




expérimentations  
navettes autonomes

# Synthèse sur la Dynamique des NA vis-à-vis du Confort postural et du Risque de chute des Passagers

Ce projet a été financé par le Gouvernement dans le cadre du Programme d'investissements d'avenir désormais intégré à France 2030, et opéré par l'ADEME



Appel à projet EVRA Expérimentation du véhicule routier autonome  
Convention de contractualisation n° 1982C0050

Projet labellisé par 



## **Information**

Livrable L3.3.2

Version 1.1 : Approuvée Copil ENA

Date : 09.12.2022

Niveau de diffusion : Public

## **Auteurs**

Daniel Lechner – Université Gustave Eiffel

Thomas Robert – Université Gustave Eiffel

Mael Bergé – Université Gustave Eiffel

Sébastien Domestici – Université Gustave Eiffel

## **Relecteurs**

Philippe Vezin – Université Gustave Eiffel

Astrid Bocher – Université Gustave Eiffel

## **Coordinateur**

Philippe Vezin – Université Gustave Eiffel

Université Gustave Eiffel

Cité des mobilités - 25 av. François Mitterrand, Case 24

69675 Bron Cedex

France

Tel: +33 4 72 14 23 79

Email : [philippe.vezin@univ-eiffel.fr](mailto:philippe.vezin@univ-eiffel.fr)

[www.experimentations-navettes-autonomes.fr](http://www.experimentations-navettes-autonomes.fr)



## Avertissement

Les informations contenues dans ce document sont fournies « en l'état » et aucune garantie n'est donnée quant à leur adéquation à un usage particulier. Les membres du consortium ne seront pas responsables des dommages de toute nature, y compris, sans limitation, les dommages directs, spéciaux, indirects ou consécutifs qui peuvent résulter de l'utilisation de ces matériaux, sous réserve de toute responsabilité obligatoire en raison de la loi applicable. Bien que les efforts aient été coordonnés, les résultats ne reflètent pas nécessairement l'opinion de tous les membres du consortium ENA.

© 2020 Consortium ENA



# RESUME EXECUTIF

Ce livrable est le second de la tâche T3.3 d'ENA dont l'objectif est d'étudier l'inconfort et le risque de chute des passagers induits par la dynamique de la navette (accélérations, virages, freinages, ...).

Il est organisé en quatre grandes parties.

La première partie est consacrée à la présentation des essais réalisés avec des passagers de navette dans la tâche 3.3 : essais sur les pistes de TRANSPOLIS et essais en exploitation sur l'expérimentation de CASA. Il s'agit essentiellement d'un rappel en ce qui concerne les essais sur piste à TRANSPOLIS (déjà décrit dans le livrable L3.3.1). Pour les expérimentations réalisées en exploitation à CASA, nous présentons le protocole et quelques éléments de ressentis passagers. Ces derniers indiquent que la dynamique de la navette lors des nombreux événements (freinages intempestifs principalement dus aux interactions avec les autres usagers de la route) avait un impact négatif sur le ressenti de la navette par les usagers (confort perçu et acceptabilité).

La deuxième partie se concentre sur l'analyse des dynamiques de la navette lors des différentes conditions expérimentales testées. Il en ressort qu'en fonctionnement nominal, la navette a un comportement très reproductible, avec des dynamiques relativement faibles n'engendrant pas de problèmes particuliers pour les passagers. En revanche, une modification des caractéristiques de pilotage (augmentation des accélérations de consigne par exemple) engendre des dynamiques plus violentes, moins bien contrôlées, qui sont moins bien acceptées par les passagers. Les dynamiques lors des phases de transitions entre ligne droite et virage impliquant des variations de vitesse sont elles aussi source d'inconfort et de déséquilibre. Enfin, les phases "dégradées" (freinages violents ou freinage d'urgence) engendrent des dynamiques navette violentes, avec pour conséquence des dynamiques passagers à l'intérieur de la navette relativement importantes et potentiellement problématiques (cf. partie suivante). Or ces phases apparaissent relativement fréquemment lors des essais en exploitation mais aussi lors d'essais sur pistes fermées.

La troisième partie se concentre sur l'analyse de la dynamique des passagers debout induite par ces accélérations/décélérations de la navette. Il ressort que les passagers debout peuvent subir des sollicitations très brutales et même dangereuses, avec des risques de déséquilibres et de chutes importants, lorsque la navette effectue des freinages intempestifs. Ces observations ont été faites aussi bien lors des freinages d'urgence réalisés sur les pistes de TRANSPOLIS que lors des essais en exploitation à CASA.

Dans une quatrième partie, nous présentons un modèle permettant d'estimer l'occurrence d'événements indésirables pour les passagers à partir de la connaissance de la dynamique de la navette. Ce modèle, basé sur les données expérimentales (apprentissage machine) a ensuite été appliqué aux données collectées lors de situations de roulage (circuits sur les pistes de TRANSPOLIS ou essais en exploitation à CASA). Il permet de faire ressortir une fréquence d'événements indésirables importante sur CASA, confirmant les observations qualitatives et le ressenti passagers. Il permet aussi d'évaluer l'impact de mesure de mitigation de l'inconfort et du déséquilibre ressenti par les passagers en travaillant sur les caractéristiques des profils de décélération de la navette lors de situations dégradées.

Ce rapport se conclut par une liste de recommandations pour le développement futur des navettes autonomes et pour la mise en place d'éventuelles nouvelles situations d'exploitation.





# TABLES DES MATIERES

Tables des Matières.....	i
1. INTRODUCTION.....	1
2. EXPERIMENTATIONS .....	3
2.1. RAPPEL DE L'EXPERIMENTATION SUR LES PISTES DE TRANSPOLIS .....	3
2.2. EXPERIMENTATION EN SERVICE A CASA .....	5
2.2.1. Présentation générale .....	5
2.2.2. Analyse du ressenti des passagers .....	7
2.2.3. Bilan .....	10
3. ANALYSE DE LA DYNAMIQUE D'UNE NAVETTE AUTONOME.....	11
3.1. SYNTHESE DES PERFORMANCES DYNAMIQUES DE LA NAVETTE UTILISEE .....	11
3.1.1. Préambule .....	11
3.1.2. Les phases de démarrage .....	12
3.1.3. Les phases de freinage .....	13
3.1.4. Le franchissement des virages.....	16
3.2. DYNAMIQUE DE LA NAVETTE EN EXPLOITATION EN FONCTIONNEMENT NOMINAL.....	17
4. SYNTHESE DES SOLLICITATIONS DYNAMIQUES D'UN SUJET HUMAIN.....	21
4.1. MOUVEMENTS DE REFERENCE.....	21
4.1.1. Objectifs.....	21
4.1.2. Mouvement de pivotement latéral droite/gauche (faire la roue) .....	23
4.1.3. Mouvement de lacet .....	25
4.1.4. Alternance D/G.....	25
4.1.5. Sauter sur place .....	27
4.1.6. Taper du pied.....	28
4.1.7. Bilan .....	30
4.2. SYNTHESE DES SOLLICITATIONS DYNAMIQUES DES PASSAGERS DE LA NAVETTE EN FREINAGE D'URGENCE .....	30
4.2.1. Préambule .....	30
4.2.2. Les passagers assis.....	31
4.2.3. Les passagers debout face ou dos au mouvement .....	33
4.2.4. Les passagers debout en position latérale .....	35
4.2.5. Synthèse .....	37

4.3.	SYNTHESE DES SOLLICITATIONS DYNAMIQUES DES PASSAGERS DE LA NAVETTE LORS DE FREINAGES INTEMPESTIFS.....	38
4.4.	SOLLICITATIONS DYNAMIQUES DES PASSAGERS LORS DE FREINAGES INTEMPESTIFS EN EXPLOITATION.....	44
5.	UN MODELE DE PREDICTION D'EVENEMENTS INDESIRABLES A PARTIR DES DYNAMIQUES NAVETTE ...	49
5.1.	OBJECTIF.....	49
5.2.	METHODE.....	49
5.2.1.	Données d'apprentissage.....	49
5.2.2.	Modèle utilisé et apprentissage.....	50
5.2.3.	Utilisation du modèle sur des situations "réalistes" .....	50
5.3.	RESULTATS.....	50
5.3.1.	Performances Apprentissage .....	50
5.3.2.	Performance du modèle sur circuit .....	51
5.3.3.	Détection des évènements indésirables en exploitation.....	53
5.4.	COMMENT AMELIORER LA DYNAMIQUE DE LA NAVETTE : UTILISATION DU MODELE POUR EVALUER L'INFLUENCE DES PARAMETRES DYNAMIQUES ?.....	54
5.5.	BILAN.....	54
6.	Conclusions / Recommandations .....	55

# 1. INTRODUCTION

Ce livrable est le second de la tâche T3.3 d'ENA dont l'objectif est d'étudier l'inconfort et le risque de chute des passagers induits par la dynamique de la navette (accélérations, virages, freinages, ...).

Il est organisé en quatre grandes parties :

- 1) la présentation des essais réalisés sur les pistes de TRANSPOLIS (rappel) et en exploitation sur l'expérimentation de CASA;
- 2) l'analyse des dynamiques de la navette dans différentes configurations (essais sur piste et en exploitation);
- 3) l'analyse de la dynamique des passagers debout induite par ces accélérations/décélérations de la navette ; 4°) la présentation d'un modèle de prédiction d'évènements indésirables à partir des dynamiques navette.

Un bilan global de la tâche et des recommandations pour le lot 5 complètent ce livrable.



## 2. EXPERIMENTATIONS

### 2.1. RAPPEL DE L'EXPERIMENTATION SUR LES PISTES DE TRANSPOLIS

Celui-ci a été détaillé dans le livrable L3.3.1 du projet. Nous reprenons ici les éléments nécessaires à la compréhension des résultats présentés dans les paragraphes suivants.

Vingt-trois personnes ont pris part à cette étude. Elles avaient pour consignes de se placer selon 6 positions différentes : 4 debout face ou dos par rapport au mouvement de la navette (notées DF et DD dans la suite de ce rapport) ou perpendiculairement au mouvement de la navette en faisant face ou dos aux portières (notées DLF et DLD) et 2 positions assises face ou dos par rapport au sens de déplacement de la navette pendant que celle-ci effectuait des manœuvres dites "unitaires" (ligne droite et/ou virage, avec des réglages de vitesse et d'accélération bien spécifiques) et des tours de circuit. Les Figure 1 et Figure 2 présentent respectivement la navette et le plan des circuits.



FIGURE 1 : AUTONOM SHUTTLE, ARMA, NAVYA

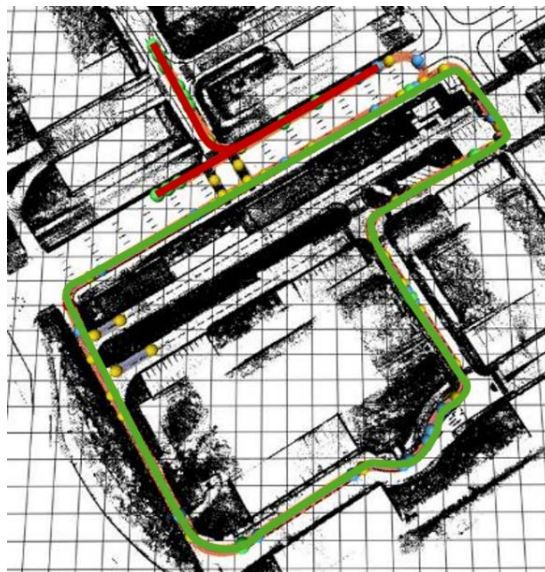
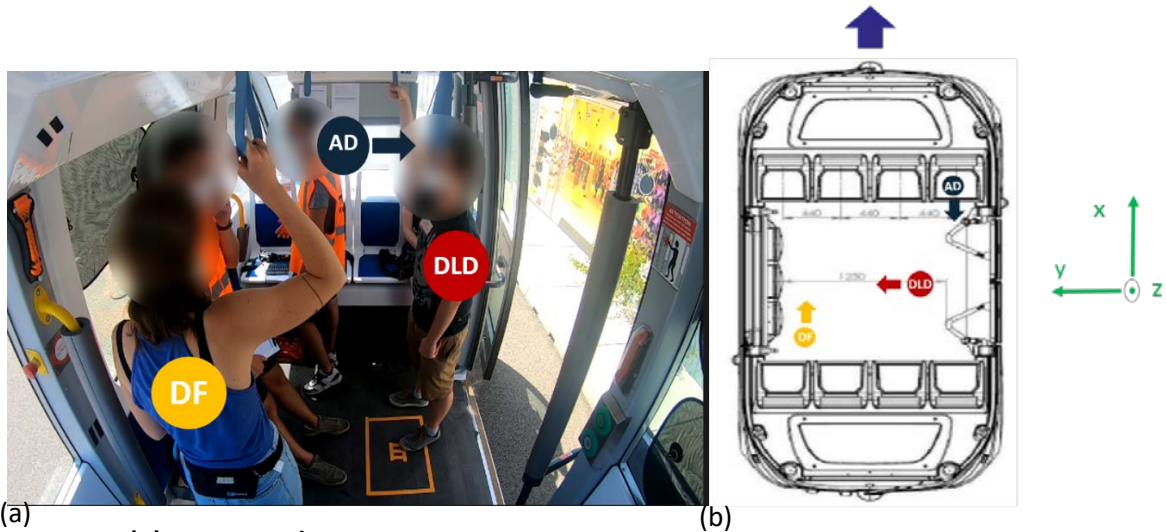


FIGURE 2 : CARTOGRAPHIE DES PISTES DE TRANSPOLIS. EN VERT, LE PARCOURS DE LA NAVETTE POUR LES CIRCUITS. EN ROUGE, LES TRAJETS DE LA NAVETTE DURANT LES ESSAIS UNITAIRES AVEC OU SANS VIRAGE.

La Figure 3 et la Figure 4 récapitulent les positions des passagers.

Positions des "Allers" de la navette :

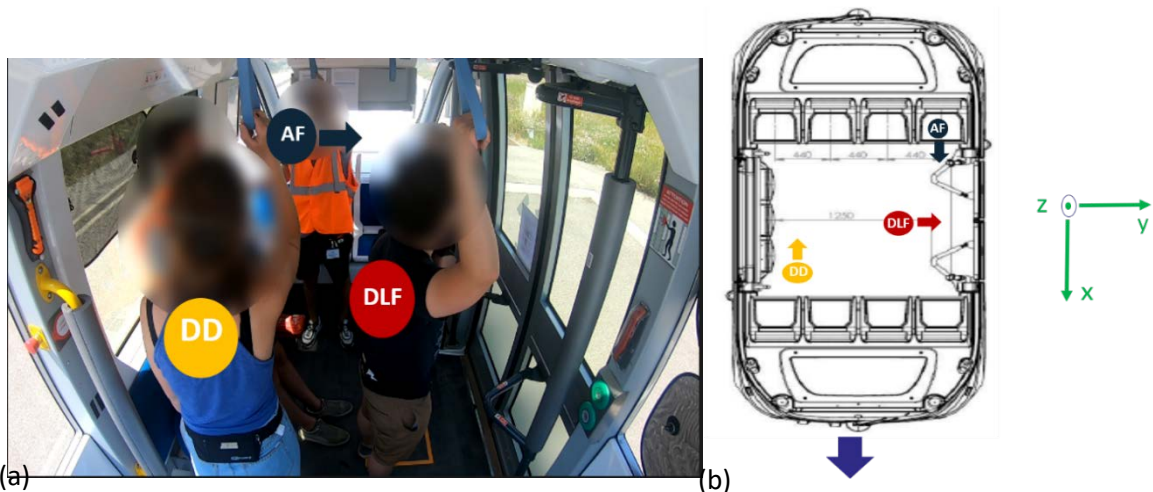
- **AD** : Assis **D**os au sens de la marche
- **DLD** : Debout **L**atéralement au sens de la marche et **D**os aux portes
- **DF** : Debout **F**ace au sens de la marche



**FIGURE 3 : (A) PHOTO DE L'HABITACLE DE LA NAVETTE POUR UN ALLER AVEC LE NOM DES POSITIONS SUR LES PARTICIPANTS ; (B) SCHEMA DE LA NAVETTE AVEC LE POSITIONNEMENT DES PARTICIPANTS ET AVEC → REPRESENTANT LE SENS DE MARCHÉ DE LA NAVETTE ET L'ORIENTATION DES PARTICIPANTS DURANT UN ALLER. EN VERT, ON RETROUVE LE REPERE GLOBAL DE L'ESSAI.**

Positions des Retours de la navette

- **AF** : Assis **F**ace au sens de la marche
- **DLF** : Debout **L**atéralement au sens de la marche et **F**ace aux portes
- **DD** : Debout **D**os au sens de la marche



**FIGURE 4 : (A) PHOTO DE L'HABITACLE DE LA NAVETTE POUR UN RETOUR AVEC LE NOM DES POSITIONS SUR LES PARTICIPANTS, (LE PARTICIPANT EN AF ASSIS EST DERRIERE LE PARTICIPANT EN DLF) ; (B) SCHEMA DE LA NAVETTE AVEC LE POSITIONNEMENT DES PARTICIPANTS ET AVEC → REPRESENTANT LE SENS DE MARCHÉ DE LA NAVETTE ET L'ORIENTATION DES PARTICIPANTS DURANT UN RETOUR. EN VERT, ON RETROUVE LE REPERE GLOBAL DE L'ESSAI.**

Durant ces expérimentations, la navette était utilisée en mode autonome, elle est alors programmée pour suivre un trajet prédéfini (rail virtuel) avec des consignes de vitesse définies par tronçons.

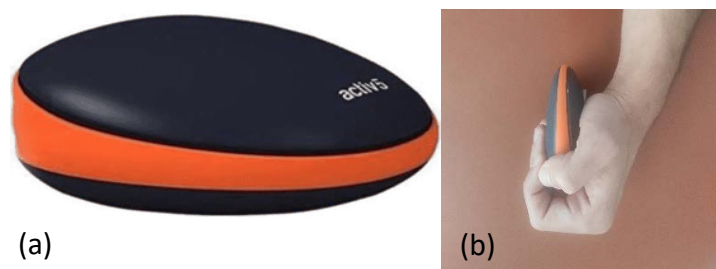
Cette navette est équipée d'un "patch" développé par Navya à notre demande lors de son acquisition par l'Université Gustave Eiffel, permettant de modifier les consignes d'accélération et de décélération longitudinale (hors freinage d'urgence). Trois réglages ont été utilisés (voir Tableau 1 ci-dessous), le réglage Reg1 est celui utilisé en exploitation sur des sites réels. En revanche, nous n'avons pas accès à la gestion des transitions entre les tronçons successifs des parcours.

**TABEAU 1 : COMBINAISONS TESTEES DES REGLAGES DE LA CONSIGNE D'ACCELERATION ET DE DECELERATION**

Réglages	Accélération	Décélération
Réglage nominal (Reg1)	0.3 m/s <sup>2</sup>	- 0.5 m/s <sup>2</sup>
Réglage 2 (Reg2)	1 m/s <sup>2</sup>	- 0.5 m/s <sup>2</sup>
Réglage 3 (Reg3)	1.5 m/s <sup>2</sup>	- 1.5 m/s <sup>2</sup>

Un opérateur formé par Navya est présent dans la navette durant l'ensemble des essais afin de s'assurer du bon fonctionnement de la navette et de reprendre la main sur celle-ci, si la situation le nécessite.

Le comportement dynamique de la navette a été analysé à partir des données internes de la navette (centrale inertielle, GPS RTK) ainsi que par un EMMAPhone fixé sur le châssis (smartphone Android dotée d'une application d'acquisition développée par l'UGE/LMA (Laboratoire Mécanismes d'Accidents)). Chaque passager de la navette était également équipé d'un EMMAPhone au niveau des lombaires. Ces passagers devaient en outre répondre à un questionnaire d'évaluation de leur ressenti vis-à-vis de la navette essai par essai puis de manière globale (l'exploitation détaillée de ces questionnaires a fait l'objet du livrable L3.3.1 du projet), mais également exprimer leur ressenti en termes de confort/inconfort tout au long d'un essai en serrant plus ou moins un capteur d'effort Activ5 qu'ils tenaient dans leur main gauche (voir Figure 5).



**FIGURE 5 : (A) CAPTEUR DE FORCE DE PREHENSION : ACTIV5 ; (B) POSITIONNEMENT DE L'A5 DANS LA MAIN GAUCHE.**

## 2.2. EXPERIMENTATION EN SERVICE A CASA

### 2.2.1. Présentation générale

L'expérimentation menée dans le cadre d'ENA sur le site CASA (Communauté d'Agglomérations de Sophia-Antipolis) est représentative d'un déploiement réel, sur un site qui a fait l'objet d'une étude de sécurité et d'aménagements spécifiques.

Les participants à cette expérimentation ont emprunté cette navette pour répondre à leur propre besoin de mobilité. A la différence des sujets de l'expérimentation menée sur les pistes de TRANSPOLIS, qui ont eu l'occasion de réaliser de nombreux essais en tant que passager de la navette, ceux-ci n'ont pas de "vécu" de cette navette.

Nous disposons pour cette expérimentation CASA des mesures des EMMAPhones montés sur le châssis de la navette et sur les passagers, qui ont l'Activ5 dans leur main gauche à comprimer pour exprimer leur ressenti et ont donc une seule main disponible pour se tenir à des poignées au plafond ou barres verticales (cf. Figure 6). Nous disposons également de vidéos montrant les 4 vues extérieures de la navette (avant, arrière, droite et gauche), mais pas de vidéos prises de l'intérieur de la navette, comme lors de l'expérimentation TRANSPOLIS. Le point le plus pénalisant est de ne pas disposer des "logs" de la navette, que nous avons demandé à Navya de nous fournir sur la navette UGE utilisée à TRANSPOLIS, car ceux-ci incluent des informations de vitesse de bonne qualité. Nous devons par conséquent ici nous contenter des informations de vitesses données par le GPS à 1 Hz de l'EMMAPhone châssis, qui n'est pas très précis surtout en cas de freinage brutal, avec en outre une réception GPS assez médiocre sur le site de CASA.



**FIGURE 6 : ILLUSTRATION DES EXPERIMENTATIONS EN EXPLOITATION A CASA**

Le plan du parcours est donné à la Figure 7, avec le repérage des stations à gauche et la vue GoogleEarth à droite.

Au total, nous avons pu collecter les données des trajets de 25 participants. Ces trajets étaient d'une durée comprise entre 2 mn et 13 mn (moyenne à 7 mn), soit environ 3 heures d'enregistrement pour environ 18,5 km parcourus. Ils étaient composés de plusieurs stations, d'un rond-point et d'intersections, avec de nombreuses interactions avec des usagers extérieurs (voitures, piétons, etc.).



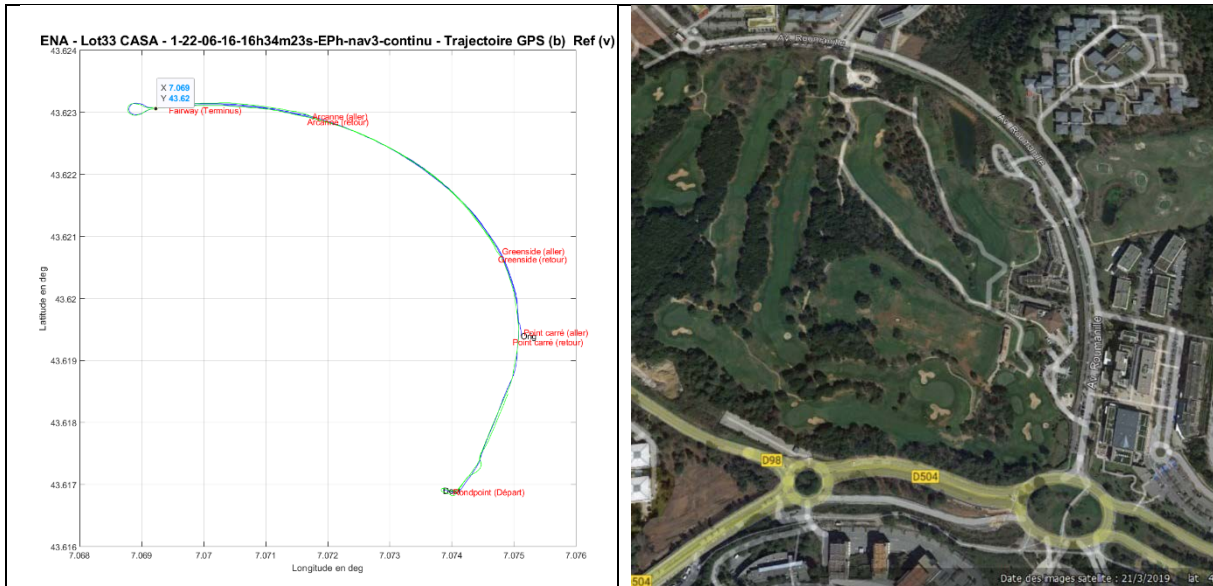


FIGURE 7 : PARCOURS DE L'EXPERIMENTATION CASA

## 2.2.2. Analyse du ressenti des passagers

Trois questions étaient posées aux sujets suite au trajet dans la navette à l'aide d'une tablette portable (cf. Figure 8) :

- 1) Durant votre trajet, comment avez-vous trouvé la dynamique de la navette (démarrage, freinage, arrêts, passage en intersections, ...)

La réponse était une note continue, de 0 à 100, guidée par 6 champs lexicaux : de très confortable (0) à très inconfortable (100). Les résultats sont indiqués sur la figure 9.

- 2) Cochez les situations dans lesquelles vous vous êtes retrouvés en situation d'inconfort ou de déséquilibre

La réponse était un choix multiple parmi : démarrage en station ; arrêt en station ; passage d'intersection ; virage ; ligne droite ; manœuvre imprévue (freinage, évitement).

- 3) A quel point cet éventuel ressenti d'inconfort ou de déséquilibre pourrait limiter votre usage de la navette ?

La réponse était une note continue, de 0 à 100, guidée par 5 champs lexicaux : de pas du tout (0) à complètement (100).

Les réponses à ces questions sont résumées sur les figures suivantes.

La Figure 9 illustre les résultats concernant la dynamique de la navette. Celle-ci était jugée de manière assez négative : la majorité des personnes (18/25) trouvent la dynamique de la navette assez confortable (8) ou assez inconfortable (10), certains participants (3/25) la jugeant même inconfortable ou très inconfortable.

12:43 [status icons]

# Questionnaire

P1 [ESSAI] [PARTICIPANT] [FREINAGE U]

1) Durant votre trajet, comment avez-vous trouvé la dynamique de la navette (démarrages, arrêts, freinages, passages en intersection...)?

