été compensé par une distribution de forces différente au niveau des jambes.

Dans un avenir proche, il serait intéressant d'étudier comment le volant intervient dans la gestion de l'équilibre et de quantifier la stabilité dynamique en prenant en compte non seulement la position du projeté du centre de masse mais également l'accélération du au mouvement.

CONCLUSION GENERALE
& PERSPECTIVES

1. **Principaux résultats** _____ **151**
2. **Limitations de l'étude** _____ **152**
3. **Perspectives de travail** _____ **152**

1. Principaux résultats

Depuis une vingtaine d'années, de nombreux travaux de recherche se sont intéressés au mouvement d'accessibilité à une automobile et les résultats obtenus ont permis de progresser non seulement dans la compréhension du mouvement mais également de l'inconfort qui lui est associé. La revue de la littérature nous a ouvert deux pistes de travail : 1/ la nécessité d'une analyse dynamique du mouvement pour mieux comprendre les interactions entre le conducteur et l'habitacle et l'inconfort perçu et 2/ l'utilisation du concept de mouvement neutre proposé par Dufour et Wang [DUF_05] pour expliquer les effets des paramètres de l'habitacle. Dans ce travail de thèse, nous avons décidé de nous concentrer sur l'étude de la hauteur de toit et de la largeur de bavolet.

Une expérimentation a été menée pour étudier l'effet de ces paramètres sur le mouvement d'accessibilité. Les mouvements et les efforts de contact des 26 hommes et femmes volontaires de différente stature ont été capturés entrant et sortant d'un conformateur à géométrie variable. Trois hauteurs de toit (de la moins inconfortable à la dernière acceptable) et trois largeurs de bavolet autour de trois hauteurs d'assise représentant une sportive, une berline et un monospace, ont été étudiées. La gêne ressentie a également été relevée avec l'attribution d'une note utilisant l'échelle d'inconfort CP-50 et l'identification par les participants des éléments de l'habitacle gênants et de leurs parties corporelles gênées. Les données recueillies ont été reconstruites pour obtenir les angles articulaires par cinématique inverse et les couples articulaires par dynamique inverse à partir d'un l'algorithme récursif de Newton-Euler.

L'analyse des données relatives aux questionnaires d'inconfort a mis en évidence les éléments perturbateurs de l'accessibilité, et notamment la largeur de bavolet pour les participants de petite stature, le volant pour ceux de grande stature et la hauteur de toit pour l'assise la plus basse.
Les résultats ont également montré que toutes les hauteurs de toit et largeurs de bavolet intermédiaires ont été notées de la même manière que respectivement la première hauteur de toit gênante et la largeur de bavolet la plus petite. Ceci laisse à penser, qu'il pourrait y avoir un effet de seuil dans la gêne. Ainsi, jusqu'à une certaine hauteur de toit (ou largeur de bavolet), les participants ressentent un niveau de gêne similaire. Au delà, l'inconfort augmente alors de manière notoire.

De l'identification des hauteurs de toit de premier gêne et la plus basse acceptable, deux observations se révèlent intéressantes. La première est qu'un conducteur de petite taille exige presque la même hauteur de toit qu'un de grande taille pour toutes les hauteurs d'assise, et ce bien que 120 mm séparent leur hauteur de buste. La deuxième est qu'un abaissement de seulement 45 mm du toit fait qu'un véhicule passe d'un inconfort acceptable à inacceptable pour le conducteur. La hauteur de toit doit donc être définie avec attention lors de la conception d'un habitacle.

Pour expliquer ces résultats, une analyse biomécanique du mouvement a été réalisée, utilisant les paramètres biomécaniques (angles et couples articulaires) obtenus de la reconstruction de mouvement. L'analyse détaillée de la posture quand la tête passe sous le toit montre que les petits participants ont le haut du corps plus redressé que les grands. Ceci étant principalement du à un espace plus restreint entre le volant et le siège pour les participants de petite stature. En outre, les participants de grande stature pivotent plus le haut du corps dans le siège pour se mettre face à l'embrasure que ceux de petite stature, suggérant qu'ils sont moins gênés par l'évitement du montant. De plus, il apparait que la hauteur de toit affecte seulement la flexion du cou, expliquant que seuls 45 mm séparent la première hauteur de toit gênante de la dernière acceptable. La posture du corps entre ces hauteurs reste proche.