Très Confortable    Confortable    Assez Confortable    Assez Inconfortable    Inconfortable    Très inconfortable

50/100

2) Cochez les situations dans lesquels vous vous êtes retrouvé en situation de déséquilibre ou d'inconfort (plusieurs choix possibles) :

Démarrage aux stations     Arrêt aux stations     Passage d'intersection

Virage     Ligne droite     Manoeuvre imprévue (freinage, évitement)

3) A quel point cet éventuel ressenti de déséquilibre ou d'inconfort pourrait limiter votre usage de la navette ?

Pas du tout    Un peu    Moyennement    Beaucoup    Complètement

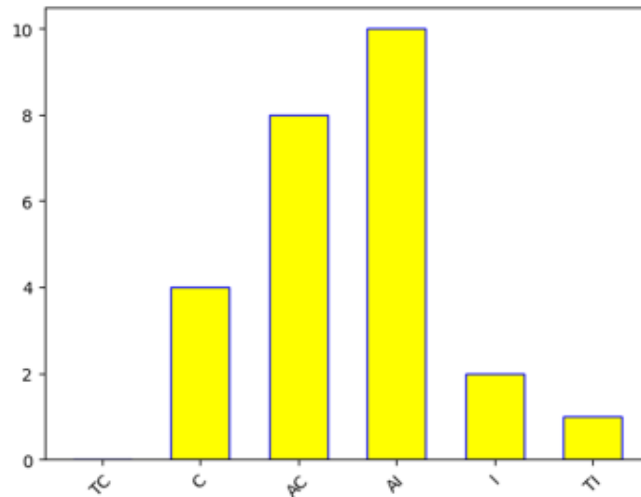
50/100

Commentaire

**VALIDER**    Université Gustave Eiffel

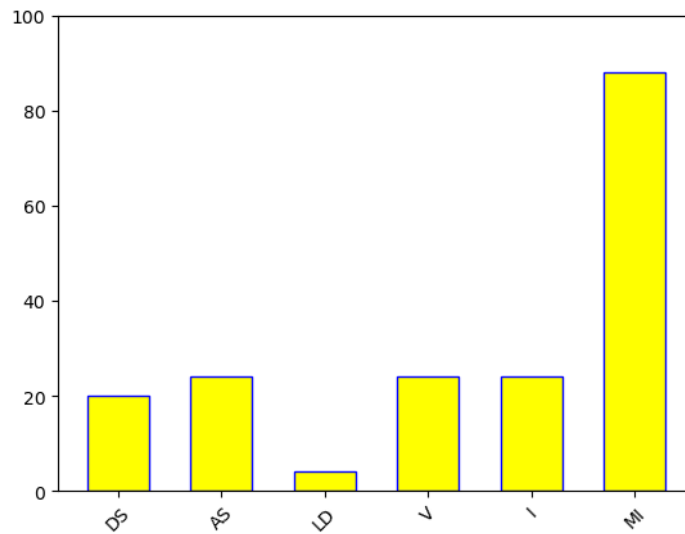
[navigation icons]

FIGURE 8 : QUESTIONNAIRES CASA PRESENTS AUX PARTICIPANTS.



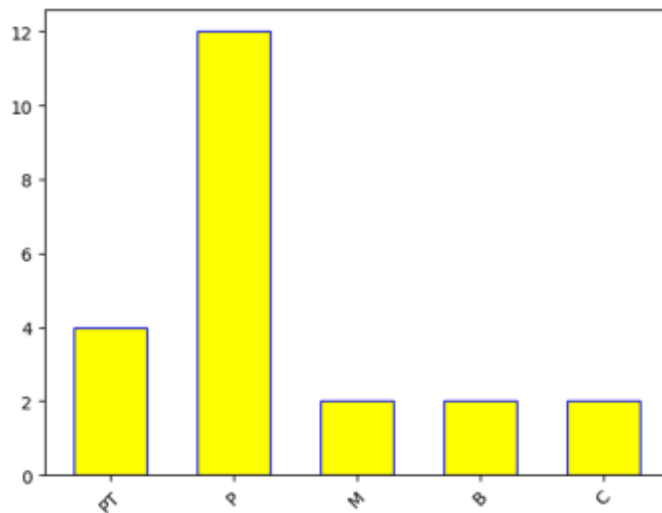
**FIGURE 9 : REPONSES A LA QUESTION SUR LE RESENTI DE LA DYNAMIQUE DE LA NAVETTE. NOMBRE DE REPONSES PAR CATEGORIES : TRES CONFORTABLE (TC), CONFORTABLE (C), ASSEZ CONFORTABLE (AC), ASSEZ INCONFORTABLE (AI), INCONFORTABLE (I), TRES INCONFORTABLE (TI)**

La Figure 10 illustre les réponses à la seconde question sur les situations d'inconfort ou de déséquilibre. L'immense majorité correspond à des manœuvres imprévues.



**FIGURE 10 : REPONSES A LA QUESTION SUR LES SITUATIONS D'INCONFORT OU DE DESEQUILIBRE. OCCURRENCE (%) DE SUJETS AYANT SELECTIONNE CHAQUE SITUATION : DEMARRAGE EN STATION (DS) ; ARRET EN STATION (AS) ; PASSAGE D'INTERSECTION (I) ; VIRAGE (V) ; LIGNE DROITE (LD) ; MANŒUVRE IMPREVUE (FREINAGE, EVITEMENT) (MI).**

Enfin, la Figure 11 illustre les réponses concernant les conséquences de ce ressenti sur une éventuelle non utilisation de la navette. La majorité des sujets (12/25) indique que cela pourrait "un peu" limiter leur utilisation. Seul 4 participants indiquent que cela n'a pas eu du tout d'impact, tandis que cet inconfort ou déséquilibre semblent rédhibitoires pour 2 participants.



**FIGURE 11 : REPONSES A LA QUESTION SUR LES CONSEQUENCES EN TERMES D'USAGE DE LA NAVETTE. NOMBRE DE REPONSES PAR CATEGORIES : PAS DU TOUT (PT), UN PEU (P), MOYENNEMENT (M), BEAUCOUP (B), COMPLETEMENT (C).**

### 2.2.3. Bilan

La principale caractéristique de ces essais est qu'ils ont été réalisés lors de l'exploitation de la navette sur l'expérimentation de CASA, avec l'ensemble des aléas que cela représente (conflit entre la navette et les autres usagers de la route, défaut de fonctionnement de la navette, etc.). Les participants étaient des usagers de la navette et non des personnes venues spécifiquement pour des expérimentations. La situation étudiée est donc beaucoup plus écologique que lors des essais réalisés sur les pistes de TRANSPOLIS. Malgré la faible fréquentation de la navette et la durée limitée de ces expérimentations (une semaine), un nombre non négligeable de trajets ont pu être enregistré (25 trajets, pour environ 3 heures d'enregistrement et 18 km parcourus).

L'analyse du ressenti des passagers fait ressortir que la dynamique de la navette lors des nombreux évènements (freinages intempestifs principalement dus aux interactions avec les autres usagers de la route) avait un impact négatif sur le ressenti de la navette par les usagers (confort perçu et acceptabilité).

## 3. ANALYSE DE LA DYNAMIQUE D'UNE NAVETTE AUTONOME

### 3.1. SYNTHÈSE DES PERFORMANCES DYNAMIQUES DE LA NAVETTE UTILISÉE

Ce paragraphe présente une synthèse des performances dynamiques de la navette NAVYA utilisée lors de la campagne d'essais sur piste menée à TRANSPOLIS en juin 2021.

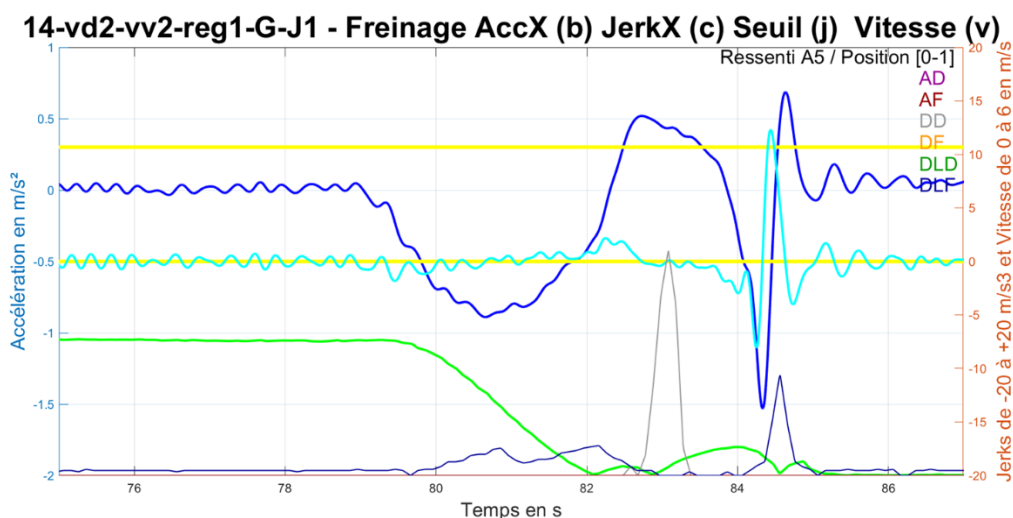
#### 3.1.1. Préambule

Il convient de préciser que les réactions de la navette constatées ici et les sollicitations dynamiques associées doivent être mises en perspective de l'évolution permanente des technologies matérielles et logicielles des véhicules autonomes. Les spécificités de comportement dynamique observées sont donc représentatives des performances atteignables lors de la conception de la navette NAVYA acquise par l'UGE fin 2019 et ne préjugent pas des progrès qui ont pu être apportés depuis par le constructeur.

Leur présentation a cependant un intérêt car elle va servir de base à l'analyse détaillée des mouvements des passagers et des sollicitations dynamiques associées, qui constitue une production de connaissances originales sur le confort et les risques de chute des passagers, et celles-ci résultent directement des sollicitations dynamiques de la navette.

La bonne répétabilité de la navette ainsi que l'allure générale des profils de vitesse et d'accélération lors des phases de démarrage, virage et freinage avec les réglages nominaux Reg1 ont déjà été présentés au paragraphe 4.2 du livrable 3.3.1.

Nous débutons cette présentation par un **mode d'emploi des figures** présentées dans ce paragraphe basé sur la Figure 12 ci-dessous.



**FIGURE 12 : MODE D'EMPLOI DES FIGURES UTILISÉES POUR DÉCRIRE LA DYNAMIQUE DE LA NAVETTE**

Au début du titre figure le nom de l'essai avec son numéro d'ordre (ici 14), puis un résumé des consignes de vitesses (ici vd2-vv2) en ligne droite vd puis éventuellement en virage vv si l'essai présenté en inclut un, avec les valeurs 05, 2, 3 ou 4 exprimées en m/s.

Suit le réglage en accélération (ici reg1) tel que présenté dans le Tableau 1 et illustré sur le tracé par les 2 lignes horizontales jaunes avec leur échelle à gauche. L'accélération longitudinale AccX et son jerk associé JerkX (dérivée de l'accélération auquel les êtres humains sont particulièrement sensibles) sont présentés en bleu et cyan avec les échelles respectivement à gauche et à droite. Lorsqu'il y a un virage l'accélération AccY et le jerk JerkY transversaux sont présentés en rouge et magenta. La vitesse est présentée en vert avec une échelle de 0 à 6 m/s. Figurent enfin les actions sur l'Activ5 avec un code couleur en fonction de la position du sujet (donné en haut à droite) avec une valeur normée entre 0 et 1, 1 représentant la valeur maximale d'effort appliqué par le sujet sur l'ensemble de l'expérimentation.

### 3.1.2. Les phases de démarrage

Lors des **phases de démarrage**, on observe systématiquement que celui-ci **se produit en plusieurs phases** (Figure 13) **pendant les 2 premières secondes** avec une première accélération de  $0,25 \text{ m/s}^2$ , suivie d'une brève mais brutale pointe de décélération à  $-0,5 \text{ m/s}^2$ , d'une forte ré-accélération à  $0,45 \text{ m/s}^2$  puis d'une redescente vers des valeurs négatives. Cette phase (ici entre 2,5 et 5 s) est associée aux plus gros jerks ( $\pm 8 \text{ m/s}^3$ ) et produit un petit palier sur la vitesse. Il n'y a pas de phénomène équivalent sur autre type de véhicule routier. Ce défaut serait provoqué par une action au niveau des freins liés à l'absence d'information sur la pente de la chaussée, il devrait pouvoir être corrigé par le concepteur de la navette.

On observe ensuite une remontée progressive de l'accélération jusqu'à atteindre la valeur de consigne ( $0,3 \text{ m/s}^2$  à l'instant 7 s) puis un palier qui décroît lentement jusqu'à  $0,1 \text{ m/s}^2$  (instant 22 s) lorsque la consigne de vitesse est atteinte. S'en suit une décélération assez forte jusqu'à  $-0,4 \text{ m/s}^2$  mais qui se produit sur 1,5 s, puis des oscillations de l'accélération longitudinale qui provoquent également une légère oscillation autour de la vitesse de consigne. On constate que seule la phase initiale met en œuvre des jerks importants, toutes les variations et oscillations suivantes ne faisant apparaître aucun jerk significatif.

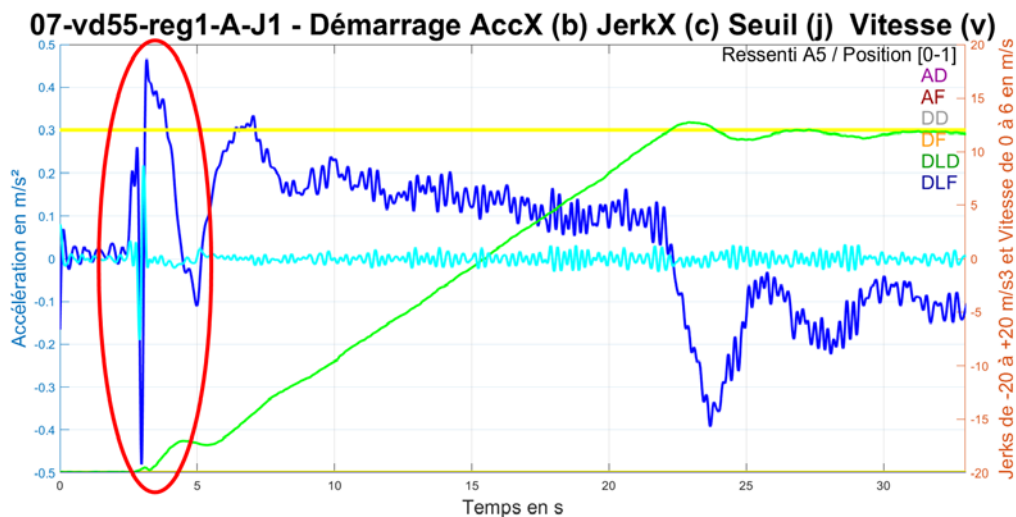
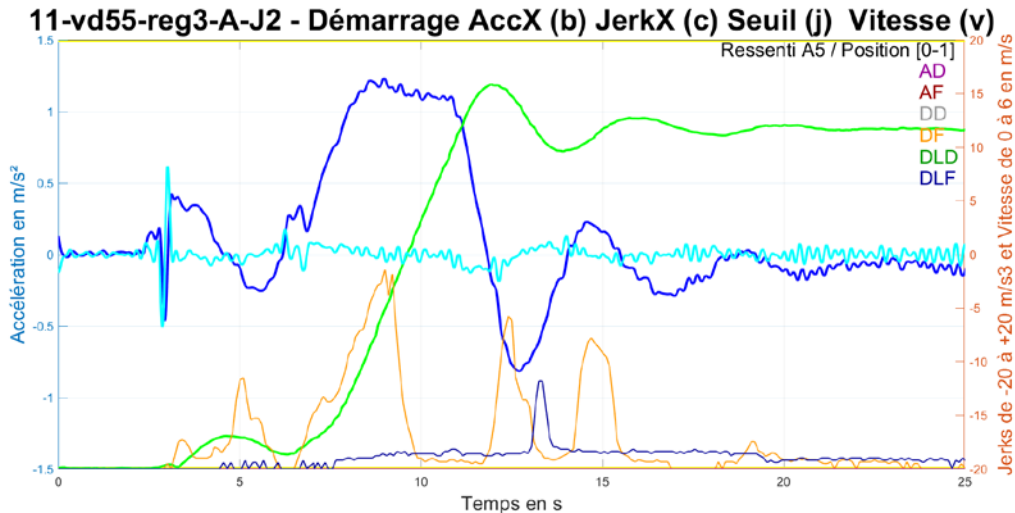


FIGURE 13 : EXEMPLE DE DEMARRAGE DE LA NAVETTE

Si on analyse ce qui a pu être obtenu en utilisant le patch disponible sur notre navette, dont on rappelle qu'il a été conçu par Navya à notre demande et pour répondre à nos objectifs de recherche et n'est donc en rien représentatif des performances de la navette en exploitation.

On constate (Figure 14) que les montées en vitesse se font sans dépasser le seuil de réglages (ici 1,2 m/s<sup>2</sup> alors que reg3 autorise 1,5 m/s<sup>2</sup>) et via des paliers d'accélération de plus en plus longs selon la vitesse cible, mais que même avec 1,2 m/s<sup>2</sup> et sans jerk significatif dans la phase où se produit véritablement la montée en vitesse, certains sujets en position debout (ici DF : face au déplacement de la navette) manifestent déjà leur inconfort comme le montrent les actions sur l'Activ5 (ici en orange).



**FIGURE 14 : EXEMPLE DE DEMARRAGE DE LA NAVETTE AVEC UNE CONSIGNE D'ACCELERATION ELEVEE (PATCH UGE) : A 1,2 m/s<sup>2</sup> ON CONSTATE DEJA UN RESENTI NEGATIF D'UN PASSAGER DEBOUT**

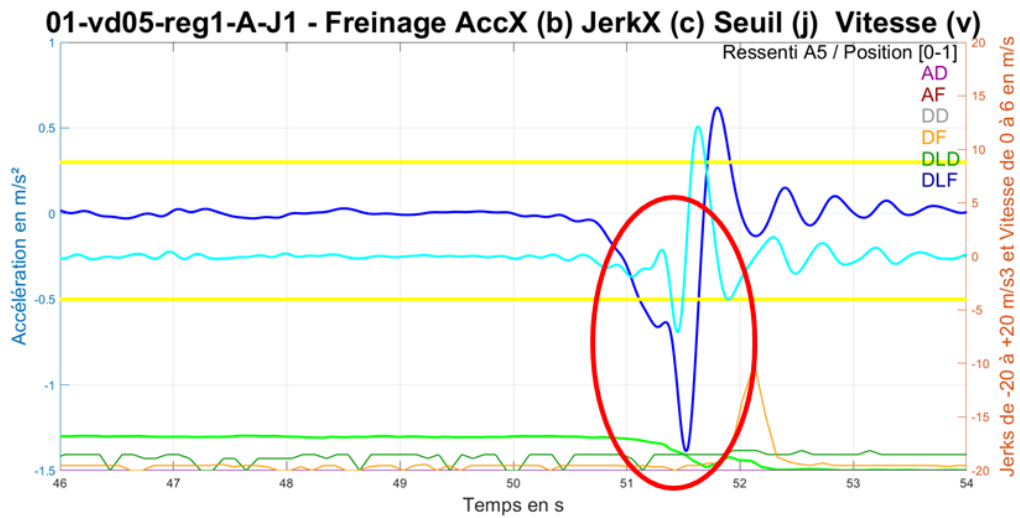
Un enseignement important est donc que, s'il est souhaitable et selon l'avis unanime des utilisateurs nécessaire d'augmenter la vitesse de ce type de navette autonome, il conviendra de ne pas le faire à travers des transitoires trop violents et sans dépasser des valeurs d'accélération de 1 m/s<sup>2</sup> dans la mesure où il y a des passagers debout. On peut signaler que pour un véhicule de tourisme courant des valeurs de 3 m/s<sup>2</sup> en démarrage ne posent aucun problème dans la mesure où les passagers sont assis et en outre face à la route et qu'en conséquence une accélération positive les cale au fond de leur siège. C'est de manière logique davantage le freinage qui peut être mal perçu, les occupants ayant tendance à être projetés par l'avant, ce phénomène étant cependant limité par la ceinture de sécurité.

### 3.1.3. Les phases de freinage

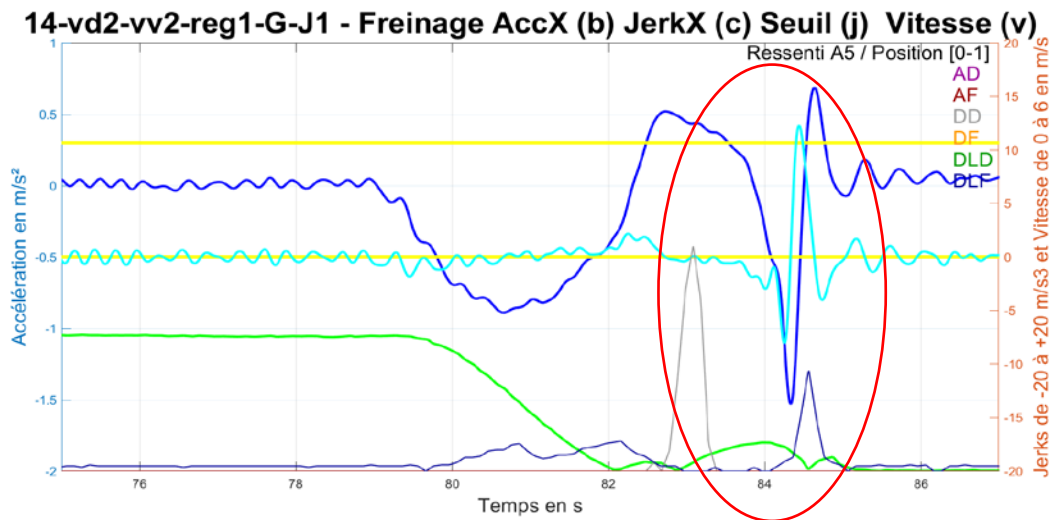
On constate (Figure 15) que même avec une très faible vitesse (ici 0,5 m/s soit 1,8 km/h) et des réglages nominaux (-0,5 m/s<sup>2</sup> en reg1) si la décélération moyenne au cours du freinage est proche du seuil de -0,5 m/s<sup>2</sup>, la navette atteint ponctuellement des décélération beaucoup plus élevées avec ici un pic à -1,5 m/s<sup>2</sup>, qui génère des jerks très importants (-7/+12 m/s<sup>3</sup>).

Un autre phénomène constaté est présenté à la Figure 16 : il arrive souvent que la navette redémarre après avoir effectué son arrêt en fin d'essai : une première pointe d'accélération positive se situe à 0,5 m/s<sup>2</sup> (jerk associé à 1,5 m/s<sup>3</sup>), elle est suivie d'une violente décélération à -1,5 m/s<sup>2</sup> (jerk important à -7 m/s<sup>3</sup>) puis d'une ré-accelération à 0,7 m/s<sup>2</sup> (jerk énorme à +12 / -4 m/s<sup>3</sup>) avant des oscillations. Il est très probable que ces phénomènes sont liés à l'importance qu'a la prédétermination du parcours de la navette : si celle-ci n'a pas respecté rigoureusement son point d'arrêt, son logiciel de pilotage lui intime l'ordre de le faire au détriment du confort des passagers.

Sur l'exemple présenté les passagers debout dos au sens de déplacement DD et debout en position latérale DLF réagissent sur l'Activ5 lors de ce redémarrage. Là encore ce défaut devrait pouvoir être corrigé dans le futur par le concepteur de la navette.



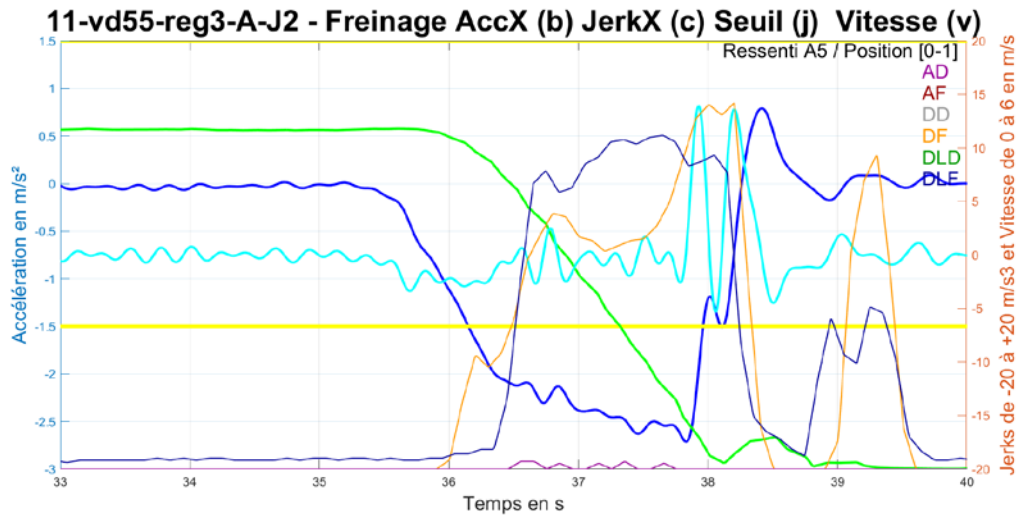
**FIGURE 15 : EXEMPLE DE FREINAGE DE LA NAVETTE : MEME A BASSE VITESSE, LA DECELERATION ATTEINT PONCTUELLEMENT DES VALEURS ELEVES AVEC DES JERKS ASSOCIES IMPORTANTS**



**FIGURE 16 : EXEMPLE DE REDEMARRAGE DE LA NAVETTE A L'ISSUE DE LA PHASE DE FREINAGE AVEC ALTERNANCES D'ACCELERATIONS LONGITUDINALES INTENSES ET JERKS ASSOCIES IMPORTANTS**

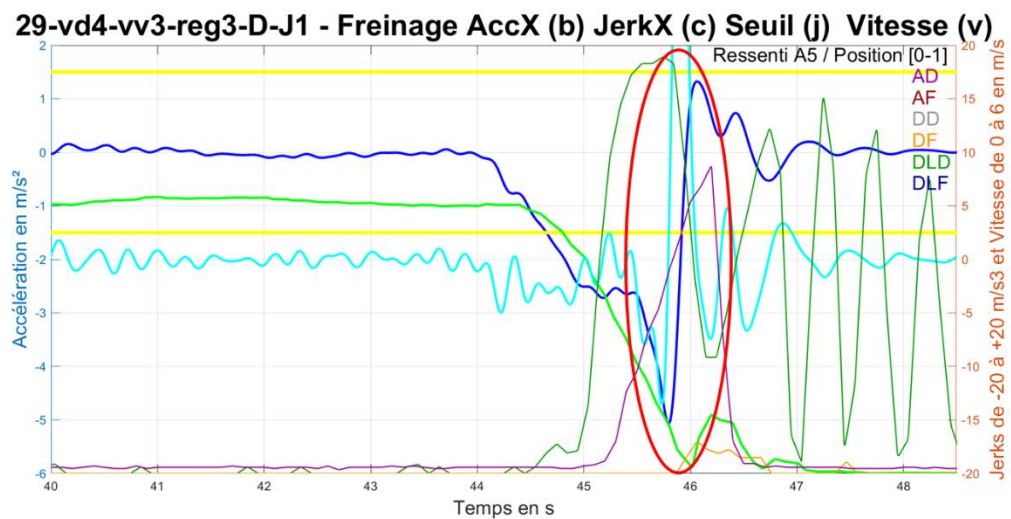
Si on explore le comportement de la navette en freinage au-delà de son fonctionnement nominal avec le patch en configuration Reg3, on constate (Figure 17) des valeurs de décélération jusqu'à  $-2,6 \text{ m/s}^2$ , ce qui se rapproche des performances mises en jeu par un conducteur lambda d'un véhicule de tourisme en utilisation courante, ce qui est bien entendu impossible à supporter pour un passager debout : les sujets en position DLF et DF réagissent très fortement sur l'Activ5, manifestant leur inconfort. On constate en outre des alternances de jerk à  $14/-4/14 \text{ m/s}^3$  sur la fin de ce freinage et le rebond à  $+0,7 \text{ m/s}^2$ .





**FIGURE 17 : EXEMPLE DE FREINAGE DE LA NAVETTE AVEC DES REGLAGES DE SEUILS IMPORTANTS (REG3) : LA DECELERATION ATTEINT DES VALEURS TROP ELEVEES POUR DES PASSAGERS DEBOUT**

Sur cet autre exemple avec un réglage Reg3, soit une consigne de décélération à  $-1,5 \text{ m/s}^2$  (Figure 18), on observe même un pic à  $-5 \text{ m/s}^2$ , avec un rebond très violent à  $1,3 \text{ m/s}^2$  associés à des jerks énormes ( $-13/+25 \text{ m/s}^3$ ). Il en résulte des réactions des sujets très intenses, même le sujet AD assis dos à la route réagit fermement sur l'Activ5, alors que le freinage devrait plutôt le caler au fond de la banquette de la navette.



**FIGURE 18 : EXEMPLE DE FREINAGE DE LA NAVETTE AVEC DES REGLAGES DE SEUILS IMPORTANTS (REG3) : LA DECELERATION ATTEINT DES VALEURS ( $-5 \text{ M/s}^2$ ) TROP ELEVEES MEME POUR LE PASSAGER ASSIS**

Un peu comme lors de l'analyse des démarrages, **notre recommandation serait que lorsqu'une augmentation de la vitesse sera envisageable, cette amélioration des performances devra se faire en conservant des seuils de décélération raisonnables pour ne pas le faire au détriment du confort et de la sécurité des passagers.**

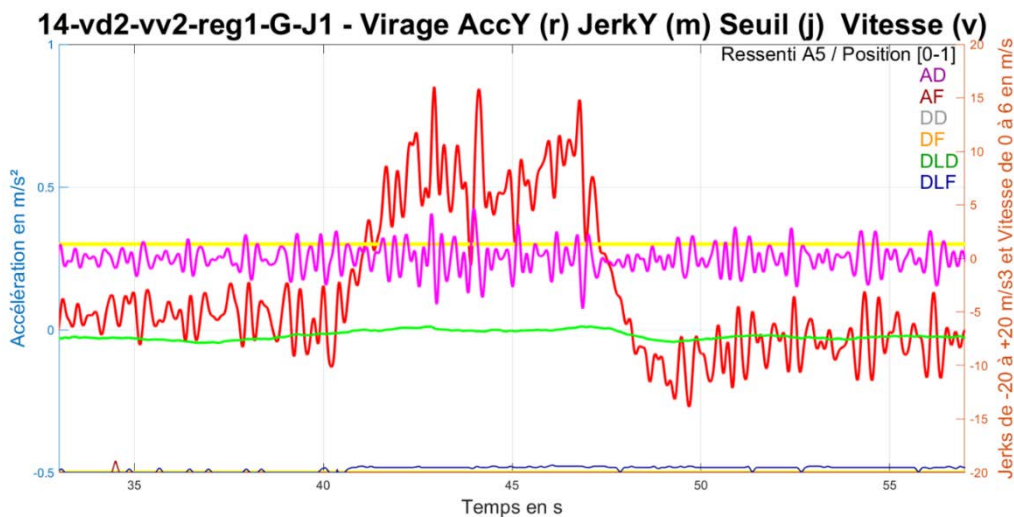
### 3.1.4. Le franchissement des virages

La prise de virage par la navette est satisfaisante, lorsqu'elle est réalisée à vitesse constante comme le montre la Figure 19. Le franchissement de ce virage à 2 m/s génère une accélération transversale dont le niveau moyen se situe à 0,6 m/s<sup>2</sup>, mais cette sollicitation s'établit et s'atténue sur 1.5 s, ce qui ne génère aucun jerk significatif.

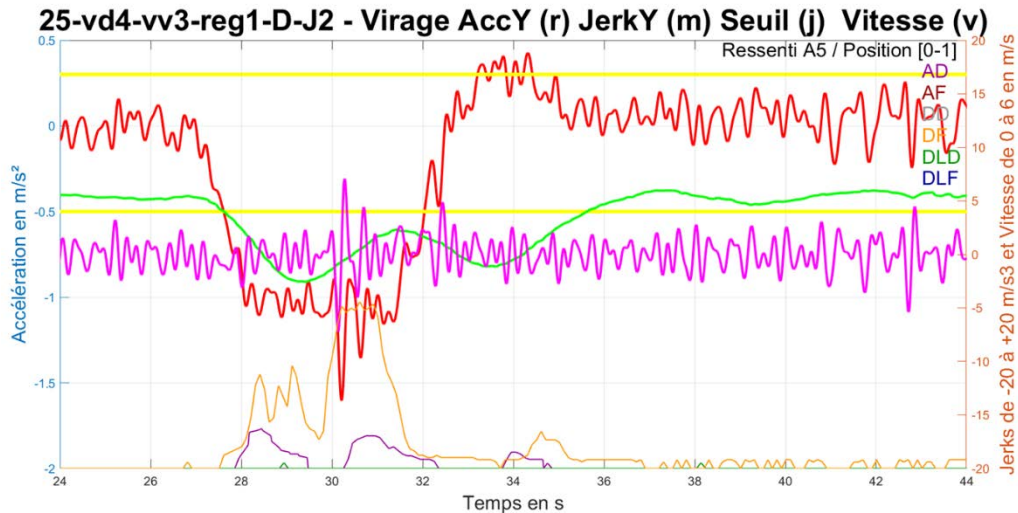
Par contre la navette gère mal une consigne lui imposant une vitesse de franchissement du virage différente de celle de la ligne droite : pour l'essai présenté à la Figure 20, la consigne est de passer de 4 à 3 m/s dans le virage et de remonter à 4 m/s dans la ligne droite suivante : la vitesse ne commence à diminuer que lorsque la sollicitation transversale débute, elle n'est établie qu'avec un retard important, et il s'en suit des oscillations, la vitesse remonte déjà en seconde partie du virage et diminue à nouveau en sortie du virage pour remonter ensuite lentement : la vitesse ne se rapproche de sa valeur de consigne pour la ligne droite suivante que 3 secondes après la sortie du virage.

Les passagers vivent mal cette combinaison de sollicitations longitudinales et transversales même avec les réglages nominaux de la navette : le passager en position debout face au déplacement réagit assez intensément sur l'Activ5 et même le passager assis dos au mouvement actionne légèrement ce capteur.

**Ce résultat est important et conduit à la recommandation suivante : lorsqu'une augmentation de la vitesse de ce type de navette sera envisageable, comme le franchissement des virages à la même vitesse que les lignes droites ne sera plus possible, il faudra veiller à la gestion des phases transitoires, en anticipant sur la diminution de la vitesse avant qu'un virage ne se présente, et la ré augmentation de cette vitesse après la sortie du virage pour éviter que l'augmentation globale des performances de la navette ne se fasse au détriment du confort et de la sécurité des passagers.**



**FIGURE 19 : FRANCHISSEMENT D'UN VIRAGE A 2 M/S PAR LA NAVETTE : LA SOLLICITATION TRANSVERSALE S'ETABLIT PROGRESSIVEMENT ET SANS AUCUN JERK SIGNIFICATIF**



**FIGURE 20 : FRANCHISSEMENT D'UN VIRAGE A 3 M/S AVEC UNE VITESSE DE 4 M/S DANS LES LIGNES DROITES : LA NAVETTE GERE MAL UNE CONSIGNE LUI IMPOSANT UNE VITESSE DE FRANCHISSEMENT DU VIRAGE DIFFERENTE DE CELLE DE LA LIGNE DROITE**

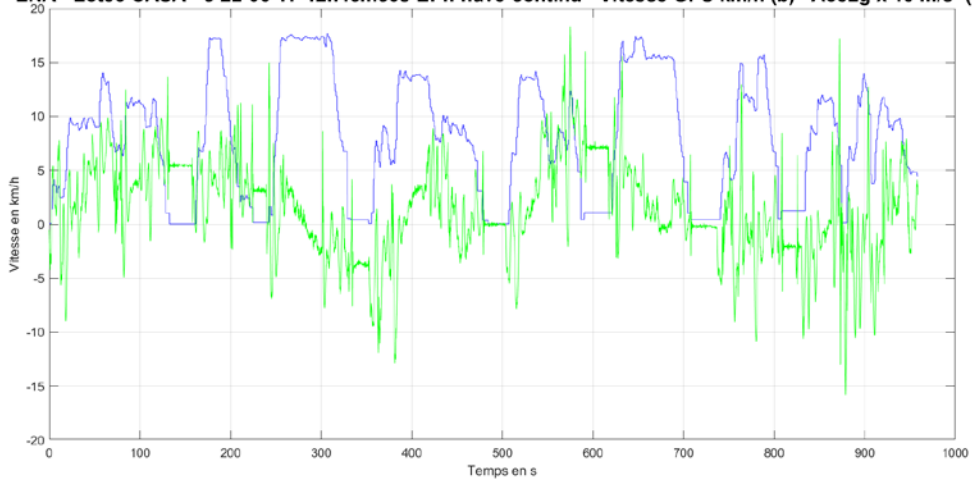
### 3.2. DYNAMIQUE DE LA NAVETTE EN EXPLOITATION EN FONCTIONNEMENT NOMINAL

On notera en premier lieu (Figure 21) que le profil de vitesse et d'accélération longitudinale de la navette sur le parcours de CASA est tout à fait reproductible en fonctionnement nominal. On retrouve régulièrement les mêmes séquences et la vitesse maximale culmine à 17,5 km/h. On remarque également que les accélérations longitudinales sont rarement à 0 lors des arrêts aux stations, ce qui s'explique sans doute par des zones d'arrêt non planes, car les valeurs de ces "décalages" sont assez reproductibles d'un passage à l'autre. La durée des arrêts aux stations peut légèrement varier en fonction de l'activité des passagers.

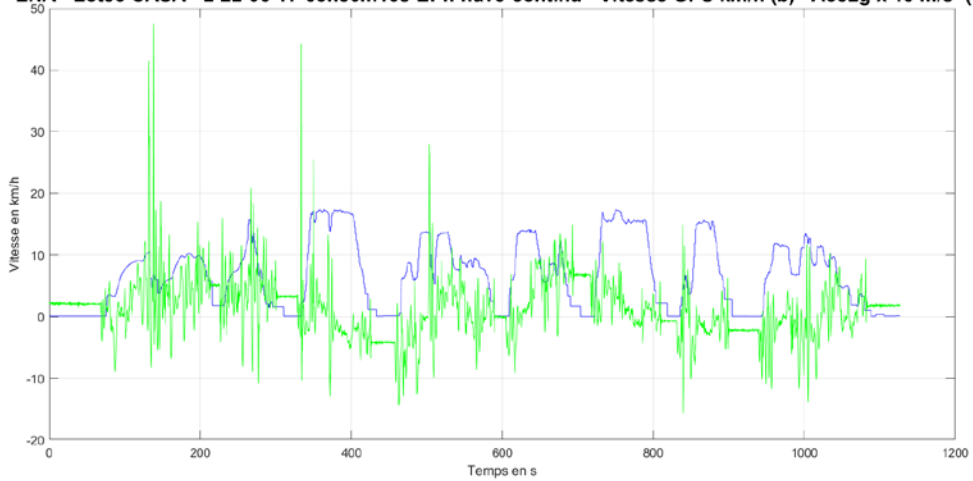
Le parcours CASA offre peu de possibilité de mettre en évidence le comportement transversal de la navette, sauf lorsqu'elle effectue son demi-tour à mi-parcours (Station Fairway), comme illustré à la Figure 22. On retrouve une "signature" classique de rond-point avec des alternances droite/gauche/droite, avec des lobes droits (négatifs) très atténués. La navette aborde cette zone à 14 km/h puis ralentit à 9 km/h pour le rond-point à la sortie duquel elle s'arrête. L'accélération transversale moyenne dépasse à peine 1  $m/s^2$ , avec une pointe furtive à 1,7  $m/s^2$ .

**Ce paragraphe confirme que les sollicitations dynamiques de la navette sont faibles en fonctionnement nominal. En revanche, comme nous le verrons au paragraphe 4.4, de nombreux freinages intempestifs ont des dynamiques violentes qui ont pour conséquences des perturbations d'équilibre importantes pour les passagers.**

ENA - Lot33 CASA - 3-22-06-17-12h45m36s-EPh-nav3-continu - Vitesse GPS km/h (b) AccLg x 10 m/s<sup>2</sup> (v)

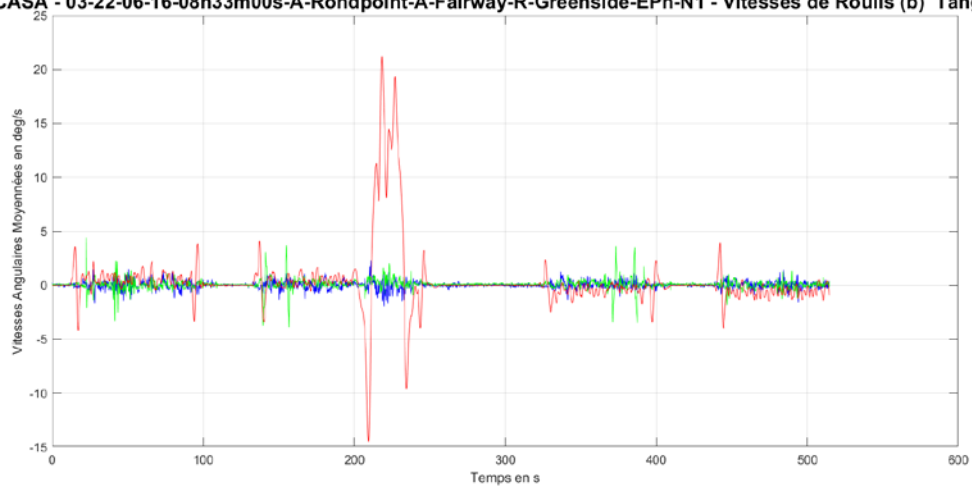


ENA - Lot33 CASA - 2-22-06-17-08h50m16s-EPh-nav3-continu - Vitesse GPS km/h (b) AccLg x 10 m/s<sup>2</sup> (v)

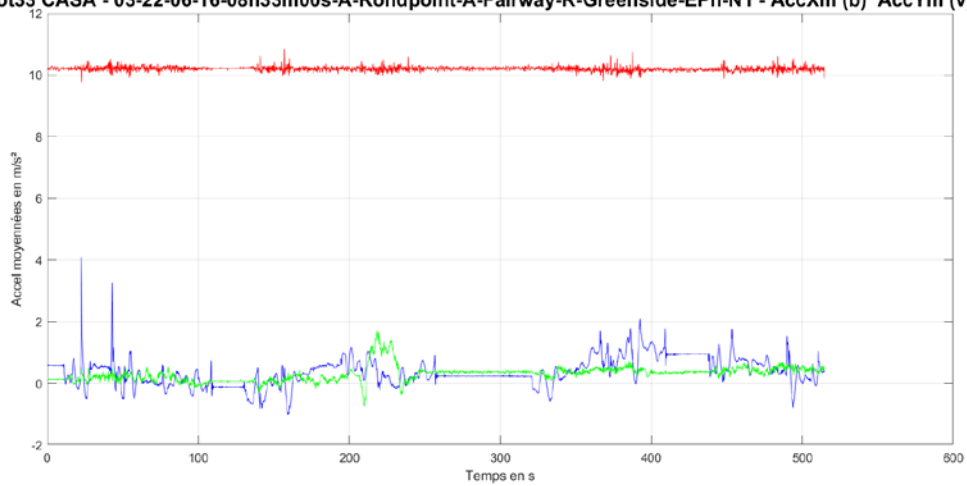


**FIGURE 21 : COMPARAISON DES PROFILS DE VITESSE POUR 2 PARCOURS DE L'EXPERIMENTATION CASA**

IA - Lot33 CASA - 03-22-06-16-08h33m00s-A-Rondpoint-A-Fairway-R-Greenside-EPh-N1 - Vitesses de Roulis (b) Tangage (v) L



ENA - Lot33 CASA - 03-22-06-16-08h33m00s-A-Rondpoint-A-Fairway-R-Greenside-EPh-N1 - AccXm (b) AccYm (v) AccZm (i)



**FIGURE 22 : COMPORTEMENT DYNAMIQUE TRANSVERSAL DE LA NAVETTE CASA LORS DU ROND-POINT A MI-PARCOURS**



## 4. SYNTHÈSE DES SOLLICITATIONS DYNAMIQUES D'UN SUJET HUMAIN

### 4.1. MOUVEMENTS DE REFERENCE

#### 4.1.1. Objectifs

Ayant été confronté à la grande complexité des accélérations et vitesses angulaires mesurées sur les EMMAPhones positionnés au niveau des lombaires des passagers de la navette, lors de mouvements provoqués par des sollicitations dynamiques intenses de la navette, il nous est apparu nécessaire de commencer par connaître la nature et les ordres de grandeurs de ces sollicitations dynamiques lors de mouvements de référence d'un sujet humain.

Nous avons donc réalisé des acquisitions et vidéo pour les situations suivantes :

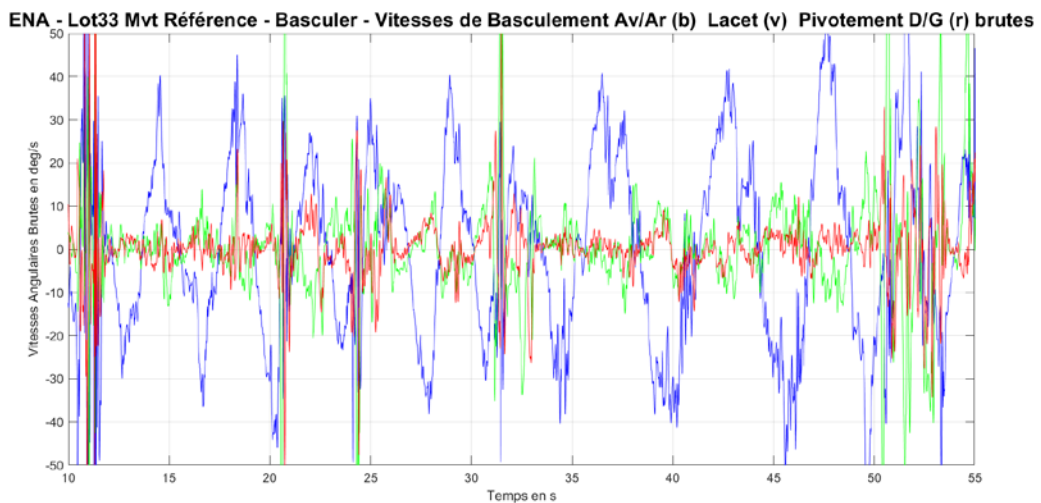
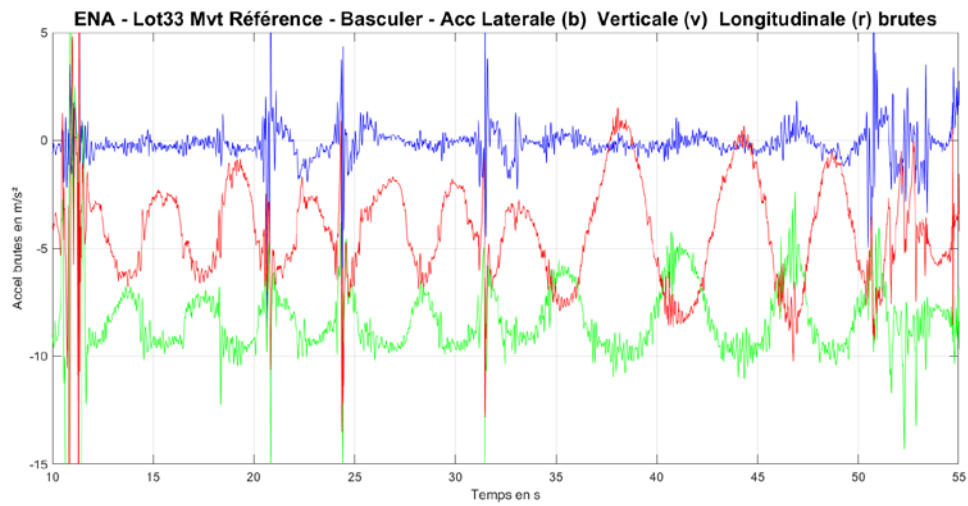
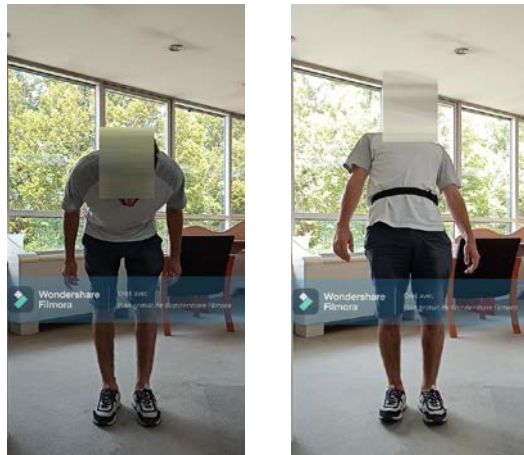
- des mouvements de basculement avant/arrière, de pivotement droite/gauche ("faire la roue") et de lacet (semblable au geste du discobole) pour mieux comprendre les signaux de vitesses angulaires. Nous avons adopté ces terminologies, les termes classiques de roulis et tangage n'étant pas adaptés à un être humain.
- des alternances D/G, sauts et taper du pied pour mieux comprendre les signaux d'accélération.

Nous allons présenter les enseignements les plus importants : L'étude de chaque mouvement est présentée via une planche incluant les photos des amplitudes extrêmes, et les paramètres dynamiques les plus pertinents.

Pour le mouvement de basculement avant/arrière (Figure 23), les photos représentent les amplitudes maximales obtenues sur ces mouvements (ici entre 34 et 40 s). Sur les accélérations on observe une combinaison de composantes longitudinales et verticales, qui correspondent aux composantes de la gravité, on note des valeurs relatives autour d'un signal moyen de 5.5 et -3  $m/s^2$ , ce qui correspond au fait que l'amplitude du basculement est supérieure vers l'avant. Pour la vitesse angulaire, c'est évidemment le mouvement de basculement qui ressort, les pics se situent entre 30 et 50  $^\circ/s$ , ces valeurs sont bien entendu fonction de la vitesse à laquelle le sujet effectue son mouvement, mais elles permettent aussi de remonter à une valeur de l'angle par intégration (Figure 24), valeur qui peut être comparée aux indications des capteurs d'orientation et magnétomètre présents sur l'EMMAPhone, ainsi qu'aux valeurs d'angle auxquelles on peut remonter en appliquant des règles de trigonométrie simples sur les signaux d'accélération.

Ce calcul est licite dans le cas du mouvement étudié, car le sujet n'est pas soumis à des accélérations linéaires, puisqu'il est statique par rapport au sol, par contre ce type d'évaluation ne sera pas possible lors de certains mouvements de la navette, car le sujet sera alors soumis à une accélération linéaire combinant celle de la navette (par exemple en freinage d'urgence), et le surplus d'accélération linéaire, si le passager est projeté à l'intérieur de la navette, ces 2 termes venant s'ajouter à la composante d'accélération liée au basculement (composante de la gravité). Cette illustration explique la complexité de l'interprétation des signaux d'accélération des passagers de la navette.