Concernant l'influence de la largeur de bavolet, l'analyse des questionnaires d'inconfort a confirmé la criticité de ce paramètre et en particulier pour les participants de petite stature, qui sont gênés par le contact entre le bavolet et le mollet lors de la sortie. L'analyse biomécanique du mouvement a montré, et ce pour l'entrée et la sortie, que la variation de la largeur de bavolet implique une translation latérale

du corps. Aussi, plus la largeur de bavolet était importante plus les participants s'asseyaient vers l'extérieur du siège et ce sans modifier leur posture générale.

Notre travail a également permis de mettre en avant la dualité du rôle du volant dans le mouvement d'accessibilité. En effet, si l'appui sur le volant intervient de manière positive sur le mouvement afin de réduire les efforts développés dans le membre inférieur et ce pour retenir la chute lors de l'entrée et pour s'extraire du siège lors de la sortie, il est également perçu comme un élément fortement perturbateur lors du passage de jambe droite obligeant le conducteur quand il est notamment de grande taille et sur une assise basse à ajuster sa posture.

L'analyse du mouvement a finalement montré que la gêne engendrée par l'entrée est liée à des facteurs différents de ceux pour de la sortie. Pour le mouvement d'entrée, la difficulté vient principalement de la gestion simultanée des différentes interactions du conducteur avec l'habitacle : le passage de la tête sous le toit se faisant en même temps que l'assise dans le siège, l'évitement du pied milieu, et l'entrée du pied gauche à l'intérieur de l'habitacle. Pour le mouvement de sortie, la principale difficulté est due aux efforts à développer dans les jambes pour s'extraire du siège ; le passage de la tête à travers l'embrasure intervenant lorsque les participants sont encore assis dans le siège et alors qu'ils ont pris le temps de pivoter le haut du corps pour ne pas être gênés dans leur mouvement par les éléments de l'habitacle (volant, montant, toit) pour fléchir le dos.

2. Limitations de l'étude

On peut tout d'abord imaginer qu'il y existe une **différence entre le mouvement capturé expérimentalement et celui réalisé réellement** par les participants. En effet, le conformateur n'étant pas équipé de l'ensemble du tableau de bord d'un véhicule, le mouvement du membre inférieur a pu être moins contraint. De plus, pour capturer le mouvement, des marqueurs étaient scotchés sur la peau des participants. Les participants ne pouvaient donc pas porter leurs vêtements habituels (blouson, robe, etc.) et leur sac (à main, cartable, etc.).

Nous avons souhaité pour cette étude relever tous les efforts externes entre le conducteur et l'habitacle, afin de calculer par dynamique inverse les couples articulaires développés. Si ce choix a permis de prendre en compte les paramètres dynamiques, il a également entraîné une **contrainte sur la stratégie de mouvement** des participants, les obligeant à utiliser la « stratégie à un pied » pour ne pas avoir de double contact sur la plate-forme de force au sol. De même, dans cette étude, l'action d'ouverture de porte n'a pas été non plus étudiée, alors que l'étude préliminaire a montré qu'elle affecte le mouvement d'entrée et de sortie.

La dernière limite est liée au fait que la même **position de siège a été conservée pour toutes les configurations pour un même sujet**. Cela implique que l'espace entre le siège et le volant reste le même pour toutes les configurations testées. Pour rappel, ce choix a été motivé par le fait que la distance entre le volant et le haut du corps est principalement déterminée par la longueur de main-épaule (Reed et al. [REE_00]). Pourtant ceci n'est pas complètement vrai au regard des véhicules réels (pour lesquels la position et l'orientation du volant peuvent changer) et de la posture du conducteur qui peut varier pour différentes raisons d'une configuration à une autre (visibilité de l'avant du véhicule, position du pédalier, position du levier de vitesse, etc.). Si on regarde en particulier la position du point le plus bas du volant pour les configurations de l'étude, la variation est au maximum de 25 mm suivant l'axe X (avant-arrière) et de 2 mm suivant l'axe vertical Z. L'orientation du volant peut quant à elle varier jusqu'à 10° entrainant ainsi une prise en main différente du volant et donc une posture de conduite différente.