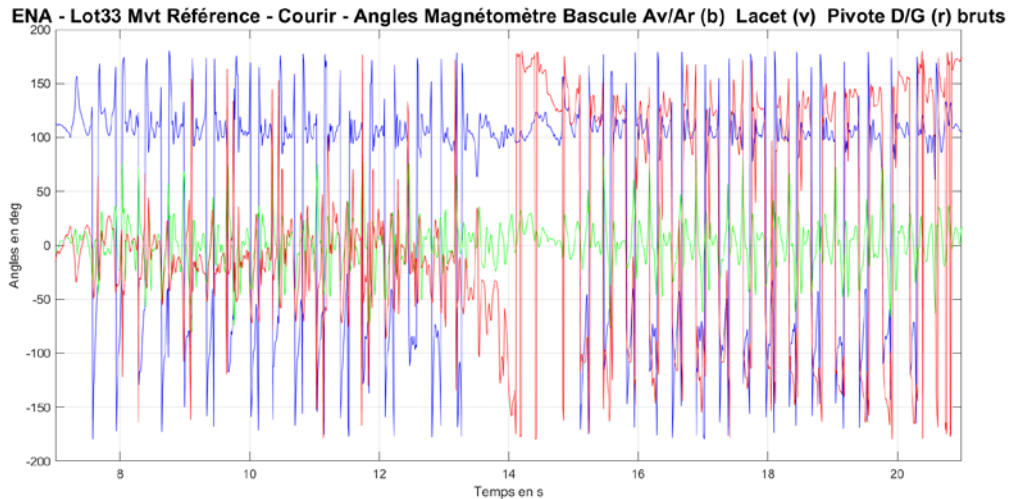
**Mouvement de basculement avant/arrière :**



**FIGURE 23 : ANALYSE D'UN MOUVEMENT DE BASCULEMENT AVANT/ARRIERE : SUR LES ACCELERATIONS ON OBSERVE UNE COMBINAISON DE COMPOSANTES LONGITUDINALES ET VERTICALES, LA VITESSE ANGULAIRE DE BASCULEMENT CULMINE A 50 °/s**



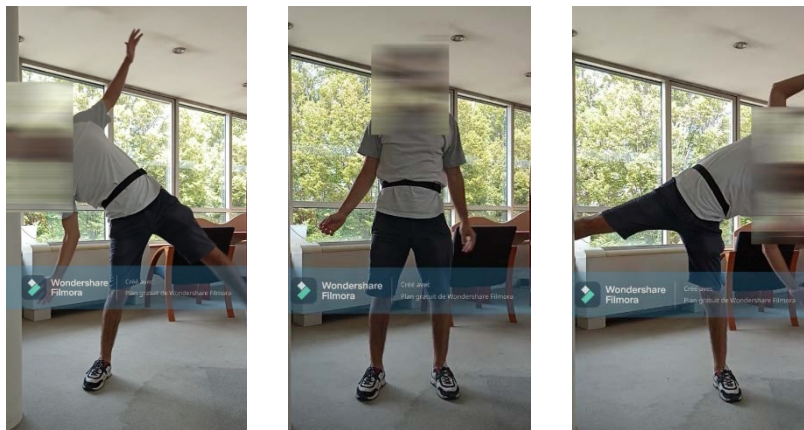
Le magnétomètre varie sur ce basculement entre 80 et 150 deg, avec une origine à 105 (ne pas chercher à interpréter cette origine qui dépend du positionnement de l'EMMAPhone au niveau des lombaires du sujet en position debout) ce qui conduit à un basculement avant à 45 deg et arrière à 25, ce qui apparaît tout à fait cohérent avec les photos. Pour information, le capteur d'orientation donne des amplitudes de pointe à pointe d'environ 60 deg au lieu de 70 pour le magnétomètre. Cela nous montre que les signaux des capteurs angulaires du smartphone donnent un ordre de grandeur cohérent dans des mouvements assez simples, sans atteindre une grande précision. Nous avons constaté sur des mouvements plus complexes, comme la course ou la marche, que les signaux étaient difficilement interprétables, comme le montre la Figure 24 ci-dessous.

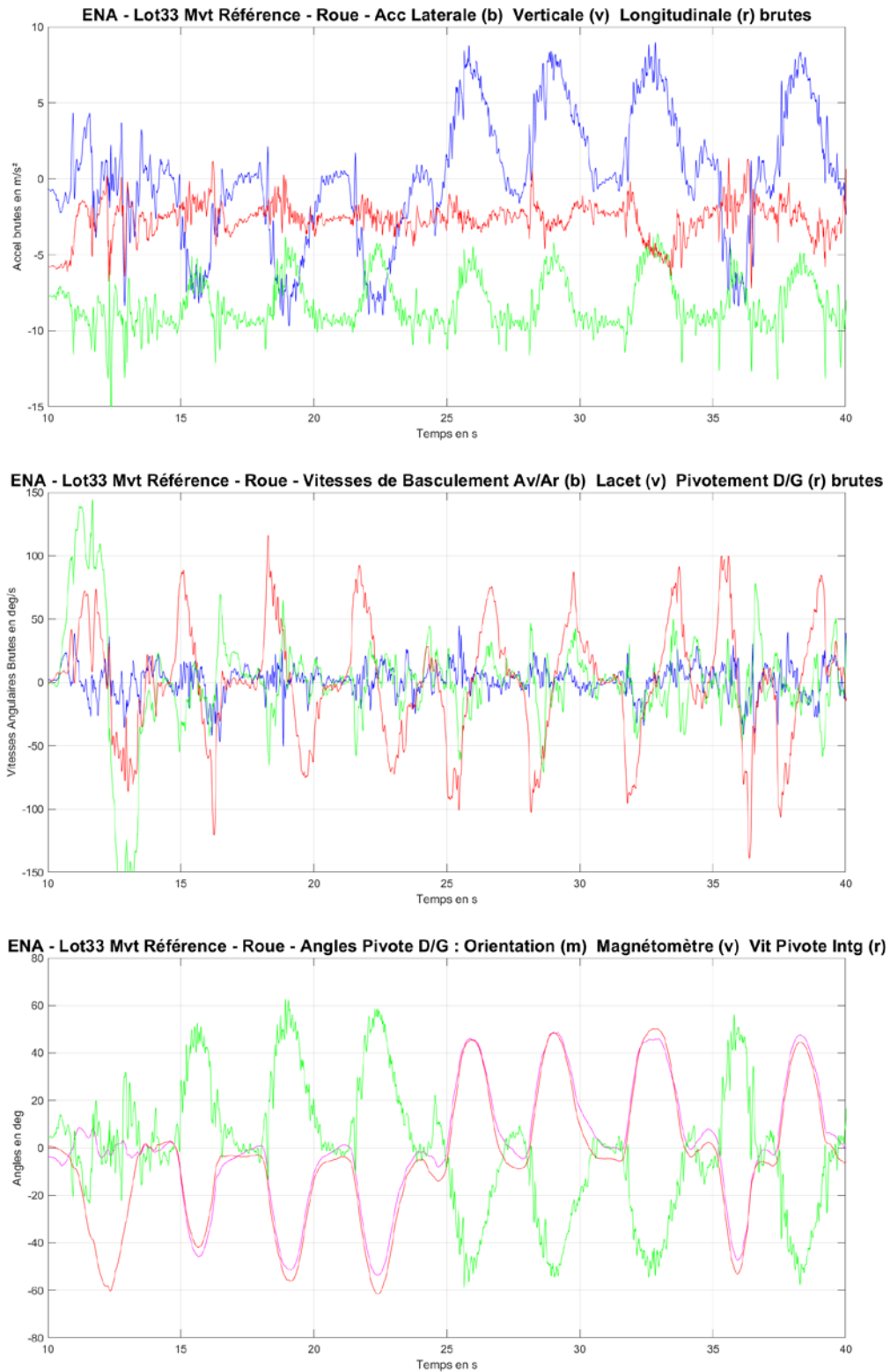


**FIGURE 24 : DIFFICULTES D'INTERPRETATION DES SIGNAUX ANGULAIRES DE L'EMMAPHONE LORS DE MOUVEMENTS COMPLEXES (ICI LA COURSE)**

#### 4.1.2. Mouvement de pivotement latéral droite/gauche (faire la roue)

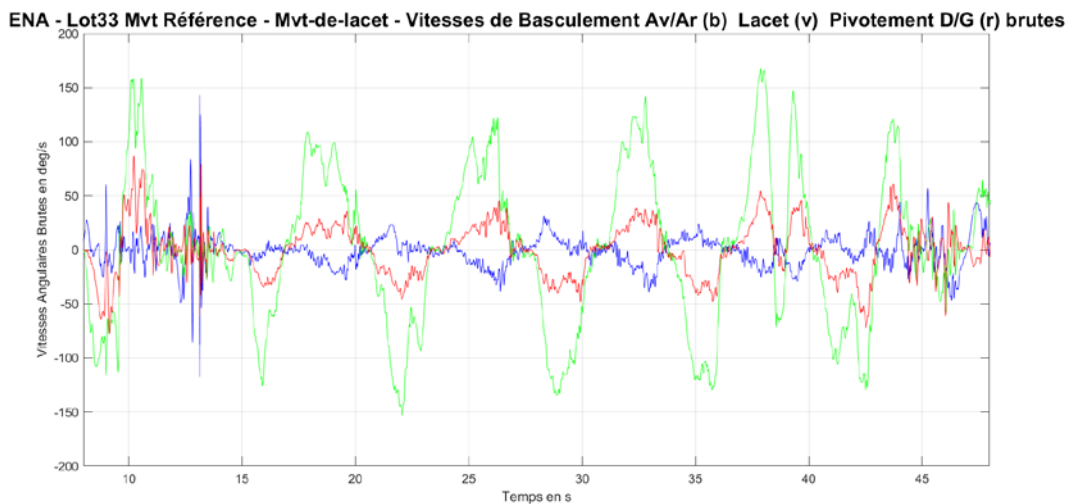
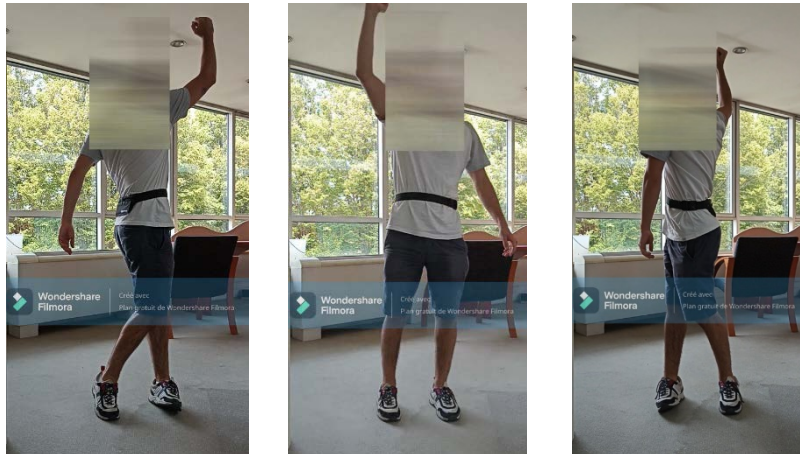
Comme pour le mouvement de basculement avant/arrière, ce pivotement droite/gauche se traduit par des signaux significatifs sur 2 des composantes de l'accéléromètre 3D : latérale qui est majoritaire mais également verticale. Les photos extraites de la vidéo correspondent au dernier mouvement où les basculements droite et gauche se succèdent (entre 35 et 40 s). Les amplitudes maximales culminent à  $\pm 8 \text{ m/s}^2$  en latéral et  $5 \text{ m/s}^2$  en vertical (toujours dans le même sens pour cette dernière). La vitesse de pivotement varie de  $-100$  à  $+100 \text{ deg/s}$ . Son intégration conduit à des angles de  $\pm 50 \text{ deg}$ , cohérents avec les figures et les signaux des capteurs qui donnent ici des résultats identiques.





**FIGURE 25 : ANALYSE D'UN MOUVEMENT DE PIVOTEMENT LATÉRAL DROITE/GAUCHE : POSITIONS EXTRÊMES, ACCELERATIONS, VITESSES ANGULAIRES, ANGLES DE PIVOTEMENT (CAPTEUR D'ORIENTATION, MAGNETOMETRE ET INTEGRATION DE LA VITESSE DE PIVOTEMENT)**

### 4.1.3. Mouvement de lacet



**FIGURE 26 : ANALYSE D'UN MOUVEMENT DE LACET : POSITIONS EXTREMES, VITESSES ANGULAIRES**

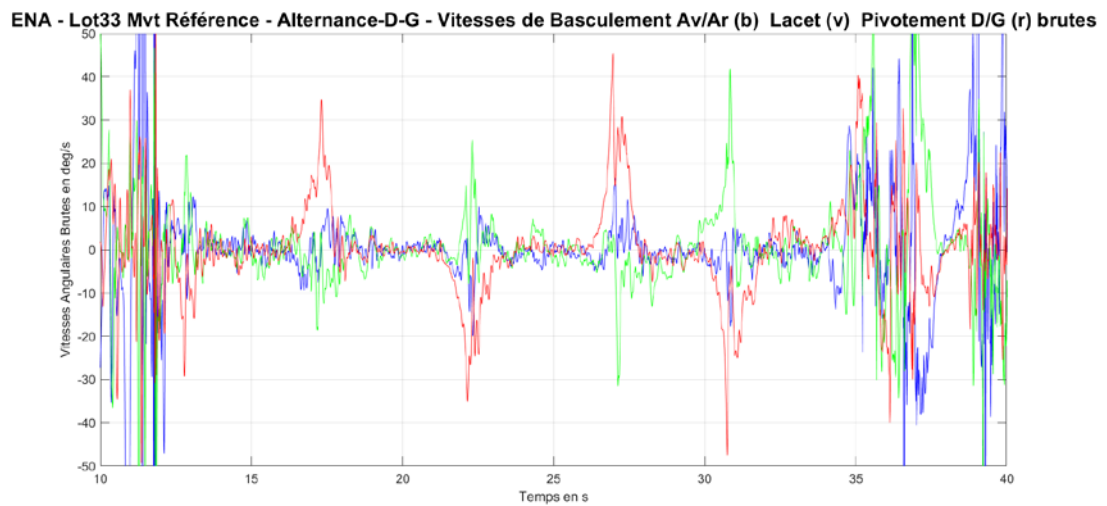
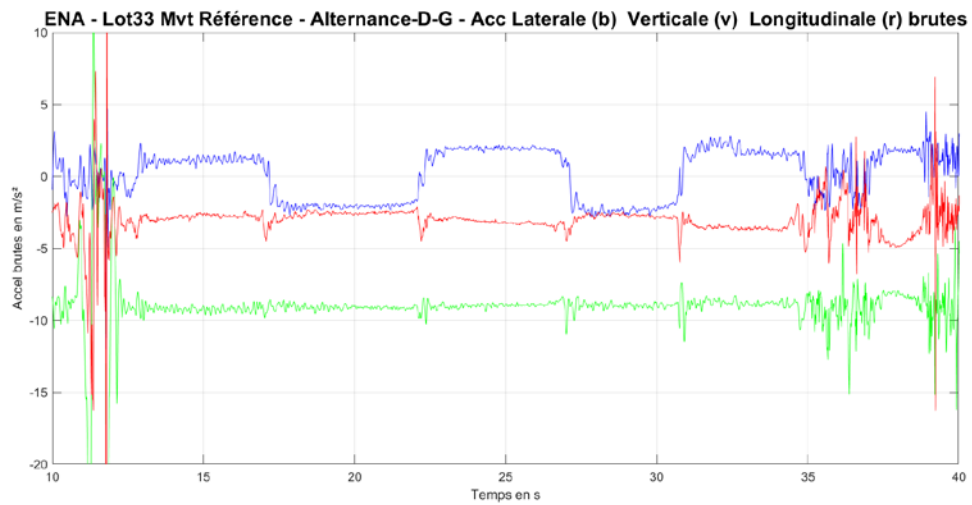
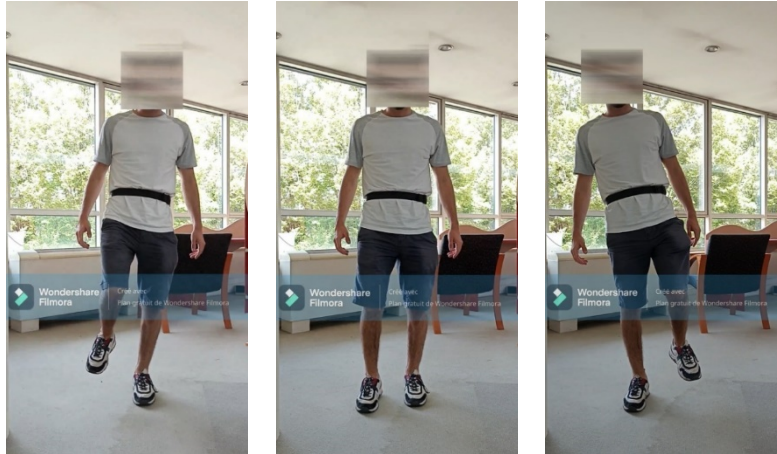
Lors de ce mouvement le sujet lève le bras droit comme s'il se tenait à une poignée au plafond, comme peuvent le faire les passagers debout de la navette. Nous n'avons pas représenté les signaux accélérométriques car leurs amplitudes étaient très faibles.

C'est évidemment le lacet qui ressort sur les vitesses angulaires avec des pics de +/-100 à 150 deg/s, pour ces mouvements à vitesse modérée. Là encore, l'intégration de ce signal montre qu'il permet d'accéder à des valeurs correctes des angles extrêmes de ce mouvement.

### 4.1.4. Alternance D/G

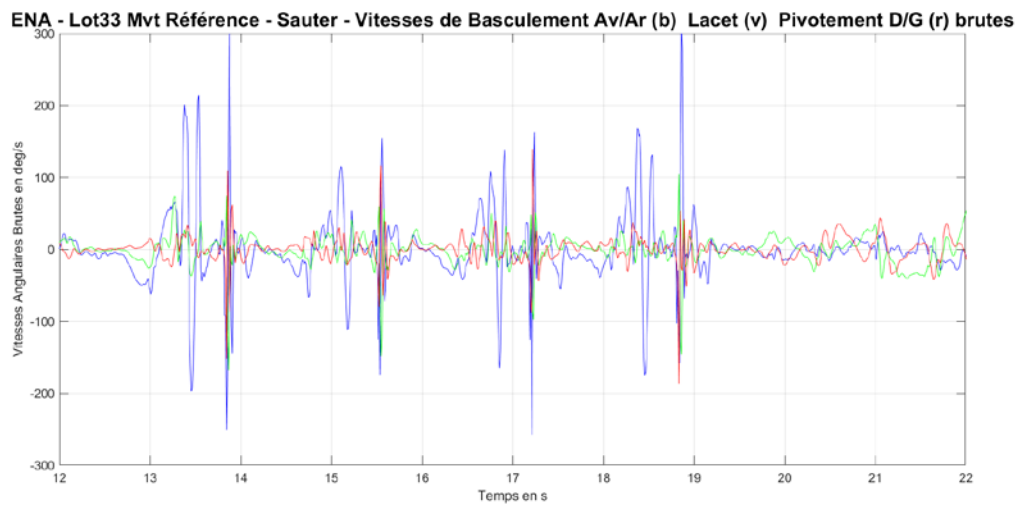
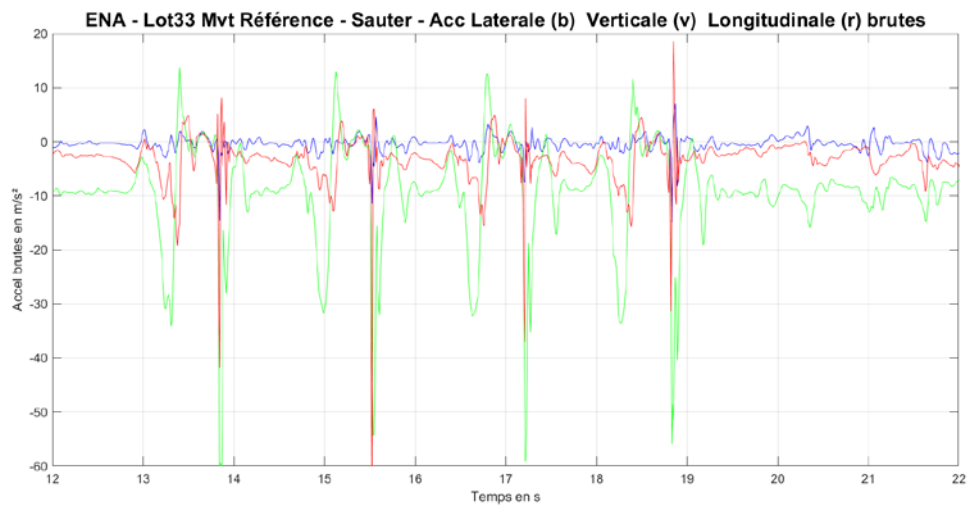
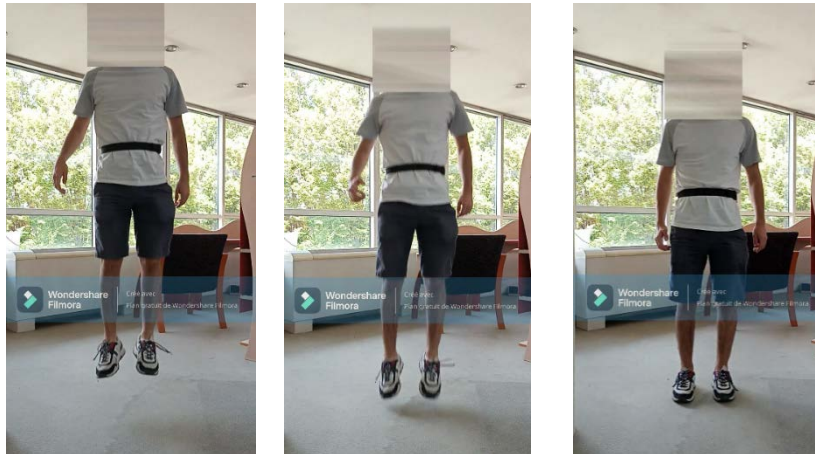
Nous avons testé cette configuration pour avoir des ordres de grandeur des accélérations associées à des changements d'appuis au sol. Ceux-ci sont réalisés de manière douce : on lève alternativement chaque pied puis le repose.

Seule l'accélération verticale est impactée, avec des sollicitations au niveau de la ceinture qui atteignent +/-2 à 2.5 m/s<sup>2</sup>, mais cela traduit une légère inclinaison latérale du corps une fois le pied levé et c'est la transition entre des valeurs positive et négative qui correspond à la repose du pied. Les vitesses angulaires apparaissent sur tous les axes mais elles restent de courtes durées et d'amplitudes modérées de +/-10 à 45 deg/s selon les cas, et on voit clairement qu'elles sont associées aux transitions de mouvement des pieds.



**FIGURE 27 : ANALYSE D'UN MOUVEMENT D'ALTERNANCES DROITE/GAUCHE : POSITIONS EXTREMES, ACCELERATIONS ET VITESSES ANGULAIRES**

#### 4.1.5. Sauter sur place



**FIGURE 28 : ANALYSE D'UN MOUVEMENT DE SAUT SUR PLACE : POSITIONS EXTREMES, ACCELERATIONS ET VITESSES ANGULAIRES**

Ces mouvements engendrent des accélérations intenses jusqu'à  $-60 \text{ m/s}^2$  (soit  $-6 \text{ g}$ ) surtout en vertical bien évidemment, mais très ponctuelles. On relève également des pointes de vitesses angulaires (jusqu'à  $300 \text{ deg/s}$ ), mais qui correspondent plutôt à des perturbations du capteur très fortement sollicité lorsque le corps regagne le sol.

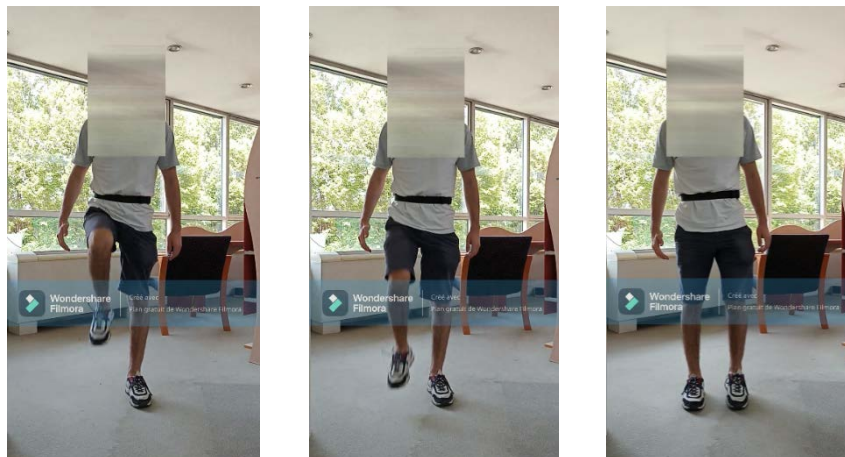
#### 4.1.6. Taper du pied

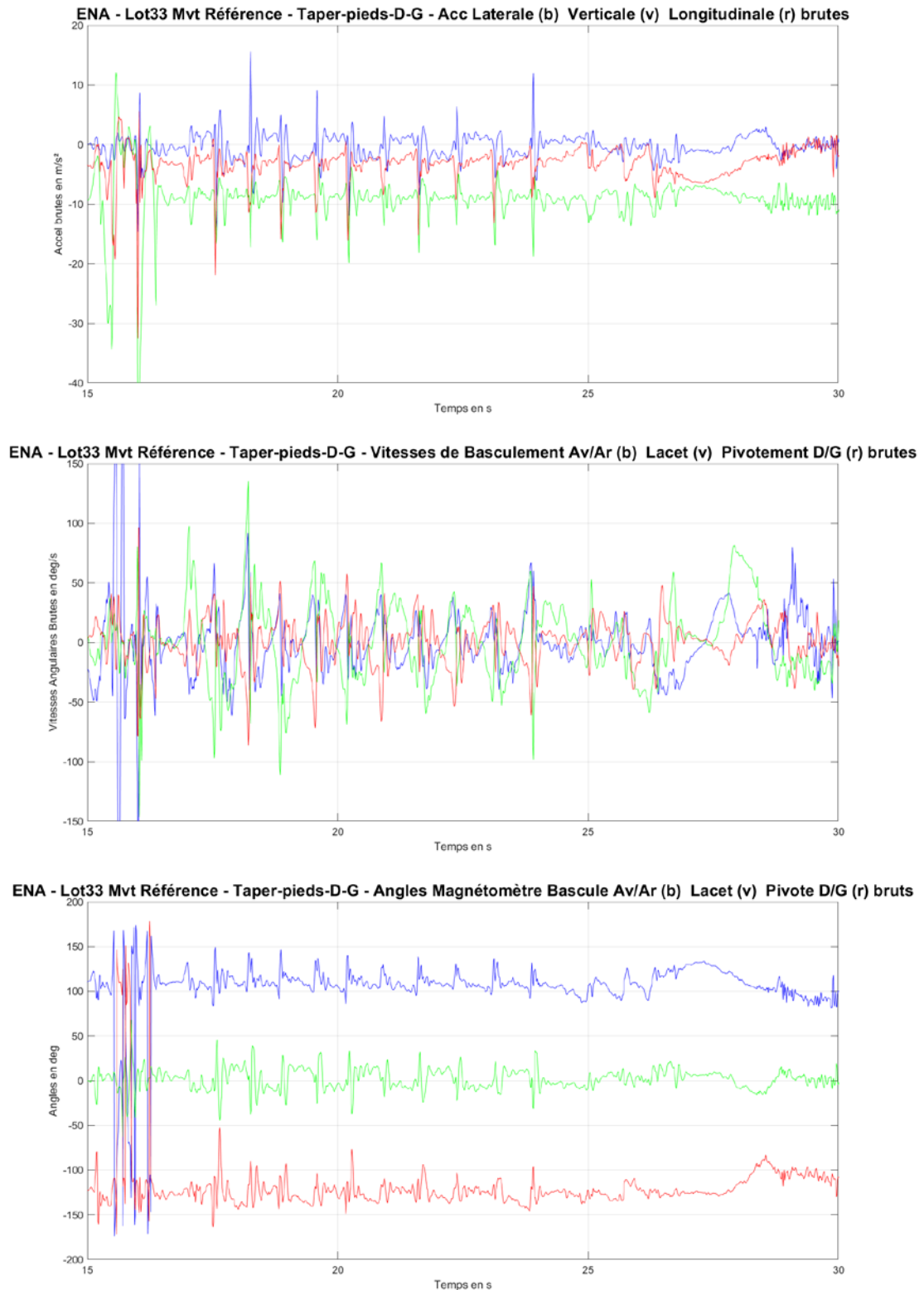
Ce mouvement est beaucoup plus rythmé que l'alternance droite/gauche : le sujet lève la cuisse en position horizontale, puis frappe fermement le sol, avant d'enchaîner avec le même mouvement de l'autre pied. Il y a dans cet essai 5 frappes de chaque pied en 7 s.