3. Perspectives de travail

En conclusion de ce travail, nous avons dégagé quelques pistes travail qui semblent pertinentes pour poursuivre notre compréhension du mouvement d'accessibilité et pour aider les constructeurs à tenir compte des contraintes liées au mouvement d'accessibilité lors du processus de conception.

A ce stade d'avancement des travaux, on pourrait encore approfondir l'analyse biomécanique du mouvement en regardant les points suivant.

Tout d'abord, il apparait nécessaire de regarder comment se positionne la **flexion du cou par rapport à la butée articulaire** pour les hauteurs *Ht1* et *Ht2*. En effet, au début de l'expérimentation, il était demandé aux volontaires d'effectuer une série de mouvements spécifiques, pour définir notamment les amplitudes maximales de flexion du cou. Il serait intéressant de regarder, si les participants se sont approchés de leur butée articulaire lorsqu'ils passent leur tête sous le toit, ou s'ils avaient encore de la marge, mettant dans ce cas en avant la contrainte de proximité des éléments de l'habitacle.

Il nous semble également intéressant d'étudier **les couples articulaires développés lors du mouvement d'entrée** et en particulier lors de la phase d'assise. Nous pourrions ainsi savoir quelles sont les articulations les plus sollicitées pendant la phase de transfert du poids de l'extérieur vers l'intérieur de l'habitacle, et si le mouvement d'entrée demande autant d'efforts que celui de la sortie.

On pourrait également étudier **la gestion d'équilibre** pendant le transfert de masse du corps de l'extérieur à l'intérieur de l'habitacle pendant le mouvement d'entrée. Ceci nous permettrait notamment de poursuivre notre compréhension du rôle du volant, et de voir si le volant est pris en main pour aider au maintien de l'équilibre.

Pour pouvoir proposer un modèle d'inconfort, il nous faut également étudier le **lien entre les notes d'inconfort attribuées par les participants et les couples articulaires développés**. Par exemple, de premier abord, on se rend compte que l'assise la plus basse a été la plus mal notée par les participants et qu'elle a également les couples articulaires développés dans le membre inférieur les plus importants (et ce quelle que soit l'articulation).

A moyen terme, on pourrait initialiser une nouvelle étude expérimentale du mouvement d'accessibilité tenant compte des limitations préalablement énoncées et intégrant de nouvelles pistes de travail.

Pour limiter la durée de l'expérimentation, nous avons décidé d'étudier seulement trois paramètres géométriques (hauteur d'assise, hauteur de toit et largeur de bavolet) et ce uniquement suivant trois modalités dans cette étude. Pour les expérimentations à venir, il serait intéressant de travailler sur d'autres paramètres géométriques et en particulier sur la hauteur de bavolet et la position du pied milieu, ce dernier étant particulièrement gênant pour les conducteurs de grande stature.

Il pourrait également être intéressant de poursuivre l'expérimentation avec plus de participants en incluant d'autres catégories de population, tels que les **personnes âgées et à mobilité réduite**, qui sont les plus susceptibles de rencontrer des difficultés à éviter les collisions avec l'habitacle et à fournir un effort pour s'extraire du siège.

Concernant la compréhension du **rôle de possible appui sur le volant ou le siège** pour faciliter le mouvement et en particulier lors de la phase d'extraction du siège, nous imaginons comparer des mouvements réalisés par les participants en leur demandant dans un premier temps d'utiliser l'appui et dans un second temps de ne pas l'utiliser. Il sera alors possible d'observer les différences au niveau de la cinématique du mouvement (flexion du buste, utilisation des bras, etc.), des efforts de contact et des couples articulaires nets développés dans le membre inférieur. Ce travail a d'ores et déjà été initialisé pour un mouvement de « sit-to-stand », réalisé en frontal et en latéral (le plus proche de l'accessibilité) et sera présenté lors de la conférence de la Société de Biomécanique (Robert et al. [ROB_11]).