Sur les accélérations, les signaux verticaux ne sont pas significativement plus importants que sur les autres axes, ce qui est étrange. La vidéo fait clairement apparaître un léger pivotement droite/gauche, mais rien de significatif sur les autres axes, or il y a des vitesses angulaires sur les 3 axes. De même les angles du magnétomètre sont de même allure et amplitude sur les 3 axes.

On peut conclure qu'avec ce type d'essai assez brutal, on entre clairement dans un domaine où les capteurs de l'EMMAPhone produisent plus de signaux parasites, que d'informations cohérentes. Il en va de même sur des essais de type marche rapide ou course. Il faudra donc être rigoureux dans l'exploitation des signaux des EMMAPhones montés au niveau des lombaires des passagers de la navette en cas de mouvements violents et de signaux très bruités.

A noter que nous avons volontairement utilisé des signaux bruts pour ces investigations, car le filtre utilisé pour la dynamique navette (Butterworth ordre 10 avec une fréquence de coupure de 5 Hz, en concertation avec la responsable du lot 3.2, afin d'être homogène) avait logiquement pour conséquence de réduire l'amplitude des pics, mais de les élargir dans le temps ce qui aurait pu nous conduire à des conclusions erronées sur la nature des mouvements analysés.





**FIGURE 29 : ANALYSE D'UN MOUVEMENT DE TAPER DES PIEDS : POSITIONS EXTREMES, ACCELERATIONS ET VITESSES ANGULAIRES ET ANGLES (MAGNETOMETRE)**

#### 4.1.7. Bilan

**Nous avons ainsi clairement établi quelles sont les possibilités et limites des capteurs internes d'un smartphone pour étudier les mouvements des passagers de la navette autonome** utilisée dans le cadre d'ENA. **Les résultats concernant les mouvements de basses fréquences sont tout à fait corrects**, ce qui n'est qu'une confirmation pour nous, les EMMAPhones étant utilisés au LMA depuis une dizaine d'années pour des applications de dynamique des véhicules et nous avons soigneusement validé les sollicitations obtenues en comparaison de notre véhicule laboratoire Peugeot 307, doté de capteurs haut de gamme.

De même, dès les essais de Vérification d'Aptitude et de Service Régulier de cette navette lors de son acquisition, les EMMAPhones utilisés avaient produits des signaux très comparables à ceux des capteurs internes de la navette. Par contre, il convient d'admettre que pour des mouvements à fréquence élevée et/ou incluant des chocs assez brutaux, on entre clairement dans un domaine où les capteurs de l'EMMAPhone produisent plus de signaux parasites que d'informations pertinentes.

En respectant ces enseignements, certains des mouvements étudiés ici vont tout de même nous fournir une "signature" typique en termes de composantes des accélérations et mouvements de rotation auxquelles certains passagers de la navette ont été soumis, et qui pourra être utilisée dans les analyses présentées dans les paragraphes suivants.

## 4.2. SYNTHÈSE DES SOLLICITATIONS DYNAMIQUES DES PASSAGERS DE LA NAVETTE EN FREINAGE D'URGENCE

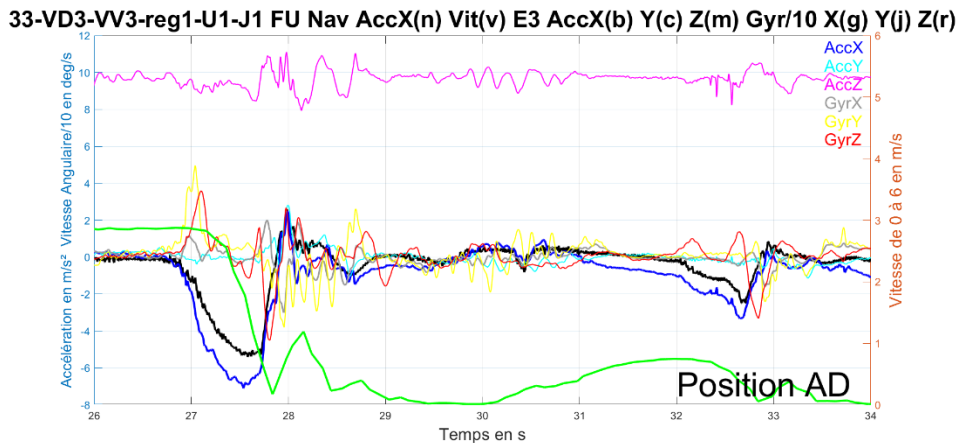
### 4.2.1. Préambule

Il convient de rappeler les spécificités de ces manœuvres qui ont eu lieu en conclusion des essais nominaux menés lors de l'expérimentation sur les pistes de TRANSPOLIS :

- Les sujets sont informés qu'un freinage d'urgence va se produire, ils viennent d'enchaîner une trentaine d'essais nominaux (démarrage, freinage et virage à différentes vitesses et avec différents réglages de la navette) : ils ont donc déjà un certain "vécu" du fonctionnement de cette navette.
- Ils n'ont pas à comprimer l'Activ5 dans leur main gauche pour exprimer leur ressenti et ont donc pour consigne de se tenir des 2 mains à des poignées au plafond ou barres verticales.
- Nous disposons des mesures des EMMAPhones montés sur le châssis de la navette et au niveau des lombaires pour les 3 passagers de la navette, ainsi que des vidéos prises de l'intérieur de la navette.

Nous débutons cette présentation par un **mode d'emploi des figures** présentées dans ce paragraphe basé sur la Figure 30 ci-dessous.





**FIGURE 30, MODE D'EMPLOI DES FIGURES UTILISEES POUR DECRIRE LA DYNAMIQUE DES PASSAGERS DE LA NAVETTE EN FREINAGE D'URGENCE**

Au début du titre figurent le nom de l'essai avec son numéro d'ordre (ici 33), puis un résumé des consignes de vitesses (ici vd3-vv3) en ligne droite vd, puis éventuellement en virage vv si l'essai présenté en inclut un, avec les valeurs de vitesse 05, 2, 3 ou 4 exprimées en m/s.

Suit le réglage en accélération (ici reg1 qui sera systématiquement utilisé pour les freinages d'urgence). L'accélération longitudinale AccX de la navette est présentée en noir et sa vitesse en vert.

Suivent les 6 composantes des mouvements des passagers : les accélérations longitudinales en bleu, transversale en cyan et verticale en magenta et les vitesses angulaires selon l'axe X en gris, l'axe Y en jaune et l'axe Z en rouge. Les échelles figurent à gauche, à noter que les vitesses angulaires ont été divisées par 10. La position du sujet est indiquée en bas à droite.

A noter que **les signaux ont été repositionnés dans un repère lié au mouvement de la navette.** Il en résulte que la nature des mouvements diffère selon la position des sujets :

Pour les positions DLD et DLF, l'accélération longitudinale provoquée par le freinage de la navette correspond en fait à une accélération latérale au niveau du bassin du sujet et inversement.

Le mouvement de pivotement latéral droite/gauche correspond au signal GyrX pour les positions AD, AF, DD, et DF, et au signal GyrY pour DLD et DLF.

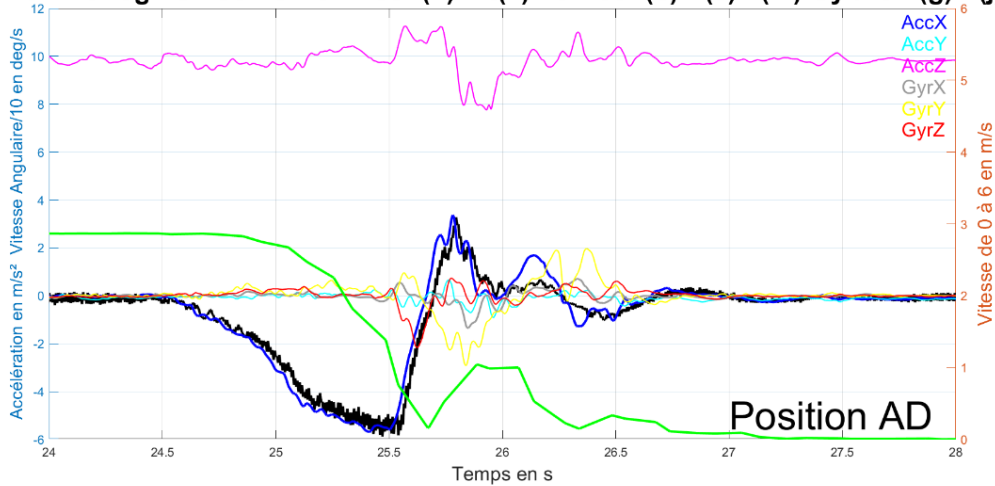
Le mouvement de basculement avant/arrière correspond au signal GyrY pour les positions AD, AF, DD, et DF, et au signal GyrX pour DLD et DLF.

Le mouvement de lacet correspond toujours au signal GyrZ.

#### 4.2.2. Les passagers assis

**Pour 13 sur 15 des passagers en position AD (assis dos à la route), le signal d'accélération longitudinale est une recopie quasi parfaite de celui de la navette, semblable à l'exemple présenté à la Figure 31.** Cela s'explique car le passager est projeté au fond de son siège lors du freinage, ce qui le cale encore davantage. La décélération maximale de la navette lors de ces freinages d'urgence se situe entre -4 et -5,5 m/s<sup>2</sup>.

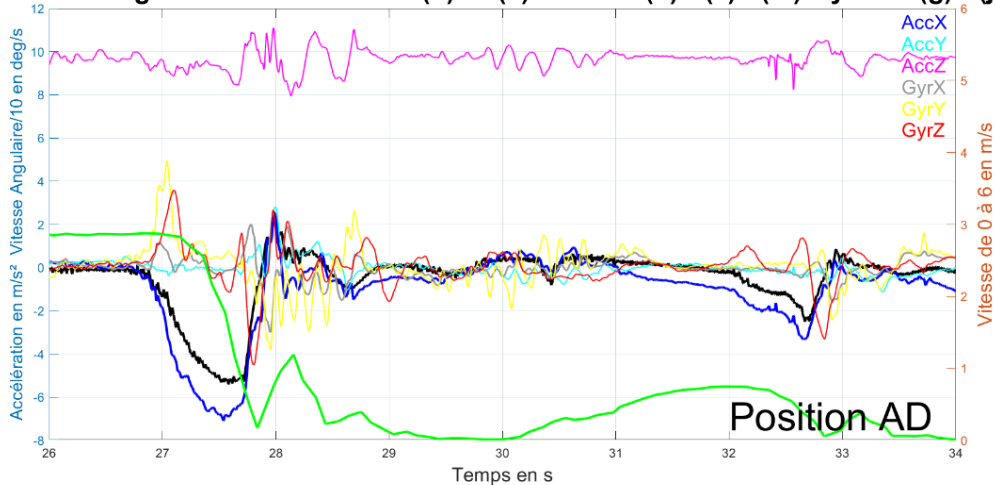
33-VD3-VV3-reg1-U1-J6 FU Nav AccX(n) Vit(v) E3 AccX(b) Y(c) Z(m) Gyr/10 X(g) Y(j) Z(r)



**FIGURE 31 : POUR 87 % DES PASSAGERS EN POSITION AD, LE SIGNAL D'ACCELERATION LONGITUDINALE EST UNE RECOPIE DE CELUI DE LA NAVETTE, ET LES AUTRES SIGNAUX SONT TRES FAIBLES**

Pour un passager représenté à la Figure 32, on observe une accélération du passager notablement supérieure à celle de la navette (7 contre 5  $m/s^2$ ), mais on constate également une vitesse de basculement importante (courbe jaune) lorsque la sollicitation de freinage s'établit, ce qui traduit un basculement du passager vers l'avant en début de freinage et il est donc reprojété ensuite au fond de son siège. Dans l'autre cas la décélération maximale de la navette n'est que de -2,5, au lieu de -4 pour le sujet, c'est donc un cas très particulier (non représenté).

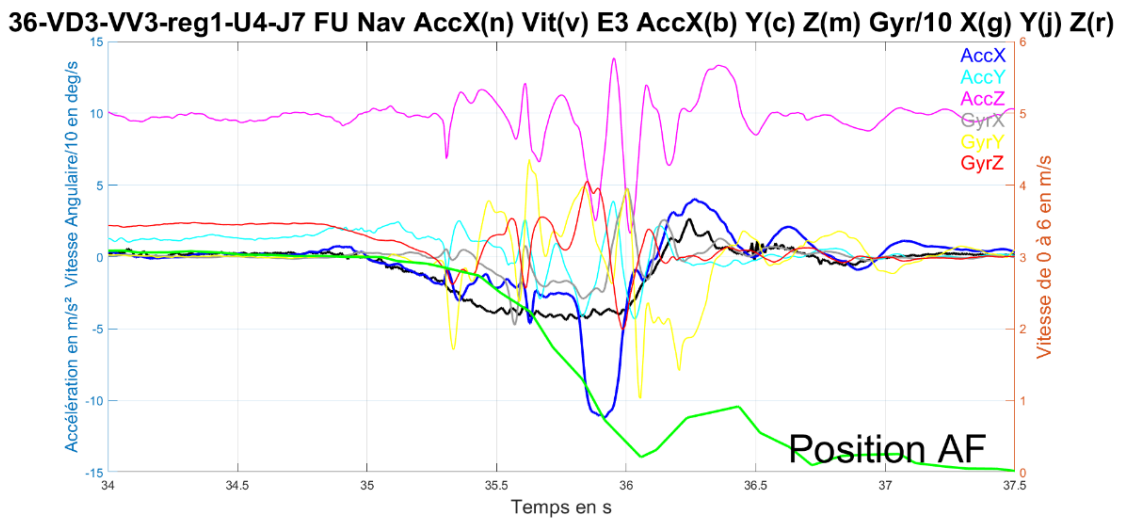
33-VD3-VV3-reg1-U1-J1 FU Nav AccX(n) Vit(v) E3 AccX(b) Y(c) Z(m) Gyr/10 X(g) Y(j) Z(r)



**FIGURE 32 : CE PASSAGER EN POSITION AD SE PENCHE EN AVANT AU DEBUT DU FREINAGE, IL SUBIT ENSUITE UNE ACCELERATION SUPERIEURE A CELLE DE LA NAVETTE QUI LE PROJETTE AU FOND DE SON SIEGE**

Seule la moitié des **passagers en position AF (assis face à la route)** présente un signal d'accélération longitudinale identique à de celui de la navette, on constate donc une diversité bien plus grande des comportements que pour la position AD. Cette configuration AF est identique à celle que nous expérimentons tous en voiture lors d'un freinage intense.

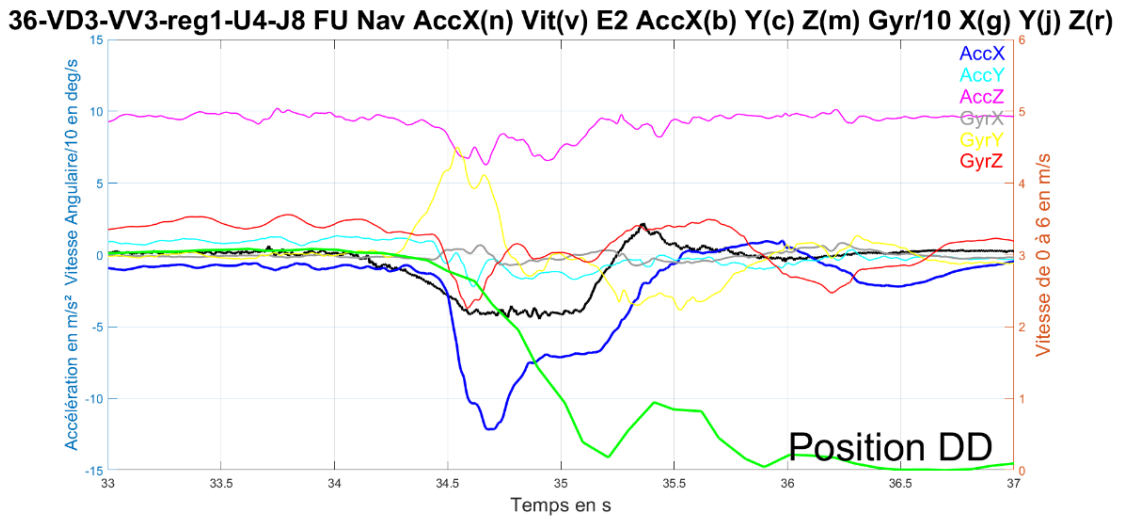
Pour les autres cas, l'accélération longitudinale du sujet est souvent supérieure d'1 à 1,5 m/s<sup>2</sup> à celle de la navette, soit tout au long du freinage, ou juste ponctuellement ou en fin de freinage. Nous allons présenter Figure 33 un exemple beaucoup plus complexe, où l'accélération longitudinale du sujet s'éloigne significativement de celle de navette. Alors que les 2 signaux sont identiques au début, l'accélération longitudinale du sujet se réduit entre -2 et -2,5 m/s<sup>2</sup> alors celle de la navette se stabilise à -4, mais on constate simultanément des signaux complexes sur les vitesses de lacet et de basculement, ainsi que sur l'accélération verticale. L'accélération longitudinale du sujet augmente ensuite très brutalement à -11 m/s<sup>2</sup> pendant 0.2 s avec de violentes alternances de l'accélération verticale. La vidéo montre que la passagère est projetée vers l'avant et attrape alors la barre verticale proche de la porte devant elle, pour s'y cramponner fermement et ce mouvement s'accompagne sans doute de plusieurs déplacements de ses appuis au sol.



**FIGURE 33 : CETTE PASSAGERE EN POSITION AF EST PROJETEE VERS L'AVANT EN FIN DE FREINAGE ET SE RETIENT A UNE BARRE VERTICALE AVEC DES CHANGEMENTS D'APPUIS AU SOL**

#### 4.2.3. Les passagers debout face ou dos au mouvement

Tous les passagers en position DD, debout dos au mouvement de la navette, subissent en freinage d'urgence une accélération longitudinale nettement amplifiée et prolongée par rapport à celle de la navette. Un cas typique est présenté à la Figure 34. La pointe d'AccX du passager monte à -12 m/s<sup>2</sup> contre seulement -4 pour la navette, puis se stabilise vers -7, elle est prolongée de 0.2 s par rapport à celle de la navette. Les passagers sont projetés dans le sens de déplacement avec des pointes maximales d'accélération qui s'échelonnent de 8 à 12 m/s<sup>2</sup> : **on est donc sur des sollicitations doublées à triplées par rapport au freinage de la navette.** Les mouvements sur les autres degrés de liberté sont généralement d'amplitudes réduites.

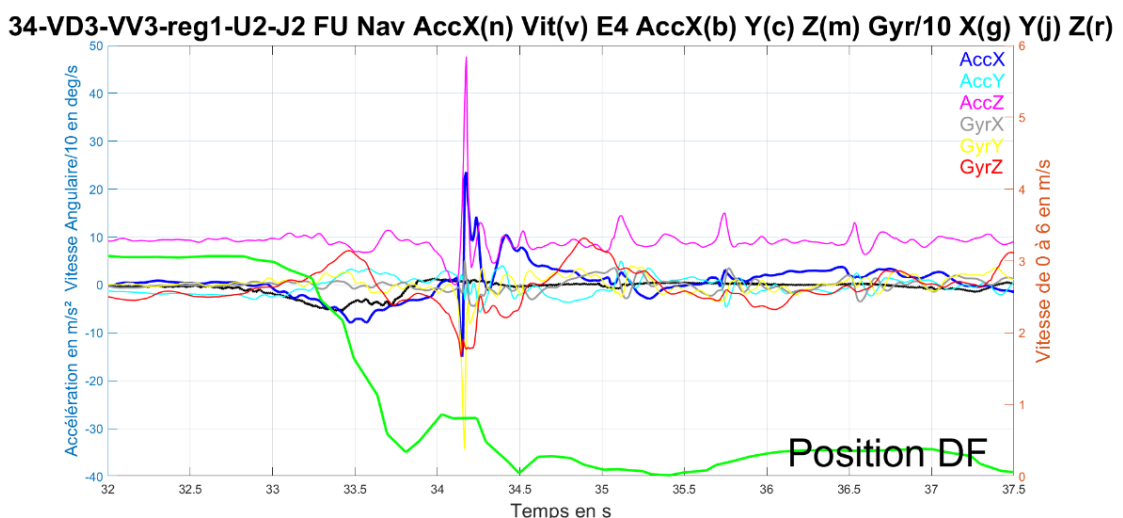


**FIGURE 34 : SOLLICITATION TYPIQUE POUR UN PASSAGER EN POSITION DD LORS D'UN FREINAGE D'URGENCE : SA DECELERATION EST NETTEMENT AMPLIFIEE ET PROLONGEE**

Les réactions des passagers en position DF, debout face au mouvement de la navette, en freinage d'urgence sont beaucoup plus diversifiées. Pour 5 d'entre eux la décélération suit quasiment celle de la navette, pour 3 la sollicitation est amplifiée et prolongée, pour un passager elle est prolongée sans être amplifiée et pour un autre amplifiée sans être prolongée. Ces cas ressemblent fortement à ceux déjà illustrés ci-dessus, nous ne les présenterons pas davantage. 5 autres passagers ont une réaction plus originale avec de forts rebonds, nous présentons un cas à la Figure 35.

Alors que dans un premier temps, sa décélération n'est que peu amplifiée par rapport à celle de la navette (maximum au temps 33,5 s), le passager subit ensuite (au temps 34.15 s) une brutale alternance d'accélération longitudinale à  $-14/+23$   $m/s^2$ , avec une énorme pointe d'accélération verticale à plus de 4 g, accompagnée d'un pic de vitesse de pivotement latéral. La sollicitation longitudinale positive inversée au freinage de la navette met 1 sec pour s'atténuer.

La vidéo met en évidence cette phase de rebond plus forte que la phase de freinage elle-même, ainsi qu'une quasi perte d'équilibre, ce qui est cohérent avec ces mouvements brusques après le freinage.

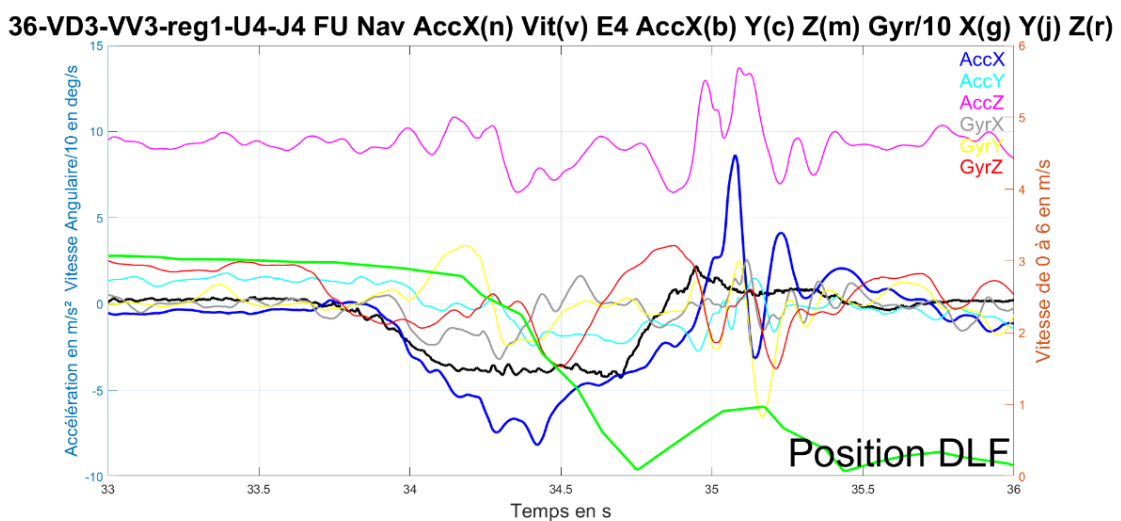


**FIGURE 35 : EXEMPLE D'UN PASSAGER EN POSITION DF LORS D'UN FREINAGE D'URGENCE. IL SUBIT UN BRUTAL REBOND EN FIN DE FREINAGE AVEC DE MULTIPLES ALTERNANCES DE SOLLICITATIONS.**

#### 4.2.4. Les passagers debout en position latérale

Nous allons traiter ensemble tous les passagers debout en position latérale DLF et DLD, sans distinguer s'ils sont face ou dos aux portières de la navette, ce qui ne change pas grand-chose. Les mouvements des passagers sont beaucoup plus diversifiés que pour les 4 autres positions :

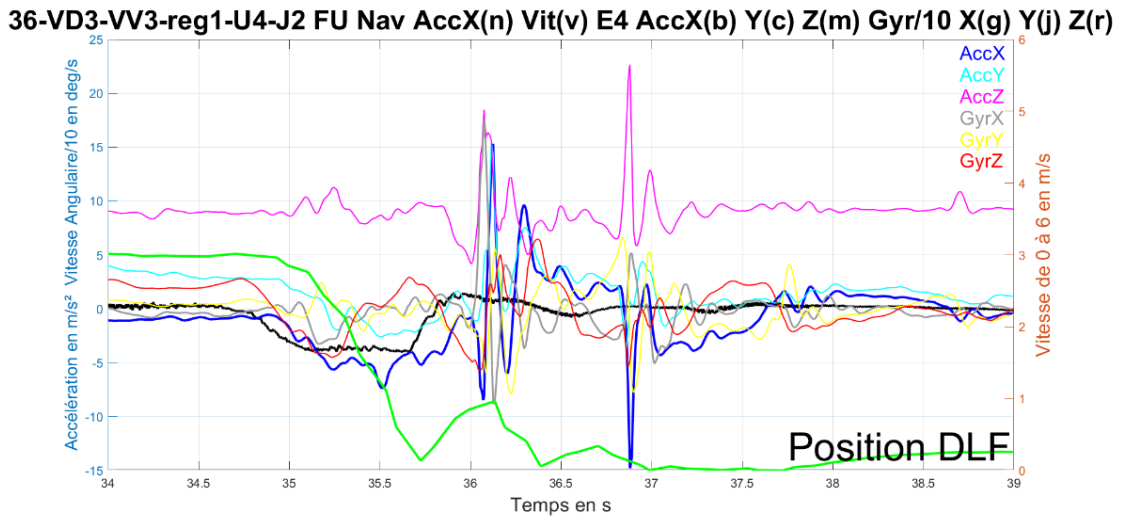
**Pour 18 cas, l'accélération longitudinale, qui est en fait une accélération latérale pour le passager, est amplifiée par rapport à celle de la navette, mais elle est surtout suivie d'un rebond (accélération positive) ; celui peut être qualifié de léger dans 5 cas ( $accX < 5 \text{ m/s}^2$ ), de modéré dans 4 cas ( $< 10 \text{ m/s}^2$ , exemple figure 28), d'intense dans 5 cas ( $< 20 \text{ m/s}^2$ ) et de très violent dans 3 cas ( $> 20 \text{ m/s}^2$ ). Dans 9 cas, la décélération du passager est assez proche de celle de la navette, parmi lesquels 2 sont prolongés, pour 3 passagers le profil d'accélération est principalement marqué par de fortes oscillations, et une passagère effectue de nombreux changements d'appuis.**



**FIGURE 36 : EXEMPLE D'UNE PASSAGÈRE EN POSITION LATÉRALE DLF LORS D'UN FREINAGE D'URGENCE : SON ACCÉLÉRATION EST AMPLIFIÉE PUIS ELLE SUBIT UN REBOND MODÉRÉ EN FIN DE FREINAGE.**

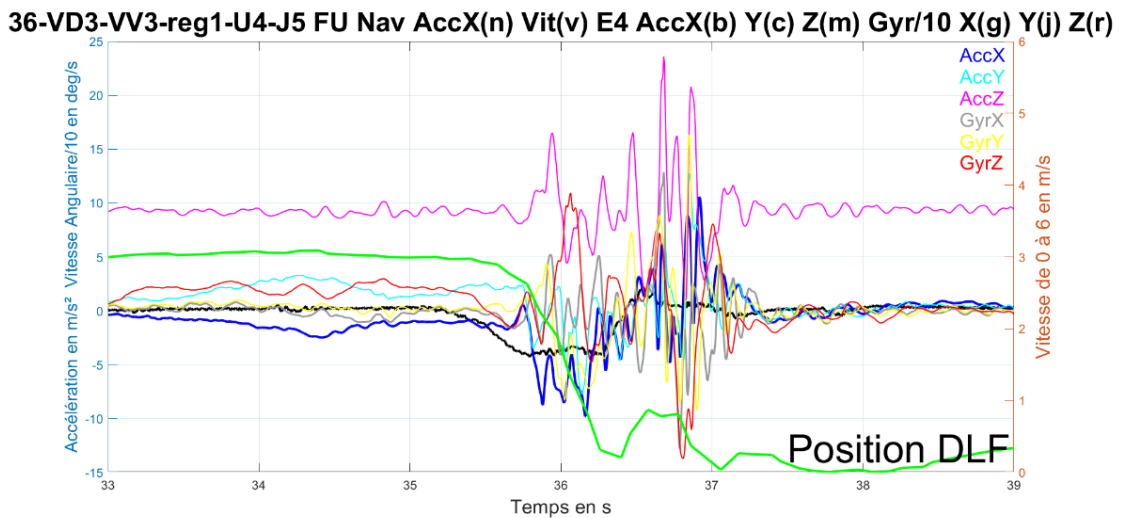
La passagère de la Figure 36 voit son accélération longitudinale doublée par rapport à celle de la navette ( $-8$  vs  $-4 \text{ m/s}^2$ ), puis elle subit un rebond bref et modéré qui culmine à  $8 \text{ m/s}^2$ . Comme elle est suspendue à deux poignées au plafond avec les bras écartés, elle est d'abord projetée dans le sens de déplacement de la navette, puis en direction opposée. Sa grande taille lui permet de conserver ses appuis au sol en se levant simplement sur la pointe des pieds, ce qui explique les sollicitations très faibles sur tous les autres degrés de liberté.

La passagère présentée à la Figure 37, en position latérale DLF, subit un mouvement beaucoup plus violent avec une succession d'alternances d'accélération longitudinale ( $-9/+15/-6/+10 \text{ m/s}^2$ ) à l'issue du freinage d'urgence de la navette : elle est également suspendue à deux poignées au plafond avec les bras écartés, son bassin fait alors plusieurs oscillations latérales (dans la direction du mouvement de la navette) avant de se stabiliser.



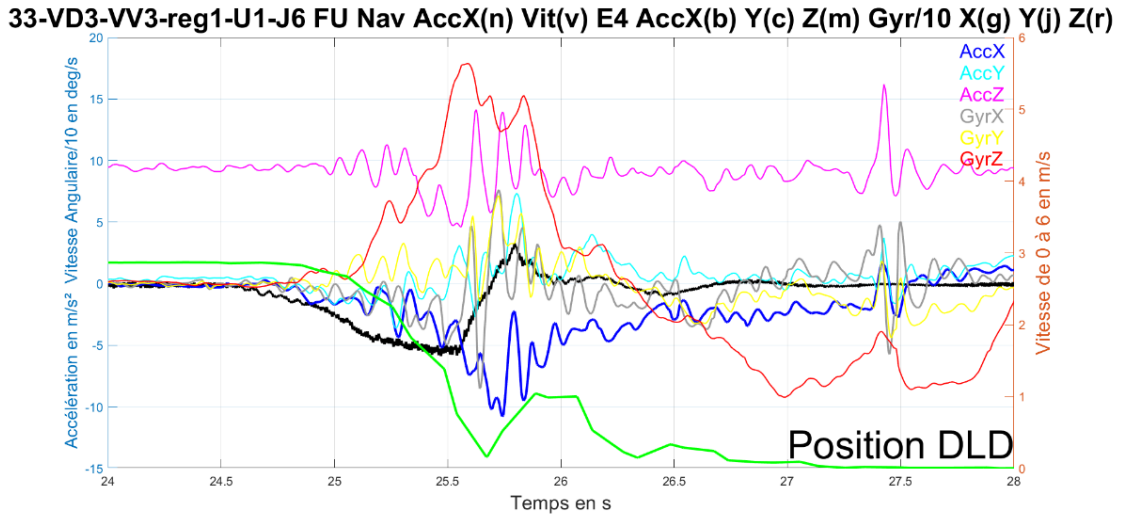
**FIGURE 37 : EXEMPLE D'UNE PASSAGERE EN POSITION LATERALE DLF LORS D'UN FREINAGE D'URGENCE : SON ACCELERATION EST AMPLIFIEE PUIS ELLE SUBIT UNE SUCCESSION D'OSCILLATIONS LATERALES.**

Ce type de mouvement de balancier est également observé pour le passager présenté à la Figure 38, mais il perd même ses points d'appui au sol, ce qui se traduit par les alternances de rotation en pivotement latéral (jusqu'à 160  $deg/s$ , signal jaune) ainsi que de nombreuses variations brutales de l'accélération verticale ( $-10/+14 m/s^2$ , signal magenta).



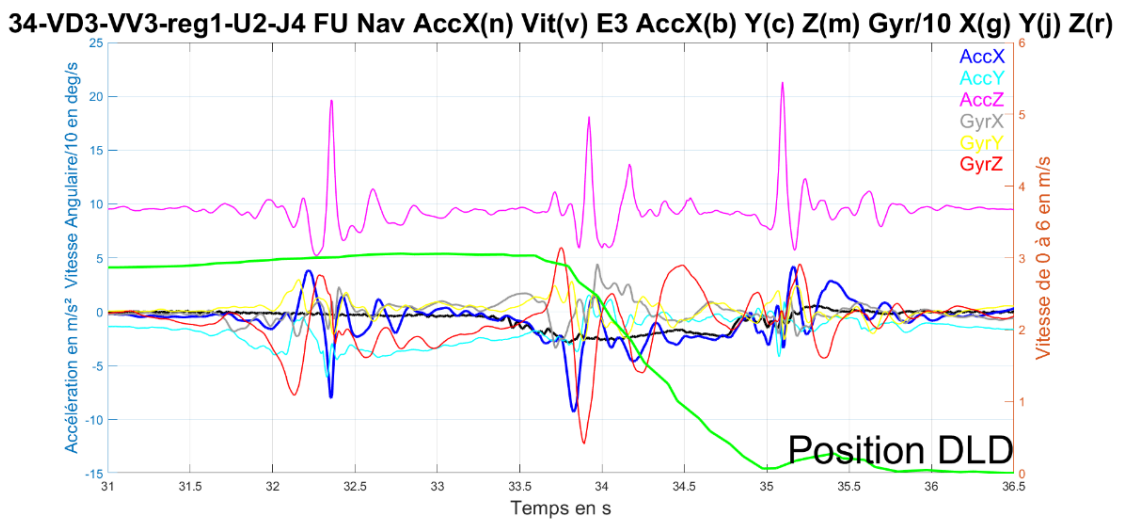
**FIGURE 38 : EXEMPLE D'UN PASSAGER EN POSITION LATERALE DLF LORS D'UN FREINAGE D'URGENCE : IL SE TIENT A DEUX POIGNEES BRAS ECARTES ET EFFECTUE UN MOUVEMENT DE BALANCIER EN PERDANT SES POINTS D'APPUI AU SOL.**

Une variante intéressante est illustrée à la Figure 39. Comme ce passager se maintient à une seule poignée et uniquement de la main droite, il est projeté vers l'avant de la navette et il est soumis simultanément à une forte rotation avec une vitesse de lacet qui monte progressivement à 180  $deg/s$  mais se prolonge pendant 1 sec, d'où un pivotement de 90 degrés d'amplitude soit un quart de tour.



**FIGURE 39 : EXEMPLE D'UN PASSAGER EN POSITION LATÉRALE DLD LORS D'UN FREINAGE D'URGENCE : IL TIENT A UNE SEULE POIGNÉE ET EST PROJÉTÉ VERS L'AVANT DE LA NAVETTE AVEC UNE FORTE ROTATION.**

Le dernier exemple présenté Figure 40 est assez spécifique : la passagère qui se tient également aux 2 poignées au plafond effectue d'abord un pas en avant lorsque la navette amorce son virage (après l'instant 32 s) puis deux changements d'appui en latéral lors du début et de la fin du freinage (avant 34 et après 35 s), qui s'accompagnent de pointes de décélération respectives à  $-9$  et  $+4$  m/s<sup>2</sup>. Ces phénomènes produisent aussi de légers mouvements de lacet.



**FIGURE 40 : EXEMPLE D'UNE PASSAGÈRE EN POSITION LATÉRALE DLD QUI EFFECTUE DE NOMBREUX CHANGEMENTS D'APPUI LORS D'UN FREINAGE D'URGENCE.**

#### 4.2.5. Synthèse

Pour grande majorité des passagers en position "assis dos à la route", le signal d'accélération longitudinale du passager en freinage d'urgence est une recopie quasi parfaite de celui de la navette. Cela s'explique car le passager est projeté au fond de son siège lors du freinage, ce qui le cale encore davantage. Seule la moitié des passagers en position "assis face à la route" présente un signal d'accélération longitudinale identique à de celui de la navette. Pour les autres cas, l'accélération longitudinale du sujet est souvent supérieure d' $1$  à  $1.5$  m/s<sup>2</sup> à celle de la navette.

Tous les passagers en position "debout dos au mouvement de la navette" subissent une accélération longitudinale nettement amplifiée et prolongée par rapport à celle de la navette. Les passagers sont projetés dans le sens de déplacement avec des pointes maximales d'accélération qui s'échelonnent de 8 à 12  $m/s^2$  : on est donc sur des sollicitations doublées à triplées par rapport au freinage de la navette. **Les réactions des passagers en position "debout face au mouvement de la navette" sont beaucoup plus diversifiées.** Pour 5 d'entre eux la décélération suit quasiment celle de la navette, pour 3 la sollicitation est amplifiée et prolongée, pour un passager elle est prolongée sans être amplifiée et un autre amplifiée sans être prolongée. 5 autres passagers ont une réaction plus originale avec de forts rebonds (accélération inversée).

Pour 18 passagers debout en position latérale, l'accélération est amplifiée par rapport à celle de la navette, mais elle est surtout suivie d'un rebond (accélération positive) dont les amplitudes s'étendent de 4 à 26  $m/s^2$ . Dans 9 cas, la décélération du passager est assez proche de celle de la navette, pour 4 passagers le profil d'accélération est principalement marqué par de fortes oscillations associées à des changements d'appuis.

### 4.3. SYNTHÈSE DES SOLLICITATIONS DYNAMIQUES DES PASSAGERS DE LA NAVETTE LORS DE FREINAGES INTEMPESTIFS

Le mode d'emploi des figures est identique à celui des freinages d'urgence (4.2.1). Il convient cependant de rappeler les spécificités de ces manœuvres qui ont eu lieu de manière inopinée lors des tours de circuit menés à l'issue des essais nominaux, lors de l'expérimentation sur les pistes de TRANSPOLIS.

- Les sujets ne sont pas informés qu'un freinage violent va se produire, pas plus que les expérimentateurs, ces freinages étant déclenchés par la navette en réponse à une situation donnée (brin d'herbe qui bouge...)
- Ils ont l'Activ5 dans leur main gauche à comprimer pour exprimer leur ressenti et ont donc une seule main disponible pour se tenir à des poignées au plafond ou barres verticales, ce qui distingue fortement ces freinages intempestifs des freinages d'urgence.
- Nous disposons des mesures des EMMAPhones montés sur le châssis de la navette et au niveau des lombaires pour les 3 passagers de la navette ainsi que des vidéos prises de l'intérieur de la navette.

Quatre freinages intempestifs (FI) ont été recensés, nous allons présenter les réactions des passagers les plus spectaculaires.

Dans ce premier cas illustré à la Figure 41, la passagère en position DLF est d'abord projetée dans le sens du déplacement avec une accélération (en bleu) qui culmine à  $-12 m/s^2$ , soit triplée par rapport à celle de la navette. Elle rentre en contact avec le siège au niveau des cuisses ce qui provoque la pointe d'accélération positive à  $8 m/s^2$  (23.7 s). Du fait de son seul point de maintien au plafond, elle pivote violemment (Images 2 et 3 extraites de la vidéo) avec une vitesse de rotation qui atteint 480 deg/s et effectue un demi-tour complet pour se retrouver en position DLD, dos aux portières.

Son mouvement de lacet en sens inverse pour retrouver sa position initiale (de 25 à 27 s) est volontaire et dépasse à peine une vitesse de 100 deg/s. Cette différence énorme sur les vitesses de lacet illustre bien la violence du mouvement provoqué par le freinage intempestif par rapport à une action volontaire. On constate également une forte action sur l'Activ5 (orange) pendant toute cette phase de freinage.



La passagère en position AF est également projetée vers l'avant, avec une accélération de  $-12 \text{ m/s}^2$ . Il est intéressant de noter qu'elle n'apparaît pas sur la première image, entre dans le champ sur la seconde et est bien visible sur la 3ème. On voit également qu'elle se maintient à la barre verticale devant elle, en cours de freinage. Son action sur l'Activ5 est également intense. On remarque enfin que la composante d'accélération longitudinale (en bleu) après le freinage est accompagnée d'une composante de l'accélération verticale (en magenta) ce qui traduit sa position fortement penchée vers l'avant bien visible sur la 3ème image.

Le passager en position DD est projeté violemment vers l'arrière, avec une accélération qui culmine à  $-14 \text{ m/s}^2$ .

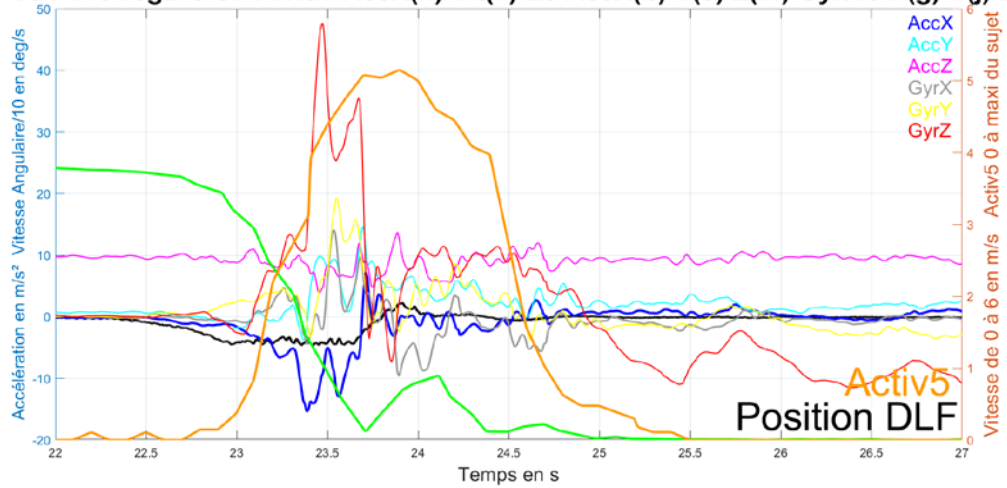
Le second freinage intempestif (Figure 42) se produit face à la vidéo contrairement au précédent. Le passager assis en position AD subit une accélération rigoureusement identique à celle de la navette, ce qui est conforme à ce que nous avons déjà constaté lors des freinages d'urgence : pour cette position assis dos au mouvement, les passagers sont bien calés dans leur siège et ne bougent absolument pas. Celui-ci réagit quand même sur l'Activ5, manifestant sans doute sa surprise.

Le passager en position DLD subit une combinaison de mouvements encore plus violente que celle du FI N°1. Il est d'abord projeté très brutalement vers l'avant au point de heurter les genoux du passager AD, mais comme il accompagne le freinage de la navette, il subit une décélération moins forte que celle-ci, avant qu'elle ne s'inverse pour atteindre furtivement  $20 \text{ m/s}^2$ , sans doute lorsqu'il heurte le passager AD. Il glisse cependant à droite des genoux de ce passager et amorce un brutal quart de tour (sa vitesse de lacet monte à  $400 \text{ deg/s}$ ) jusqu'à atteindre la position extrême permise par son maintien à la poignée au plafond. Il se rétablit ensuite plus tranquillement avec plusieurs changements d'appuis. Il agit également fortement sur l'Activ5. **Un tel mouvement provoqué par un freinage intempestif dans des conditions proches de l'exploitation est clairement dangereux.**

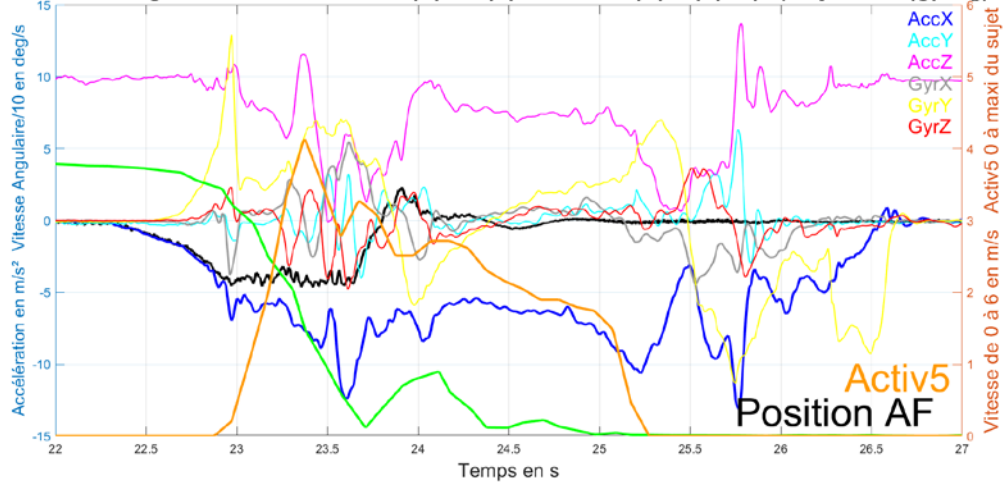
La passagère en position DF se tient également de la main droite à une poignée au plafond : elle subit une projection vers l'avant avec une accélération plus forte que celle de la navette (pointe furtive à  $-10 \text{ m/s}^2$ ), effectue de nombreux changements d'appui visibles sur l'accélération verticale, puis une rotation d'un quart de tour avec une vitesse de lacet de  $-250 \text{ deg/s}$  (sens opposé au passager DLD). Son action sur l'Activ est plus modérée que celles des autres passagers.



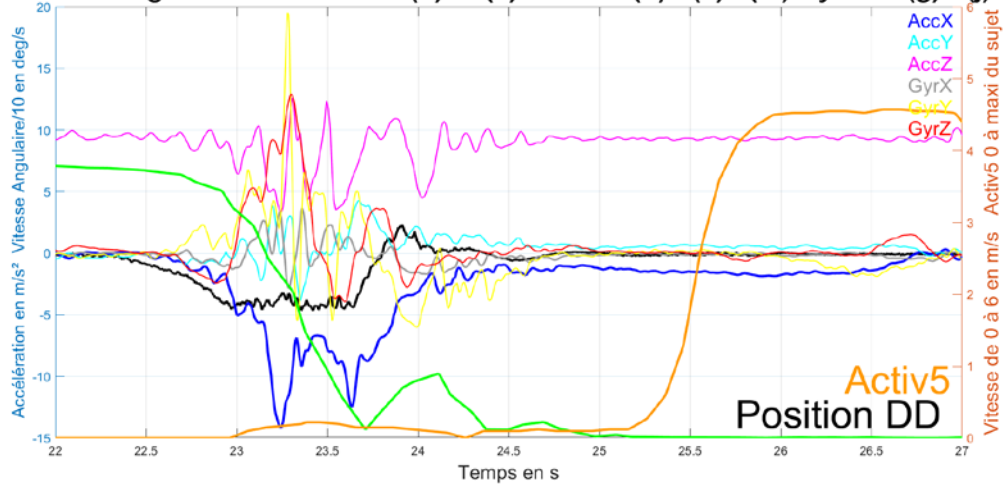
28-vd4-vv3-reg2-G-J7 FI Nav AccX(n) Vit(v) E3 AccX(b) Y(c) Z(m) Gyr/10 X(g) Y(j) Z(r)



28-vd4-vv3-reg2-G-J7 FI Nav AccX(n) Vit(v) E2 AccX(b) Y(c) Z(m) Gyr/10 X(g) Y(j) Z(r)



28-vd4-vv3-reg2-G-J7 FI Nav AccX(n) Vit(v) E4 AccX(b) Y(c) Z(m) Gyr/10 X(g) Y(j) Z(r)



**FIGURE 41 : FREINAGE INTÉMPÊSTIF N°1 : EXTRAITS DE LA VIDEO. POUR LA PASSAGÈRE EN POSITION DLF, FORTE ACCELERATION, DEMI-TOUR COMPLET POUR SE RETROUVER EN DLD AVEC UNE VITESSE DE LACET PROCHE DE 500 °/s. LA PASSAGÈRE EN POSITION AF SUBIT ÉGALEMENT UNE FORTE ACCELERATION LONGITUDINALE.**

Lors du 3<sup>e</sup> FI (Figure 43), la passagère en position DLD est d'abord projetée violemment vers l'avant, mais comme précédemment elle accompagne le freinage de la navette, et subit ainsi parfois une décélération moins forte que celle-ci. Elle perd cependant l'équilibre et tombe quasiment sur le passager AD (instant 98,3 s), en amorçant un mouvement de rotation. Les pointes simultanées d'accélération longitudinale (-30/+18 m/s<sup>2</sup>), de vitesse de lacet à 400 deg/s et d'accélération verticale jusqu'à +6 g, correspondent à des changements d'appuis brutaux (instant 95,55 s).

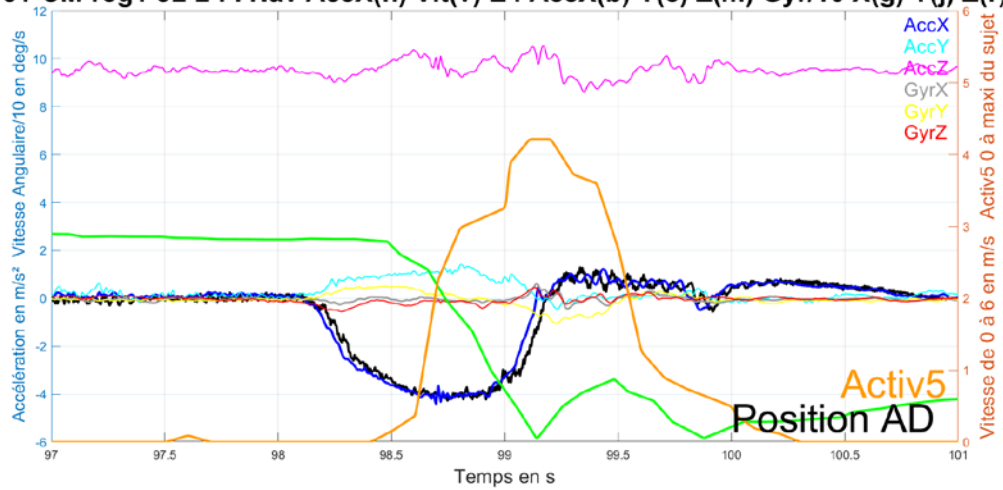
La passagère en position DF est projetée dans le sens du mouvement, se déplace vers l'avant (changement d'appuis), puis amortit son mouvement ce qui provoque ces oscillations caractéristiques sur presque tous les degrés de liberté. Le passager en position AD subit des sollicitations très proches de celles de la navette (non présenté).

Le 4<sup>e</sup> freinage intempestif est moins violent que les précédents, nous le décrivons brièvement sans y associer de figure. La décélération n'atteint que 2 m/s<sup>2</sup> et les mouvements des passagers sont moins spectaculaires. Le passager en position DLD a globalement une accélération proche de celle de la navette, elle ne culmine que furtivement à 5 m/s<sup>2</sup>. Le passager en position DF a une décélération qui oscille entre -5 et 3 m/s<sup>2</sup>, il est légèrement projeté dans le sens du mouvement avec un petit saut vers l'avant.