Par ailleurs, si pour cette expérimentation, nous avons fait le choix de réponses libres pour l'identification des causes d'inconfort directement relevées par l'expérimentateur donc en partie soumises à son interprétation (cf. Chapitre 4 §3.2.), il serait nécessaire de limiter le biais introduit par l'intervention de l'expérimentateur. Nous imaginons **introduire un questionnaire à choix multiples**.

En effet, grâce aux observations relevées, notre recul sur les causes d'inconfort est maintenant suffisant pour proposer un choix de réponses relativement exhaustif. Cette proposition a d'ores et déjà été utilisée dans le cadre d'un projet européen en cours (Digital Humans for Ergonomics design of products, DHErgo, www.dhergo.org), dont l'une des parties s'inscrit dans la continuité de ce travail de thèse et s'intéresse à l'influence des paramètres géométriques sur le mouvement et l'inconfort de personnes âgées lors de l'entrée/sortie.

Concernant **l'interaction des participants avec le siège**, les efforts appliqués sont relevés de manière quantitative à partir d'une plate-forme de force sous l'assise et qualitative avec les nappes de pression sur l'assise et le dossier. L'observation des mouvements réalisés a montré que les participants poussent sur le siège avec leur bras ou avec leur main pour s'aider à s'extraire du siège. Le problème avec l'instrumentation mise en place est que l'on peut savoir quelle quantité d'effort est appliquée de manière globale sur le siège, mais on n'est pas capable de dégager celle appliquée sur le dossier. Il serait intéressant de désolidariser l'assise du dossier et de les instrumenter indépendamment l'un de l'autre pour comprendre quel est le rôle du siège notamment pour la sortie.

Enfin, pour l'identification des deux hauteurs particulières, l'expérimentateur descendait le toit par paliers de 10 mm à partir de la hauteur initiale. Pour chaque palier, le participant devait s'insérer et s'extraire autant de fois qu'il le jugeait nécessaire pour décider si la hauteur de toit était, dans le cas de la hauteur *Ht1*, gênante ou pas, Certains participants ont donc testé jusqu'à 10 paliers, entrant et sortant pour chaque palier 5 à 6 à fois du conformateur. Ceci avait pour conséquence que l'expérimentation pouvait être plus ou moins longue suivant le nombre de paliers testés et pouvait devenir fastidieuse pour les participants. Il est donc nécessaire de **diminuer le nombre de mouvements réalisés par les participants**, notamment si on applique la démarche à plusieurs paramètres géométriques pendant l'expérimentation. Pour cela, nous imaginons motoriser les réglages du conformateur pour qu'il puisse être commandé par les participants eux-mêmes, et ainsi permettre de s'exempter de l'identification par paliers.

En ce qui concerne les perspectives à plus long terme, deux axes de travail sont envisageables.

Une étape majeure sera de travailler sur **la simulation du mouvement** en utilisant d'une part les données récoltées pour ce travail et d'autre part les résultats de l'analyse pour tenir compte des contraintes dynamiques telles que le maintien d'équilibre. Actuellement, la méthode de simulation de mouvement implémentée dans le logiciel RPx, un outil de simulation ergonomique développé par l'équipe ergonomie du LBMC en collaboration avec Renault (Monnier et al [MON_04]), prend en compte uniquement les contraintes géométriques.

Enfin, en lien avec la nécessité de la simulation dynamique du mouvement, une piste de travail découle de la difficulté du **relevé des efforts de contact**, et notamment du problème lié à l'appui simultané des deux mains sur le volant et du relevé des efforts délicats (contact du mollet avec le bavolet et du bras avec le dossier). Pour pouvoir étudier la dynamique du mouvement, il est nécessaire de connaître à chaque instant tous les efforts de contact. Si une des forces de contact manque, il n'est alors pas possible de calculer les couples articulaires par une approche de dynamique inverse. Nous avons donc d'ores et déjà commencé à travailler sur une méthode permettant d'estimer les efforts de contact dans le cas où ils ne sont/peuvent pas être mesurés. La méthode estime les efforts de contact à l'aide de critères d'optimisation et a d'ores et déjà été appliquée à des mouvements simples de « sit-to-stand » (Causse et al. [CAU_10]). L'étape suivante est d'approfondir la méthode et de l'appliquer au mouvement d'entrée/sortie de véhicule.

REFERENCES

[AIT_08] Ait El Menceur M., Pudlo P., Gorce P., 2008, "Alternative Movement Identification in the Automobile Ingress and Egress for Young and Elderly Population with or without Prostheses", International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 38, pp. 1078-1087.

[AND_97] Andreoni G., Rabuffetti M., Pedotti A., 2004, "New approaches to a car ergonomics evaluation oriented to virtual prototyping", Euro-BME Course on Methods & Technologies for the Study of Human Activity and Behaviour, Vol. 26(1), pp. 69-76.

[AND_04] Andreoni G., Rabuffetti M., Pedotti A., 2004, "Kinematics of head-trunk movements while entering and exiting a car", Ergonomics, ISSN 0014-0139, Vol. 47, pp. 343-359.

[BON_03] Bonnefoy A., 2003, "Modélisation cinématique et dynamique du membre inférieur : Estimation des forces musculaires et des réactions articulaires au cours de la phase d'appui de la marche", Mémoire de Thèse.

[BOT_01] Bothner K., Jensen J., 2001, "How do non-muscular torques contribute to the kinetics of postural recovery following a support surface translation?", Journal of Biomechanics, Vol. 34(1), pp. 245-250.

[CAP_96] Cappozzo A., Catani F., Leardini A., 1996, "Position and orientation in space of bones during movement: Experimental artefacts", Clinical Biomechanics, Vol. 11, pp. 90-100.

[CAU_09] **Causse J.**, Chateauroux E., Monnier G., Wang X., 2009, "Dynamic Analysis of Car Ingress/Egress Movement: an Experimental Protocol and Preliminary Results", SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, Vol. 2, pp. 1633-1640.

[CAU_10] **Causse J.**, Robert T., Monnier G., Wang X., 2010, "Missing contact forces estimation using dynamical criterion - Application to a sit-to-stand motion", Eleventh International Symposium on the 3-D Analysis of Human Movement, San Francisco, California, 14-16 July, 2010.

[CHA_01] Chaffin D., 2001, "Digital Human modeling for vehicle and workplace design", Society of Automotive Engineers Inc. ISBN: 0-7680-0687-2.

[CHA_05] Chaffin D., 2005, "Improving digital human modeling for proactive ergonomics in design", Ergonomics, Vol. 48(5), pp.478-491.

[CHA_07] Chateauroux., Wang X., Trasbot J., 2007, "A database of ingress/egress motions of elderly people", SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering, USA, SAE Paper 2007-01-2493.

[CHA_09] Chateauroux E., 2009, "Caractérisation des capacités fonctionnelles et modélisation du mouvement d'accessibilité à une automobile des personnes âgées", Mémoire de Thèse.

[CHA_10] Chateauroux E., Wang X., 2010, "Car egress analysis of younger and older drivers for motion simulation", Applied Ergonomics, Vol. 42, pp. 169-177.

[CHE_04] Chevalot N., Wang X., 2004, "Experimental investigation of the discomfort of arm reaching movements in seated position", SAE Transactions Journal of Aerospace, Vol. 1, pp. 270-276.

[CHE_06] Cherednichenko A., Assmann E., Bubb H., 2006, "Computational approach for entry simulation", SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering, USA, SAE Paper 2006-01-2358.