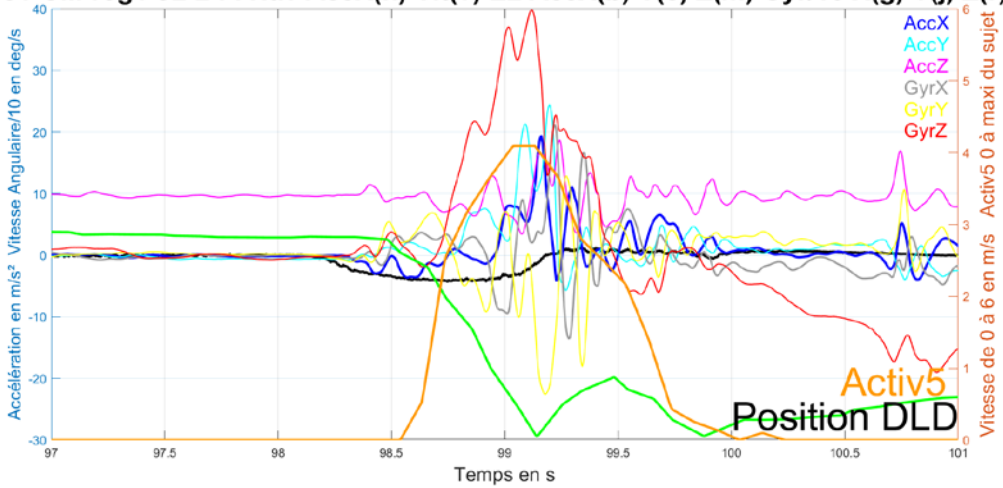
On retiendra de ce paragraphe que **les passagers debout et particulièrement en position latérale subissent des sollicitations très brutales et même dangereuses, avec des risques de déséquilibres et de chutes importants, lorsque la navette effectue des freinages intempestifs avec des décélérations de l'ordre de -4 m/s<sup>2</sup>.**



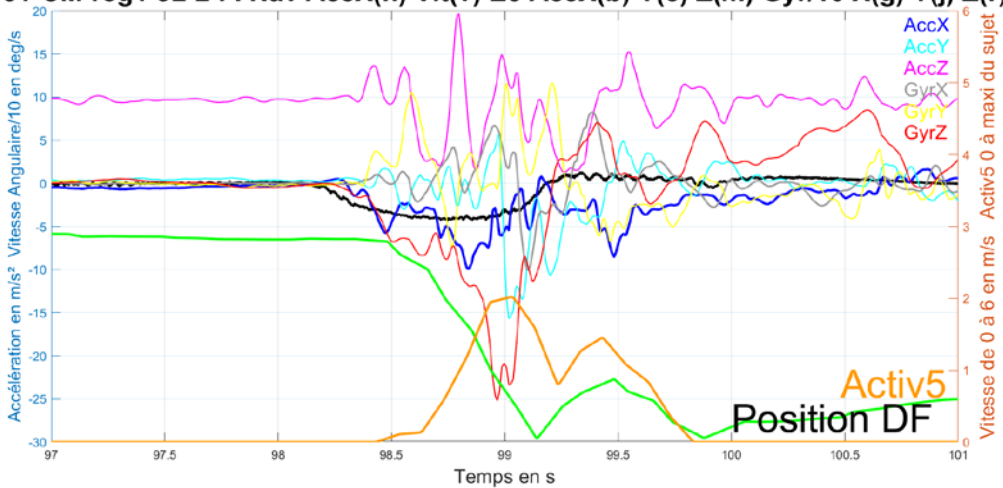
31-CM-reg1-J2-2 FI Nav AccX(n) Vit(v) E4 AccX(b) Y(c) Z(m) Gyr/10 X(g) Y(j) Z(r)



31-CM-reg1-J2-2 FI Nav AccX(n) Vit(v) E2 AccX(b) Y(c) Z(m) Gyr/10 X(g) Y(j) Z(r)



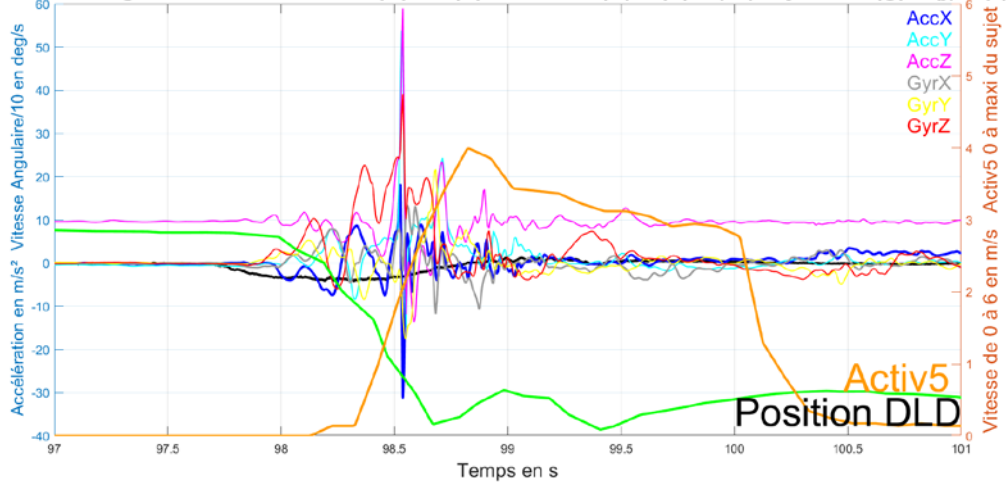
31-CM-reg1-J2-2 FI Nav AccX(n) Vit(v) E3 AccX(b) Y(c) Z(m) Gyr/10 X(g) Y(j) Z(r)



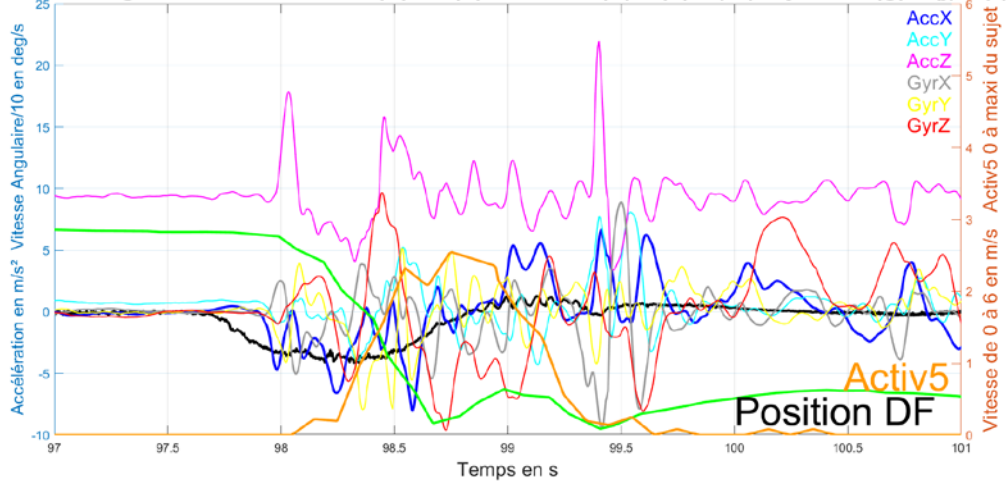
**FIGURE 42 : FREINAGE INTEMPESTIF N°2 : EXTRAITS DE LA VIDEO. SOLLICITATION SEMBLABLE A CELLE DE LA NAVETTE POUR AD. PROJECTION, PERTE D'EQUILIBRE ET ROTATION BRUTALE POUR DLD. LA PASSAGERE EN POSITION DF EST EGALEMENT PROJETEE, AVANT DE PIVOTER SUR 90 DEG.**



31-CM-reg1-J4-2 FI Nav AccX(n) Vit(v) E3 AccX(b) Y(c) Z(m) Gyr/10 X(g) Y(j) Z(r)



31-CM-reg1-J4-2 FI Nav AccX(n) Vit(v) E4 AccX(b) Y(c) Z(m) Gyr/10 X(g) Y(j) Z(r)



**FIGURE 43: FREINAGE INTÉMPÊSTIF N°3 : EXTRAITS DE LA VIDEO. PROJECTION, PERTE D'ÉQUILIBRE, ROTATION BRUTALE ET CHANGEMENTS D'APPUI POUR DLD. LA PASSAGÈRE EN POSITION DF EST PROJÉTÉE VERS L'AVANT.**

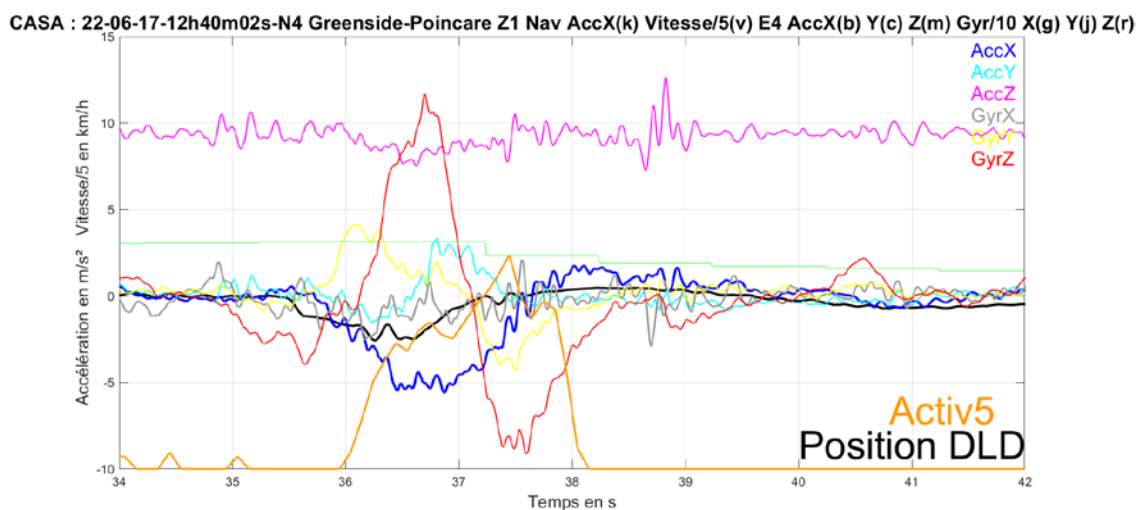
## 4.4. SOLLICITATIONS DYNAMIQUES DES PASSAGERS LORS DE FREINAGES INTEMPESTIFS EN EXPLOITATION

Lors des exemples présentés ci-dessous, les sujets ne sont pas informés qu'un freinage violent va se produire, pas plus que les expérimentateurs, ces freinages étant déclenchés par la navette en réponse à une situation donnée : dans le cadre de cette expérimentation CASA, le cas le plus fréquent, qui s'est produit à de multiples reprises, concerne le dépassement de la navette par un véhicule et son rabattement trop brutal et à une distance trop faible devant la navette (jusqu'à une dizaine de mètres), qui réagit alors par un freinage intense. Lors de cette expérimentation CASA tous les passagers qui ont participé à l'expérimentation du Lot 3.3 étaient en position debout latérale DLF ou DLD (selon qu'ils soient face ou dos aux portières).

Nous avons identifié une dizaine de situations au cours desquelles la navette a effectué ce type de freinage intempestif avec une décélération supérieure à  $-3 \text{ m/s}^2$ , qui s'est traduite par une décélération du passager supérieure à  $-5 \text{ m/s}^2$ , associé à des mouvements plus ou moins complexes dans les autres directions. Nous allons présenter les cas les plus intéressants.

Dans le cas présenté à la Figure 44, la décélération de la navette lors du freinage atteint  $-2,5 \text{ m/s}^2$  et celle du passager est largement amplifiée avec un pic de  $-5,3 \text{ m/s}^2$ , qui se combine avec une accélération transversale assez intense à  $3 \text{ m/s}^2$  en fin de freinage. L'explication se trouve au niveau des vitesses angulaires : le pic positif en lacet atteint  $110 \text{ }^\circ/\text{s}$ , avec un front montant de  $0,6 \text{ s}$ , ce qui correspond à un mouvement de rotation proche de  $70 \text{ deg}$ , lors de son pic, et même de  $90 \text{ deg}$ , lorsque le freinage de la navette se termine. Cette position se traduit naturellement par une combinaison de sollicitations longitudinales et transversales. Le passager revient ensuite dans sa position DLD initiale avec un second pic de vitesse de lacet négatif à  $-85 \text{ deg/s}$ . Ce passager exerce une pression modérée sur Activ5 au cours de cette manœuvre.

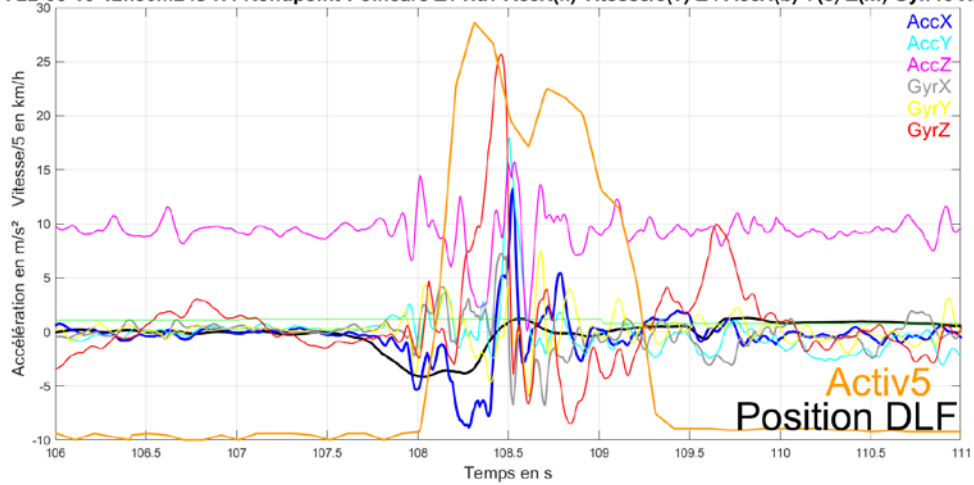
### Cas N°1



**FIGURE 44 : EXPERIMENTATION CASA : COMPORTEMENT D'UN PASSAGER LORS D'UN FREINAGE INTEMPESTIF DE LA NAVETTE : SA DECELERATION EST DOUBLEE ET IL PIVOTE D'UN  $\frac{1}{4}$  DE TOUR**

## Cas N°2

CASA : 22-06-16-12h30m24s-N4 Rondpoint-Poincare Z1 Nav AccX(k) Vitesse/5(v) E4 AccX(b) Y(c) Z(m) Gyr/10 X(g) Y(j) Z(r)

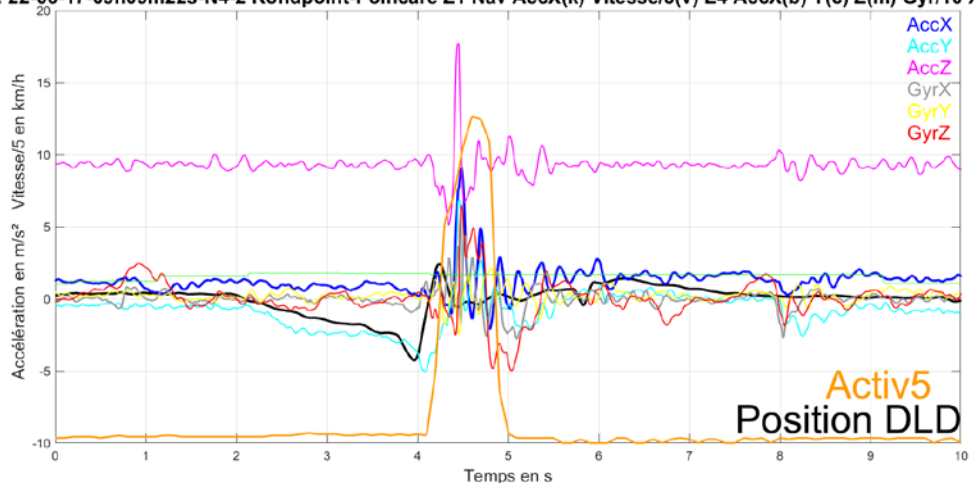


**FIGURE 45 EXPERIMENTATION CASA : COMPORTEMENT D'UN PASSAGER LORS D'UN FREINAGE INTEMPESTIF DE LA NAVETTE : FORTE DECELERATION SUIVIE D'UNE COMBINAISON DE MOUVEMENTS VIOLENTS**

Pour ce second freinage présenté à la Figure 45, la décélération de la navette est plus intense  $-4,1 \text{ m/s}^2$ , entraînant une forte augmentation de celle du participant à  $-8,3 \text{ m/s}^2$ . Le mouvement de lacet s'amplifie fortement en fin de freinage pour culminer furtivement à  $250 \text{ deg/s}$  avec une combinaison de sollicitations brèves mais violentes (instant  $108,5 \text{ s}$ ) : rebond sur l'accélération longitudinale à  $+6.2 \text{ m/s}^2$ , pic de l'accélération transversale à  $10,9 \text{ m/s}^2$  et succession de variations de l'accélération verticale ( $-7,5/ +3,4/ -10 \text{ m/s}^2$ ), dont on a vu à partir des mouvements de référence qu'elles correspondaient à des changements d'appuis au sol. On ne peut exclure que ce passager se cogne contre un obstacle (siège...) à cet instant. Ce passager a donc été particulièrement secoué par ce freinage intempestif et on retrouve également une activation de l'Activ5.

## Cas N°3

CASA : 22-06-17-09h09m22s-N4-2 Rondpoint-Poincare Z1 Nav AccX(k) Vitesse/5(v) E4 AccX(b) Y(c) Z(m) Gyr/10 X(g) Y(j) Z(r)



**FIGURE 46 : EXPERIMENTATION CASA : COMPORTEMENT D'UN PASSAGER LORS D'UN FREINAGE INTEMPESTIF DE LA NAVETTE : DECELERATION DU PASSAGER QUI A MODIFIE SA POSITION INITIALE PROCHE DE CELLE DE LA NAVETTE, SUIVIE D'UNE COMBINAISON DE MOUVEMENTS VIOLENTS**

Le cas de la Figure 46 se caractérise par un freinage beaucoup plus progressif de la navette pendant 2 secondes, qui se termine avec une décélération de  $-4.2 \text{ m/s}^2$  puis une re-accélération à  $2,3 \text{ m/s}^2$ . De manière étrange le sujet ne subit pas une décélération sur son axe X, qui est recalé pour correspondre au mouvement de la navette, mais sur son axe Y (en cyan) qui suit la décélération de la navette et se termine avec une pointe à  $-5 \text{ m/s}^2$ . La seule explication possible est que ce passager a pivoté à  $90$  degrés par rapport à sa position de référence DLD. On constate ensuite, comme dans l'exemple précédent, un rebond avec un pic positif de  $+9 \text{ m/s}^2$  sur AccX,  $+7$  sur AccY mais également sur l'accélération verticale qui varie de  $13 \text{ m/s}^2$  en une fraction de seconde. On observe ensuite 3 oscillations en 1 sec surtout visibles sur AccX : là encore cela traduit très vraisemblablement des changements brutaux d'appuis au sol et une possible perte d'équilibre.

#### Cas N°4

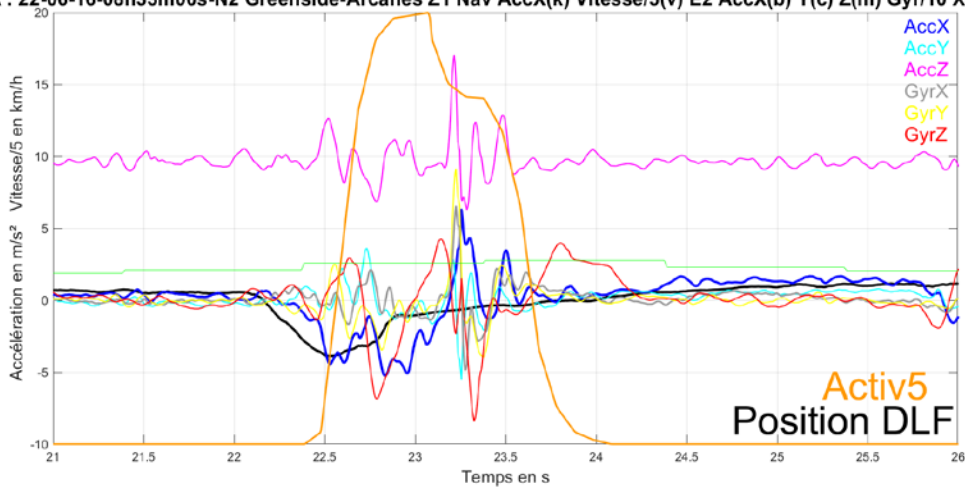
Les Figure 47 et Figure 48 présentent la comparaison des comportements de deux passagers qui ont emprunté simultanément la navette, en réaction à deux freinages intempestifs.

Dans le premier cas, le freinage ne dure que  $0,7 \text{ s}$  et culmine à  $-4 \text{ m/s}^2$ . Le passager libellé N2 en DLF suit grossièrement la décélération de la navette (pic à  $-5 \text{ m/s}^2$ ) qui se prolonge, puis subit un léger rebond ( $+5 \text{ m/s}^2$ ) avec des alternances de vitesse de lacet et un changement d'appuis au sol. Le passager N4 en DLD a une réaction beaucoup plus complexe : après un pic de décélération à  $-6 \text{ m/s}^2$ , il subit un rebond très brutal ( $+15/-22 \text{ m/s}^2$  en  $0,15 \text{ s}$ , ce qui est sans doute le plus violent constaté lors de toutes nos expérimentations). On observe parallèlement des pics de vitesse de lacet et de basculement avant/arrière à  $300 \text{ deg/s}$ , avec des variations de AccZ (changements d'appuis) et tous ces mouvements alternent plusieurs fois en positif/négatif dans la demi-seconde qui suit. Cette combinaison complexe de mouvements caractérise sans doute une brutale perte d'équilibre voire une amorce de chute, un tel mouvement de basculement avant/arrière n'ayant jamais été observé pour d'autres passagers. Bien que leurs réactions soient très différentes, l'action sur l'Activ5 de ces 2 passagers est maximale.

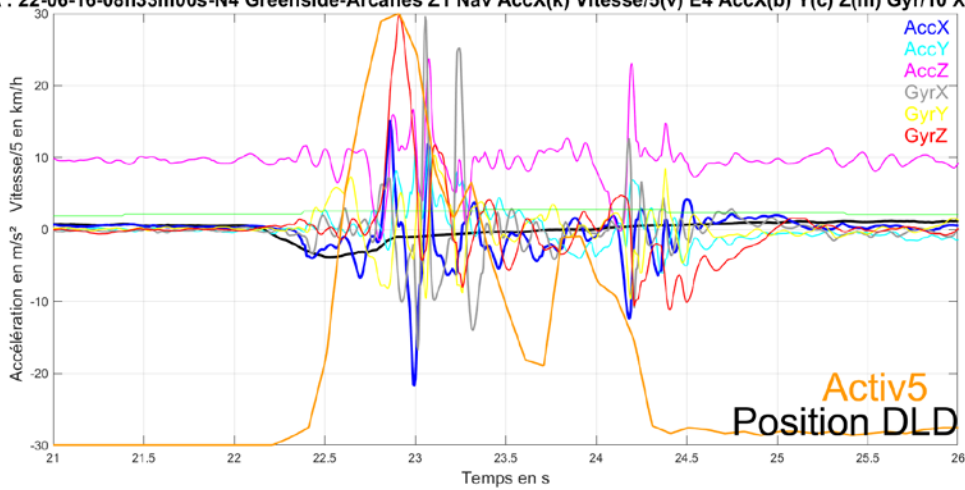
Il est particulièrement étonnant de constater que lors d'un second freinage intempestif qui s'est produit  $20 \text{ sec}$  plus tard (Figure 48), malgré une décélération de la navette inférieure, les réactions des deux passagers ressemblent fortement aux précédentes pour chacun des 2 passagers, avec un mouvement modéré pour N2 DLF et extrêmement violent pour N4 DLD.



CASA : 22-06-16-08h33m00s-N2 Greenside-Arcanes Z1 Nav AccX(k) Vitesse/5(v) E2 AccX(b) Y(c) Z(m) Gyr/10 X(g) Y(j) Z(r)

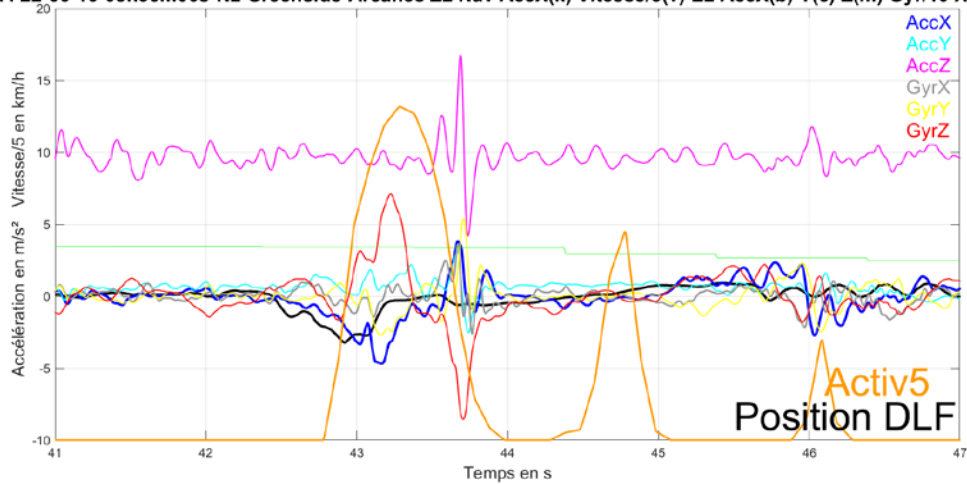


CASA : 22-06-16-08h33m00s-N4 Greenside-Arcanes Z1 Nav AccX(k) Vitesse/5(v) E4 AccX(b) Y(c) Z(m) Gyr/10 X(g) Y(j) Z(r)

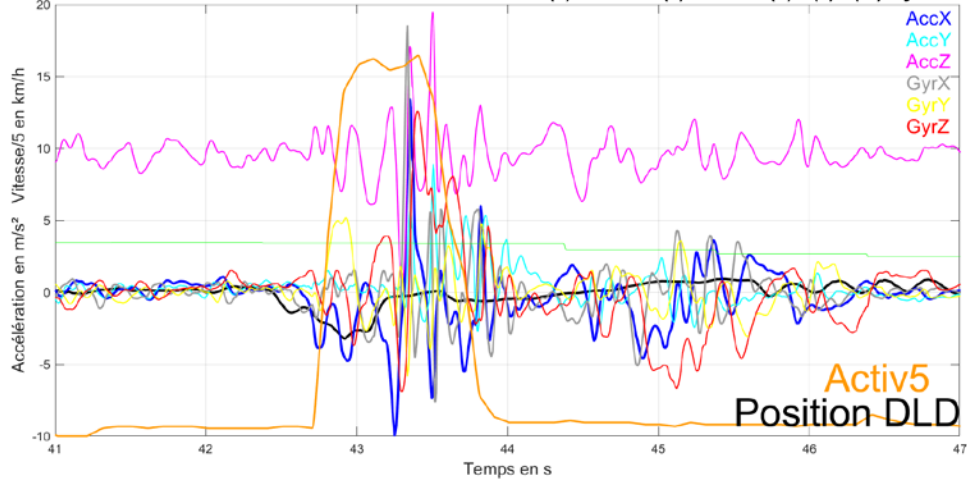


**FIGURE 47 : EXPERIMENTATION CASA : COMPARAISON DES COMPORTEMENTS DE 2 PASSAGERS LORS D'UN FREINAGE INTEMPESTIF DE LA NAVETTE : Z1 : REACTION MODEREE POUR L'UN ET BEAUCOUP PLUS VIOLENTE POUR L'AUTRE**

CASA : 22-06-16-08h33m00s-N2 Greenside-Arcanes Z2 Nav AccX(k) Vitesse/5(v) E2 AccX(b) Y(c) Z(m) Gyr/10 X(g) Y(j) Z(r)



CASA : 22-06-16-08h33m00s-N4 Greenside-Arcanes Z2 Nav AccX(k) Vitesse/5(v) E4 AccX(b) Y(c) Z(m) Gyr/10 X(g) Y(j) Z(r)



**FIGURE 48 : EXPERIMENTATION CASA : COMPARAISON DES COMPORTEMENTS DE 2 PASSAGERS LORS D'UN FREINAGE INTÉPESTIF DE LA NAVETTE : Z2 : SIMILITUDE DES REACTIONS DE CHAQUE PASSAGER PAR RAPPORT AU PREMIER FREINAGE**

### Conclusions

Cette présentation des résultats de CASA et en particulier la comparaison de deux sujets montrent clairement que les êtres humains ne sont pas égaux face à une sollicitation brutale en freinage à partir d'une position debout, mais que leur morphologie et la manière dont ils peuvent utiliser les poignées de maintien influencent fortement leur confort et leur sécurité. Dans une optique d'exploitation, il convient néanmoins de se placer dans le cas le plus défavorable.