[CHI_05] Chiari L., Della Groce U., Leardini A., 2005, "Human movement analysis using stereophotogrammetry – Part 2: Instrumental error", Gait & Posture, Vol. 21, pp.197-211.

[DIC_05] Dickerson C., 2005, "A Biomechanical Analysis of Shoulder Loading and Effort During Load Transfer Tasks", Mémoire de Thèse, University of Michigan, Ann Arbor.

[DOR_01] Doriot N., 2001, "Modélisation dynamique du membre inférieur pour l'estimation des forces articulaires et musculaires mises en jeu pendant la phase d'appui de la marche", Mémoire de thèse de l'Université Claude Bernard – Lyon 1, Numéro d'ordre 259-2001.

[DOT_85] Department of Transport, 1985, "Ins and outs of car choice: A guide for elderly and disabled people", Department of Transport at the Transport and Road Laboratory.

[DUF_05] Dufour F., Wang X., 2005, "Discomfort of car ingress/egress motions using the concept of neutral movement", SAE Digital Human Modelling for Design and Engineering Conference, 2905-2914.

[DUM_07] Dumas R., Cheze L., 2007, "Adjustments to McConville et al. and Young et al. Body Segment Inertial Parameters", Journal of Biomechanics, Vol. 40, pp. 543-553.

[DEL_04] Dellmann N., Haslegrave C., Chaffin D., 2004, "Working postures and movements – tools for evaluation and engineering", London: Taylor & Francis.

[FRA_09] Fraysse F., 2009, "Estimation des activités musculaires au cours du movement en vue d'applications ergonomiques", Mémoire de thèse de l'Université Claude Bernard Lyon 1.

[GIA_97] Giacomin J., Quattrocolo S., 1997, "An analysis of human comfort when entering and exiting the rear seat of an automobile", Applied Ergonomics, Vol. 28, pp. 697-406.

[GRA_94] Gransitzki K., 1994, "Biomechanics of entering a car", Anthropological Institute, Second International Congress on Physiological Anthropology, University of Kiel, Germany.

[IPS_02] Enquête IPSOS-Siemens, 2002, www.ipsos.fr/CanalIpsos/articles/1006.asp.

[KAW_07] Kawachi K., Aoki K., Mochimaru M., 2005, "Visualisation and classification of strategy for entering car", SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering, SAE Paper 2005-01-2683.

[LAR_02] Larring J. Forsman M., Kadefors R., 2002, "MTM-based ergonomic workload analysis", International Journal of Industrial Ergonomocs, Vol. 30, pp. 135-148.

[LEG_96] Legnani G., Righettini P., 1996, "A homogeneous matrix approach to 3D kinematics and dynamics. Mechanisms and machine theory – Part 1: theory", Mechanisms and machine Theory, Vol. 31, pp. 573-587.

[LEM_06] Lempereur M., 2006, "Simulation du mouvement d'entrée dans un véhicule automobile", Rapport de thèse de l'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, Numéro d'ordre 06/04.

[MON_04] Monnier G., 2004, "Simulation de mouvements humains complexes et prédiction de l'inconfort associé – Application à l'évaluation ergonomique du bouclage de ceinture de sécurité ", Mémoire de thèse de l'INSA de Lyon, Numéro d'ordre 04-ISAL-0050.

[MON_06] Monnier G., Renard F., Chameroy A., Wang X, Trasbot J., 2006, "A motion simulation approach into a design engineering process", SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering, SAE Paper 2006-01-2359.

[MON_07] Monnier G., Wang X., Beurier G., 2007, "Coordination of Spine Degrees of freedom during a motion reconstruction", SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering, SAE Paper 2007-01-2454.

[MON_09] Monnier G., Chateauroux E., Wang X., 2009, "Inverse dynamic reconstruction of truck cabin ingress/egress motions", SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering, SAE Paper 09DHM-0066.

[PET_95] Petzall J., 1995, "The design of entrances of taxis for elderly and disabled passengers – An experimental study", Applied Ergonomics, Vol. 26(5), pp. 343-352.

[PUD_06] Pudlo P., Lempereur M., Gorce P., 2006, "Prediction of the car entering motion", SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering, SAE Paper 2006-01-2357.

[REE_00] Reed M., Manary M., Flannagan C., Schneider L., 2000, "Effects of Vehicle Interior Geometry and Anthropometric variables on Automobile Driving Posture", Human Factors, Vol. 42(4), pp. 541-552.

[REE_08] Reed M., Huang S., 2008, "Modeling vehicle ingress and egress using the human motion simulation framework", SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering, SAE Paper 2008-01-1896.

[RIG_06] Rigel S., 2006, "Entwicklung und Validierung einer Methode zur quantitativen Untersuchung der Ein- und Ausstiegsbewegung in einen Pkw", Mémoire de Thèse de l'Université Technique de Munich.

[ROB_07] Robert T., Cheze L., 2007, "Validation of net joint loads calculated by inverse dynamics in case of complex movements: Application to balance recovery movements", Journal of Biomechanics, Vol. 40, pp. 2450-2456.

[ROB_11] Robert T., **Causse J.**, Wang X., 2001, "Dynamics of sit-to-stand motions: effects of seat height, handle use and asymmetrical motions", Conférence de la Société de Biomécanique, France.

[SAE_89] SAE J826, 1989, "Devices for use in defining and measuring vehicle seating accommodation".

[SAE_97] Society of Automotive Engineers,1997. Automotive engineering handbook. Warrendale.

[SHA_69] Shackel B., Chidsey, K.D., Shipley P., 1969, "The assessment of chair comfort", Ergonomics, Vol. 12, pp. 269-306.

[SHE_97] Shen W., Parsons K., 1997, "Validity and reliability of rating scales for seated pressure discomfort", International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 20, pp. 441-461.

[STE_95] Sternini D., Cerrone M., 1995, "Setup of an experimental procedure for measuring the human body movements when entering and exiting the vehicle", Proceeding of the 3rd International Conference on Vehicle Comfort and Ergonomics, pp. 257-265.

[STO_82] Stobbe T.J., 1982, “The Development of a pratical strength testing program in industry”, Ph.D dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan.

[WEG_07] Wegner D., Chiang J., Kemmer B., 2007, “Digital human modelling requirements and standardization”, SAE International conference and exposition of Digital Human Modelling for Design and Engineering, SAE Paper 2007-01-2498.

[WAN_08] Wang X., 2008, “Contribution à la simulation du mouvement humain en vue d’application en ergonomie”, HDR de Biomécanique, Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs.

[WAN_11] Wang X., Pannetier R., Burra N, Numa J, 2011, “A biomechanical approach for evaluating motion related discomfort: illustration by an application to pedal clutching movement. Third International Conference on Digital Human Modeling, Orlando, USA, 9-14 July, 2011.

[ZHA_96] Zhang L., Helander M., Drury C., 1996, “Identifying factors of comfort and discomfort in sitting”, Human Factors, Vol. 38(3), pp. 377-389.

COMMUNICATIONS DE L'AUTEUR

Causse J., Chateauroux E., Monnier G., Wang X., 2009, "Dynamic Analysis of Car Ingress/Egress Movement: an Experimental Protocol and Preliminary Results", SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, Vol. 2, pp. 1633-1640.

Causse J., Robert T., Monnier G., Wang X., 2010, "Missing contact forces estimation using dynamical criterion - Application to a sit-to-stand motion", **Best Paper Award**, Eleventh International Symposium on the 3-D Analysis of Human Movement, San Francisco, USA.

Causse J., Wang X., Denninger L., 2011, "Effects of roof height on car ingress/egress movement", 1st International Symposium of the Digital Human Modelling (IEA DHM), Lyon, France.

Causse J., Wang X., Denninger L., 2011, "Use of the steering wheel during the car egress motion", Congress of the International Society of Biomechanics, Brussels, Belgium.