Certaines dynamiques passagers observées lors de ces essais en exploitation sont relativement impressionnantes, avec des pertes d'équilibre avec amorce de chute, des changements d'appuis brutaux, voire des impacts (heureusement légers) avec des aménagements intérieurs de la navette

## 5. UN MODELE DE PREDICTION D'EVENEMENTS INDESIRABLES A PARTIR DES DYNAMIQUES NAVETTE

### 5.1. OBJECTIF

L'objectif de cette partie est de construire un modèle qui permettrait d'identifier les situations indésirables pour les passagers à partir de la dynamique de la navette.

Nous avons vu dans les résultats précédents que les profils d'accélération / décélération de la navette sont complexes, tout comme le lien entre ces accélérations et le ressenti des passagers en termes d'inconfort ou déséquilibre. Pour pallier ces difficultés, l'approche proposée consiste à utiliser un modèle basé sur de l'apprentissage machine ("machine learning").

Nous utiliserons une partie des données expérimentales pour entrainer le modèle puis nous l'évaluerons dans des situations plus écologiques (circuit TRANSPOLIS puis exploitation à CASA).

### 5.2. METHODE

#### 5.2.1. Données d'apprentissage

##### Rappel des expérimentations

Nous avons utilisé les données des essais "nominiaux" réalisés sur les pistes de TRANSPOLIS (cf. 2.1 Rappel de l'expérimentation sur les pistes de TRANSPOLIS, page 3).

Pour rappel, nous avons testé 15 combinaisons de réglages de la navette (vitesse, accélération et décélération) en ligne droite et en virage (9 combinaisons avec virage) avec des participants assis et debout. Chaque combinaison est répétée (aller-retour de la navette) et 23 participants ont été inclus. Cela représente donc un total de 690 essais comprenant une phase de démarrage, une phase de freinage et, dans 60% des essais, un virage.

Pour chaque phase de chaque essai, nous avons recueilli la dynamique de la navette (accéléromètre + gyromètre) et le ressenti (inconfort / déséquilibre ressenti) des passagers à l'aide d'une note de 0 à 100.

##### Données d'entrée

L'entrée du modèle est constituée par la dynamique de la navette.

Différentes combinaisons des signaux (Jerk, accélération, et vitesse angulaire) et de leurs composantes (sur chaque axe, norme, ...) ont été envisagées. Pour chaque combinaison, 16 caractéristiques (maximum, amplitude, moyenne, écart type, fréquence principale, ...) ont été calculées sur des fenêtres temporelles glissantes de 5s avec un décalage de 2s.

##### Données de références

Les données de référence pour identifier les instants à risque proviennent des notes de ressenti des participants sur chaque phase (démarrages, virages, arrêts). Deux cas de figure ont été testés : prise en compte de l'ensemble des participants ou uniquement des participants debout.

Ces notes, initialement entre 0 et 100, ont été regroupées en catégories. Plusieurs regroupements ont été considérés, pour finalement aboutir à une classification du ressenti par phase en deux groupes : phase sans problème (notes de 0 à 50) ou phase avec évènement indésirable (notes supérieures à 50).

## 5.2.2. Modèle utilisé et apprentissage

Nous avons utilisé un modèle de type "Random Forest Classifier" basé sur des arbres de décision multiples.

Nous avons utilisé une approche de type "cross validation" : le jeu de données est divisé aléatoirement en deux entre données d'entraînement (66% des données) et données de test (33%). Les données d'entraînement permettent de construire le modèle reliant les "features" de chaque fenêtre temporelle et le classement de cette fenêtre entre "phase sans problème" et "phase avec évènement indésirable". Une correction est appliquée afin de prendre en compte les différences de proportion entre les deux phases. Les données de validation permettent d'évaluer le modèle ainsi construit : le modèle est utilisé pour catégoriser ces fenêtres, et les résultats de cette catégorisation sont comparés à la référence.

Plusieurs modèles sont construits (plusieurs sources de données d'entrée) et seul le plus performant sur ces données de test est retenu pour la suite. La performance des modèles est évaluée à l'aide du "F1-score", qui est la moyenne arithmétique entre la précision (proportion de vrais positifs sur l'ensemble des éléments détectés comme positifs) et le rappel (vrais positifs sur l'ensemble des éléments qui auraient dû être positifs).

L'ensemble des traitements ont été effectués grâce à la bibliothèque Scikit-learn sous le langage Python.

## 5.2.3. Utilisation du modèle sur des situations "réalistes"

Le modèle ainsi construit et évalué est alors appliqué à des essais "réalistes" : proches des situations d'exploitation (les essais "circuits" sur les pistes de TRANSPOLIS) ou en exploitation (essais en exploitation à CASA). Comme pour la création du modèle, les données dynamiques de la navette sont récupérées, découpées en fenêtres temporelles (fenêtres de 5s avec décalage de 2s). Pour chaque fenêtre, les caractéristiques sont calculées puis ces dernières sont utilisées en entrée du modèle pour catégoriser la fenêtre entre "sans problème" ou "avec évènement indésirable". Le processus est ensuite relancé sur la fenêtre suivante.

Nous ne disposons pas de données de référence (note) pour ces circuits. Néanmoins, une tentative a été faite pour comparer les fenêtres "problématiques" avec les appuis des participants sur les capteurs Activ5.

# 5.3. RESULTATS

## 5.3.1. Performances Apprentissage

Le Tableau 2 indique les F1-scores obtenus sur les données de tests pour les différents modèles. Le modèle retenu (passagers debout uniquement, utilisation de la norme de l'accélération, du Jerk et de la vitesse angulaire) permet d'obtenir un F1-score de 83%, ce qui est tout à fait correct étant données la variété de situations possibles et la variabilité inter et intra individuelle dans l'appréciation des situations (données de référence).

L'amélioration des performances lorsque l'on ne considère que les sujets debout provient essentiellement du fait que les sujets assis ne ressentent quasiment aucun inconfort. Or cette information (sujet assis ou debout) n'est pas intégrée au modèle. Il est donc normal que les prédictions pour ce type de passagers soient plutôt mauvaises.

Il est aussi intéressant de constater que l'ajout de la vitesse de la navette comme donnée d'entrée n'améliore pas (au contraire) la prédiction (cf. les résultats des deux premiers modèles). Ce résultat confirme que la vitesse n'est pas en soit un indicateur du déséquilibre induit. Elle peut le devenir de manière indirecte si le fait de faire circuler la navette plus rapidement induit plus de perturbations dynamiques (freinage d'urgence par exemple). De plus la vitesse de la navette a un impact dans le déséquilibre induit lors des virages du fait de l'accélération centrifuge, mais cet aspect est pris en compte par d'autres données d'entrée utilisées (l'accélération latérale et la vitesse angulaire).

Enfin, l'utilisation de la norme est préférée, bien qu'elle n'améliore que peu la performance de prédiction. En effet, elle permet de s'affranchir de la variété d'orientation des sujets par rapport à la navette.

**TABLEAU 2 : PERFORMANCE (F1-SCORE) DES DIFFERENTS MODELES CONSIDERES SUR LES DONNEES DE TEST. EN ROUGE LE MODELE RETENU.**

Caractéristiques du modèle	F1-Score
Toutes positions Composantes Accel, Jerk, Gyro & vitesse	71%
Toutes positions Composantes Accel, Jerk & Gyro	78%
Debout Composantes Accel, Jerk & Gyro	82%
Debout Norme Accel, Jerk & Gyro	83%

### 5.3.2. Performance du modèle sur circuit

Après avoir construit et évalué ce modèle sur des essais unitaires, nous l'avons appliqué sur des données de roulage "réalistes".

La première application concerne les essais de type "circuit" réalisés sur les pistes fermées de TRANSPOLIS. Une difficulté consiste à interpréter les événements indésirables détectés par notre modèle. Pour cela, nous avons tenté de faire correspondre la détection d'évènements indésirables par notre modèle aux appuis sur le capteur Activ5 tenu par les sujets.

Pour rappel, ce capteur est un capteur de force de préhension que les sujets tenaient dans la main lors des expérimentations. La consigne donnée était de serrer le capteur en fonction du déséquilibre ou de l'inconfort ressenti. Cette force mesurée était ensuite normalisée par la force maximale appliquée par chaque participant. Une fenêtre était détectée comme problématique si, en considérant les deux participants debout dans la navette :

Max A5 > 35% de Fmax d'un des participant

OU 2 pics A5 > 16% de Fmax d'un des participants

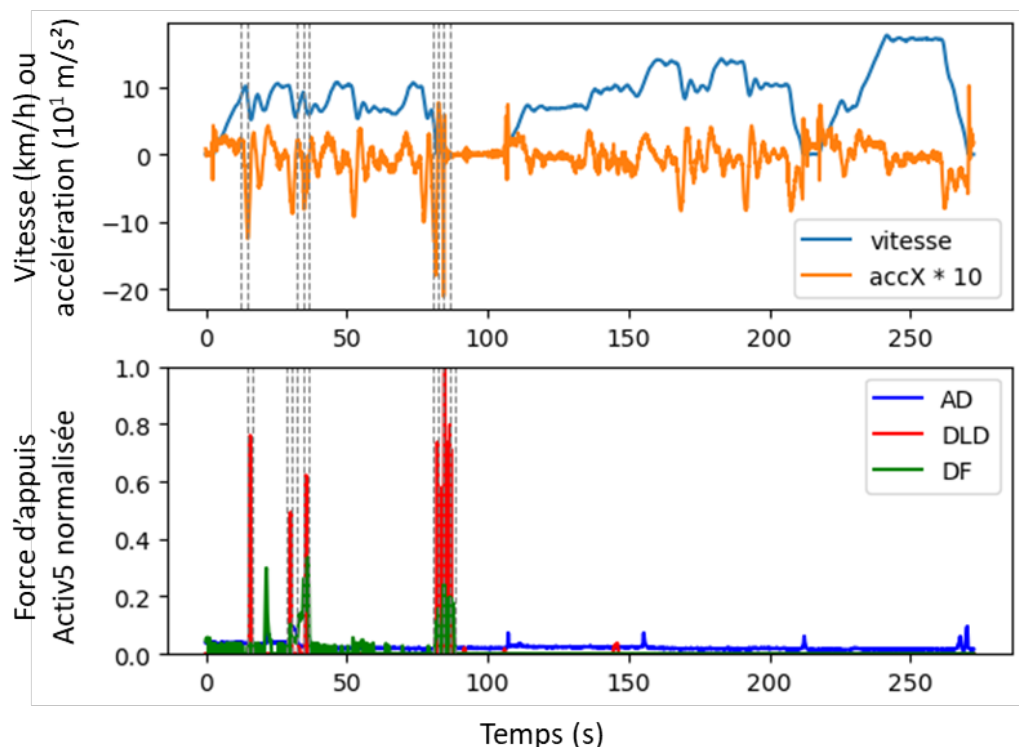
OU Max A5 > 16% de Fmax de deux des participants

La comparaison des événements indésirables prédits par notre modèle et par les Activ5 donne un F1-score de 73%.

Ce score est plus faible que le F1-score obtenu sur les données de test, ce qui est cohérent car :

- Les situations de roulage sur circuit sont plus complexes que les situations unitaires rencontrées lors des essais unitaires utilisés pour entraîner le modèle.
- Les Activ5 ne mesurent pas tout à fait la même chose que les notes de ressenti, comme l'indique la corrélation relativement faible entre les notes de ressenti et les appuis sur l'Activ5.
- Les appuis sur l'Activ5 (nombre d'appuis, intensité, forme du profil de force en fonction du temps) sont très variables d'un sujet à l'autre, ce qui entraîne une forte variabilité qui ne peut pas être intégrée au modèle.
- Il y a une latence très variable intra et inter-participants entre les événements déclencheurs et les appuis sur les Activ5, ce qui diminue artificiellement la performance de prédiction (certains événements déclencheurs sont bien détectés par le modèle mais identifiés plus tard sur l'Activ5).

Cette analyse permet néanmoins de faire ressortir le fait que notre modèle identifie plutôt correctement des situations indésirables engendrant des déséquilibres ou de l'inconfort pour les passagers. La figure 49 illustre bien ce résultat. Le graphe du haut représente la dynamique longitudinale de la navette et le graphe du bas les appuis sur les Activ5 (forces normalisées) des trois sujets. Les barres verticales pointillées représentent les fenêtres où un événement indésirable a été détecté, en haut au sens du modèle de prédiction, en bas au sens des appuis sur les Activ5. On retrouve une bonne cohérence entre les détections. On peut aussi voir l'intérêt du modèle, prenant en compte des paramètres de dynamique complexe, par rapport à des approches plus limitées univariées : il est difficile sur le graphe d'accélération longitudinale d'identifier visuellement les périodes engendrant des événements indésirables par rapport à d'autres pics d'accélération n'engendrant pas d'événements indésirables.



**FIGURE 49 : COMPARAISON DE LA DETECTION D'EVENEMENTS INDESIRABLES VIA LA DYNAMIQUE DE LA NAVETTE (EN HAUT) OU LES APPUIS SUR LES CAPTEURS ACTIV5 (EN BAS. BLEU : SUJET ASSIS; ROUGE ET VERT : SUJETS DEBOUT). LES BARRES VERTICALES POINTILLEES REPRESENTENT LES FENETRES OU UN EVENEMENT INDESIRABLE A ETE DETECTE, EN HAUT AU SENS DU MODELE DE PREDICTION, EN BAS AU SENS DES APPUIS SUR LES ACTIV5.**

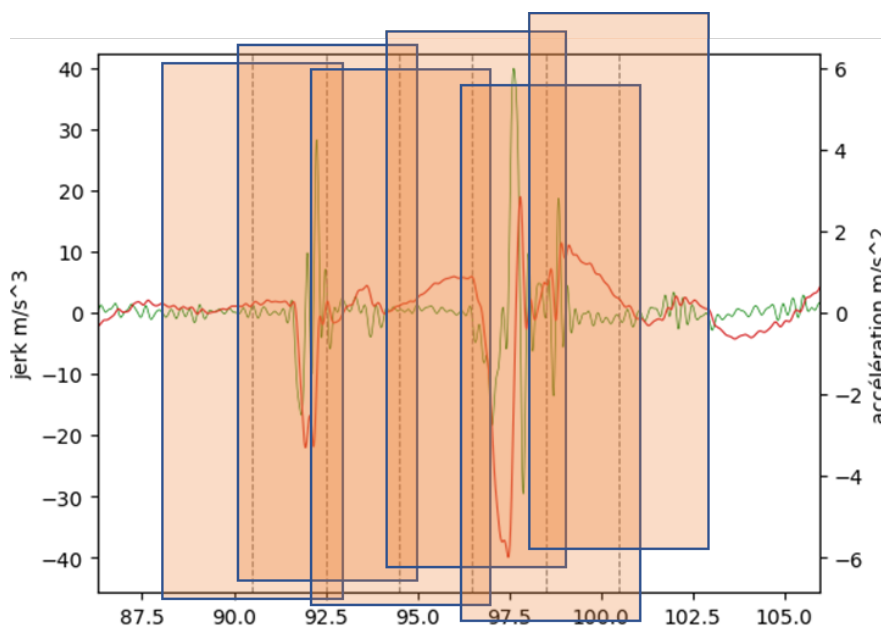
### 5.3.3. Détection des évènements indésirables en exploitation

La même procédure d'utilisation du modèle de prédiction a été mise en œuvre sur les données collectées lors des expérimentations en exploitation à CASA. Ces données comprennent 25 trajets, d'une durée comprise entre 2 mn et 13 mn (moyenne à 7 mn), soit environ 3 heures d'enregistrement pour environ 18,5 km parcourus. Ces trajets étaient composés de plusieurs stations, d'un rond-point et d'intersections, avec de nombreuses interactions avec des usagers extérieurs (voitures, piétons, etc.).

Pour ces essais, nous n'avons pas cherché à exploiter les données des capteurs Activ5. En effet, de fait des contraintes d'exploitation, le temps disponible pour faire passer des consignes était très faible. L'utilisation des Activ5 était très variable, les efforts non normalisés, souvent un seul participant était présent dans la navette (le modèle précédent utilise les données d'au moins deux participants), etc.

Sur l'ensemble de ces enregistrements, nous avons détecté 180 fenêtres contenant des évènements problématiques. Ce nombre doit cependant être réduit car, du fait des fenêtres glissantes, une même situation peut engendrer la détection de plusieurs fenêtres "problématiques" successives. Cela est illustré par exemple sur la Figure 50 où une même situation, impliquant deux freinages successifs, engendre la détection de 6 fenêtres "problématiques". Cette fréquence d'évènements indésirables reste néanmoins élevée, ce qui est cohérent avec le nombre de situations problématiques rencontrées sur cette expérimentation. En effet, dans la quasi-totalité des cas, il s'agit de situations de freinage brutal (voire freinage d'urgence) intempestif lié à des conflits avec d'autres usagers ou un mauvais fonctionnement de l'automate de pilotage de la navette.

Un exemple typique est représenté sur la Figure 50, où sont superposées la dynamique longitudinale de la navette (accélération et Jerk) et les fenêtres "problématiques" détectées. L'analyse des vidéos correspondantes indique des dépassements de la navette par des véhicules personnels qui se rabattent trop près de celle-ci. Cela engendre un freinage brutal (presque  $-3\text{m/s}^2$ ), une réaccélération suivie d'un freinage d'urgence (presque  $-6\text{m/s}^2$ ).



**FIGURE 50 : EXEMPLE DE DETECTION D'EVENEMENTS PROBLEMATIQUES : ACCELERATION ET JERK LONGITUDINAUX ET FENETRES DETECTEES "PROBLEMATIQUES" PAR LE MODELE. IL S'AGIT D'UNE INTERACTION (DEPASSEMENT TROP PROCHE) DE LA NAVETTE AVEC DEUX VEHICULES, ENGENDRANT DEUX FREINAGES BRUTAUX SUCCESSIFS.**

## 5.4. COMMENT AMELIORER LA DYNAMIQUE DE LA NAVETTE : UTILISATION DU MODELE POUR EVALUER L'INFLUENCE DES PARAMETRES DYNAMIQUES ?

Une dernière utilisation de ce modèle consiste à évaluer l'influence des paramètres de la dynamique de la navette. Cela revient à aborder la question : est-il possible de limiter l'occurrence d'évènements indésirables en intervenant uniquement sur la dynamique de la navette (sans modifier les déclenchements de freinages intempestifs par exemple).

Pour cela, nous sommes repartis des enregistrements de la dynamique navette. Nous les avons modifiés artificiellement et avons observé l'évolution de l'occurrence de détection d'évènements indésirables sur cette dynamique modifiée.

Deux paramètres ont été étudiés : l'accélération de la navette et son Jerk. La réduction du Jerk a un impact moindre sur les distances d'arrêt, et il est donc plus facile de réduire le Jerk que l'accélération. Nous avons donc limité le Jerk de 50% et l'accélération de 10%. Les résultats en termes de nombre de fenêtres avec "évènement indésirable" sont présentés dans le Tableau 3.

**TABLEAU 3 : NOMBRE DE FENETRES AVEC "EVENEMENT INDESIRABLE" DETECTEES EN FONCTION DE LA DYNAMIQUE NAVETTE SUR LES DONNEES CASA**

	Nombre de fenêtres avec "évènement indésirable"
Dynamique mesurée	<b>180</b>
Réduction du Jerk de 50%	<b>113 (-37%)</b>
Réduction de l'accélération de 10%	<b>147 (-18%)</b>

Ce modèle démontre donc que réduire les dynamiques de la navette (limitation de l'accélération et du Jerk), notamment lors des incidents (freinages brutaux ou d'urgence par exemple) permet de limiter de manière significative l'occurrence d'évènements indésirables (déséquilibre, inconfort) pour les passagers. Il s'agit d'une piste de travail relativement simple, indépendante et complémentaire de la réduction du nombre de déclenchements de ces freinages. En particulier, la réduction du Jerk n'a qu'une influence limitée sur les aspects liés à la sécurité (distance d'arrêt par exemple) et pourrait être une première piste à investiguer.

## 5.5. BILAN

Dans cette partie, nous avons mis en place un modèle de prédiction de l'occurrence des évènements indésirables (inconfort, déséquilibre) pour les occupants debout de la navette à partir de la dynamique de cette dernière. Ce modèle est basé sur les données expérimentales récoltées sur les pistes de TRANSPOLIS, et l'utilisation de techniques d'apprentissage machine nous ont permis d'appréhender la complexité des signaux et des phénomènes. Ce modèle a ensuite été appliqué à des situations de roulage. Il permet d'identifier les situations problématiques pour les passagers debout. Ce modèle nous a aussi permis d'évaluer le bénéfice possible d'une réduction des dynamiques de la navette. Il semblerait qu'une piste de travail intéressante soit la réduction du Jerk lors des freinages intempestifs.



## 6. CONCLUSIONS / RECOMMANDATIONS

Dans cette Tache 3.3, nous avons étudié la relation entre les dynamiques de la navette et l'inconfort / le déséquilibre perçu par les occupants. Diverses approches expérimentales (essais unitaire, roulage) dans des environnements contrôlés ou en exploitation ont été mises en œuvre. Il ressort principalement de cette étude :

La dynamique de la navette en fonctionnement nominal est tout à fait acceptable pour les passagers, et n'engendre pas de déséquilibre ou d'inconfort pour les passagers debout. **La navette a une dynamique très répétable, que ce soit en fonctionnement nominal ou en situation de freinage d'urgence. Cela représente une base de travail intéressante pour pouvoir optimiser ces dynamiques.**

Des situations plus perturbées, avec des accélérations (freinages) intempestives relativement violentes apparaissent de manière relativement fréquente, en exploitation, mais aussi lors des essais de roulage sur piste. Ces situations engendrent des dynamiques de navette fortes et relativement perturbées (effets de "rebonds" très importants), qui entraînent des dynamiques de passagers à l'intérieur de la navette importantes, associées à de hauts niveaux d'inconfort voire des risques de chute pour les passagers debout les plus fragiles. Ces situations dégradent aussi l'acceptabilité de la navette. **Il serait nécessaire de limiter au maximum ces situations, probablement au travers d'un travail sur l'automate de conduite.**

Il apparaît aussi que lorsque les réglages de pilotage de la navette sont modifiés, le comportement de cette dernière vis-à-vis du confort des passagers se dégrade. Ainsi, lorsqu'une augmentation de la vitesse sera envisageable, **cette amélioration des performances devra se faire en conservant des seuils de décélération raisonnables** pour ne pas le faire au détriment du confort et de la sécurité des passagers. Si cette augmentation de la vitesse intervient, **il faudra aussi veiller à la gestion des phases transitoires entre virages et lignes droites.**

Néanmoins, une approche complémentaire et intéressante serait de **travailler sur les profils d'accélération / décélération mis en œuvre lors de ces situations**. Une première piste serait de limiter les pics "parasites" (effet "rebond") de ces profils. Une autre consisterait à travailler ensuite sur la forme de ce profil pour limiter certaines caractéristiques dynamiques fortement associées au déséquilibre ressenti. En effet, nous avons montré qu'une réduction des caractéristiques dynamiques (accélération et Jerks maximaux) de la navette permet de réduire l'inconfort et le déséquilibre engendré. Cette réduction doit pouvoir se faire sans détériorer l'aspect sécurité (la réduction du pic de Jerk n'a qu'un effet mineur sur la distance de freinage par exemple). Cet objectif semble abordable vu la très bonne répétabilité de la dynamique de la navette.

Enfin, étant donné que la dynamique de la navette a un impact important sur le ressenti des passagers debout en ce qui concerne l'inconfort et le risque de chute, que des situations potentiellement dangereuses pourraient être observées en exploitation, et que cela impacte l'acceptabilité de la navette, il nous semble important de ne pas négliger l'impact des sollicitations dynamiques de la navette sur l'inconfort et le déséquilibre perçu par les occupants. **Nous recommandons de mener cette analyse de l'impact de la dynamique de la navette sur l'équilibre des passagers de manière systématique dès que des occupants seront potentiellement en position debout dans la navette**, en particulier suite à toute modification des caractéristiques de pilotage de la navette et avant toute nouvelle mise en exploitation, en s'appuyant notamment sur les connaissances et outils développés dans cette tâche, en particulier l'approche expérimentale relativement légère à mettre en œuvre et le modèle de prédiction des événements indésirables.





Tentez l'expérience