Robert T., **Causse J.**, Wang X., 2011, "Inverse dynamics with missing contact forces. Application to the sit-to-stand motion", Euromech Conference on Biomechanics of Human Motion / New Frontiers of Multibody /Techniques for Clinical, Ponta Delgada, Portugal.

Robert T., **Causse J.**, Wang X., 2011, "Dynamics of sit-to-stand motions: effects of seat height, handle use and asymmetrical motions", Conférence de la Société de Biomécanique, Besançon, France.

Robert T., Qiu Z., **Causse J.**, Ascande A., 2011, "A dynamic stability analysis of the sit-to-stand transfer", Congress of the International Society of Biomechanics, Brussels, Belgium.

TITRE en français

Analyse cinématique et dynamique du mouvement d'accessibilité à une automobile

RESUME en français

Ce travail de thèse vise à comprendre les effets des paramètres de conception de l'habitacle automobile tels que la hauteur de toit et la largeur du bavolet sur le mouvement d'entrée et de sortie et sur l'inconfort perçu. La méthode consiste à comparer expérimentalement des mouvements de moindre inconfort avec d'autres plus contraignants en modifiant la géométrie de l'habitacle. Grâce à un conformateur à géométrie variable, 5 configurations de postes de conduite sont définies sur 3 hauteurs d'assise représentant une sportive, une berline et un monospace. Le système optoélectronique Vicon et des capteurs d'efforts sont utilisés pour mesurer le mouvement et toutes les forces de contact, permettant une analyse fine des interactions entre les sujets et le conformateur. 26 sujets ont participé à l'expérimentation, dont la taille varie du 5ème percentile femme au 95ème homme. A l'aide d'un mannequin numérique, la cinématique (angles articulaires) et la dynamique (couples articulaires) du mouvement sont reconstruites. Les résultats montrent que l'exigence en hauteur de toit dépend peu de la stature et de la hauteur de siège. L'analyse biomécanique du mouvement révèle que les grandes statures présentent une plus forte flexion du tronc que les petites statures. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'espace autour du siège est plus réduit pour les petites statures en raison de la position plus avancée du siège dans l'habitacle. Un abaissement de seulement 45mm du toit fait qu'un véhicule devient inacceptable pour le conducteur. Le volant joue un rôle essentiel pour l'accessibilité, pour produire le couple d'extension nécessaire au genou gauche pour s'extraire du véhicule.

TITRE en anglais

Kinematic and dynamic analysis of the car ingress/egress movement

RESUME en anglais

This PhD thesis aims at understanding the effects of the roof height and the sill width on the car ingress/egress motion and the perceived discomfort. The method consists in comparing experimentally the less constrained motion with more constrained ones by controlling design parameters. Thanks to an adjustable car mock-up, 3 configurations of roof height and sill width were tested by volunteers on three seat heights representing a small car, a medium-size car and a minivan. A Vicon motion capture system and 6-axes force sensors were used in order to measure the motion and all external contact forces and to allow an accurate analysis of the interactions between the driver and the car. 26 volunteers participated in the experiment, selected according to their stature in order to cover a large range of the French driver (from 5^{th} percentile female to 95^{th} percentile male). Using a Digital Human Model, the kinematics (joint angles) and the dynamics (joint torques) of the motion were reconstructed. The results show that the demand for the roof height is not influenced by the car configuration nor the volunteer's stature. A biomechanical analysis highlights that the short volunteers adopt a more upright trunk than the tall ones due to smaller space available between the seat and the steering wheel for short persons. In addition, a small change of 45 mm in roof height may lead to an unacceptable car configuration. Finally, the steering wheel is an essential car element helping drivers to produce the necessary extension torque at the left knee for getting up.

DISCIPLINE

Génie Mécanique – Option Biomécanique

MOTS-CLES

Ergonomie, Accessibilité, Inconfort, Automobile, Analyse du mouvement

INTITULE ET ADRESSE DE L'U.F.R. OU DU LABORATOIRE

LBMC - Laboratoire de Biomécanique et Mécanique des Chocs (UMR-T 9406)
25, avenue François Mitterrand – Case 24
F-69675 Bron, France.