

Recherche et Innovation en Transports et Mobilité Eco-responsables et Autonomes

Interfaces haptiques pour le développement et l'évaluation de systèmes d'assistance aux personnes en fauteuil roulant

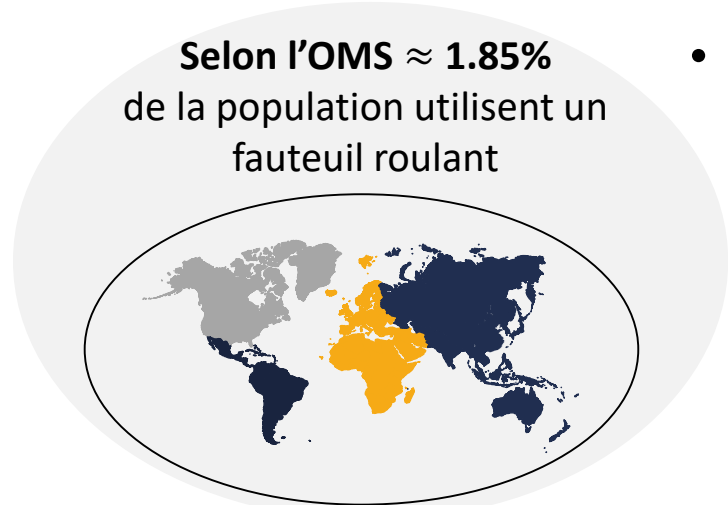
Amel Ait Ghezala, Chouki Sentouh, Philippe Pudlo, Gérald Conreur, Thierry Poulain

Workshop « Axe 5 »

Silver économie / Smart cities : maintien à la mobilité, handicap et ville intelligente

17 JUIN 2025

➡ Autonomie des personnes à mobilité réduite :

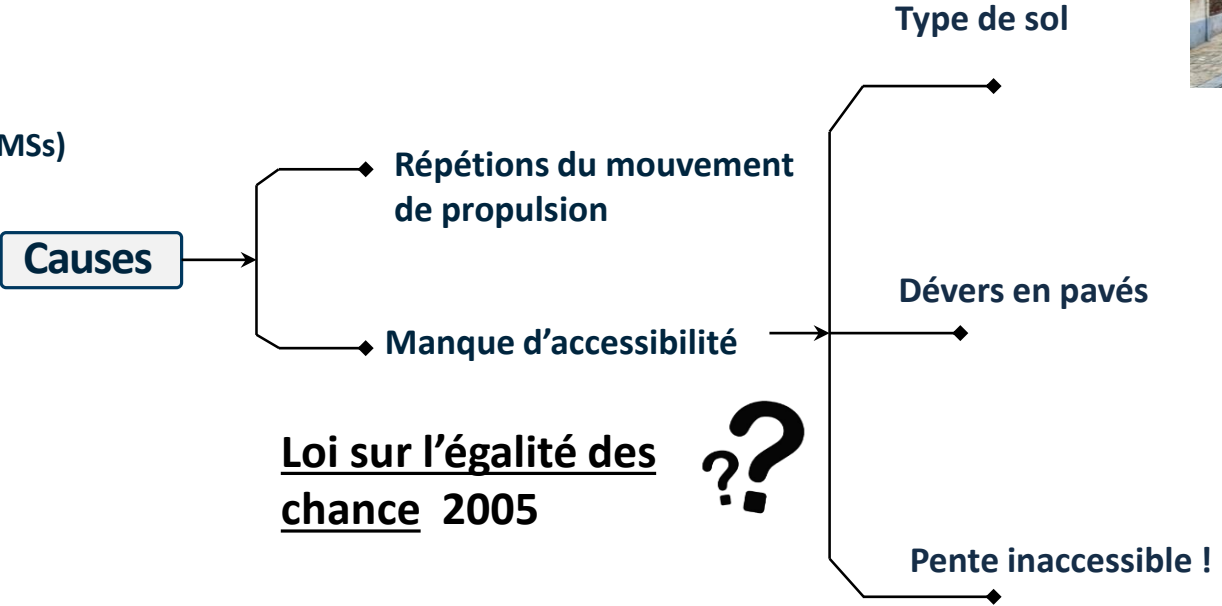
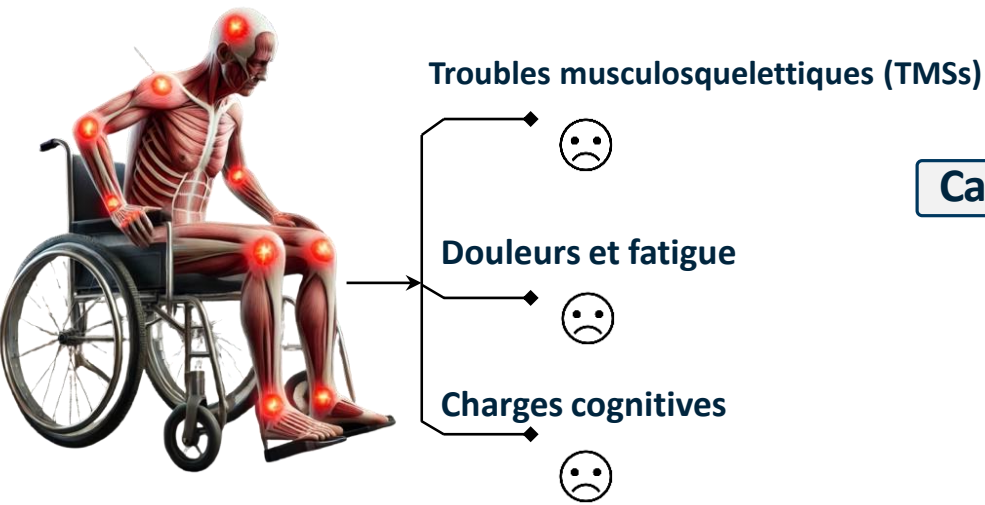


- Difficulté d'accessibilité en milieu urbain:
 - 62% des personnes à mobilité réduite souffrent d'isolement social¹
 - 67 % disent éprouver des difficultés pour se déplacer¹
 - Seulement 42 % des personnes sont en activité professionnelle²



➡ Usage quotidien d'un FRM a un impact profond sur la santé de l'usager :

Santé physique



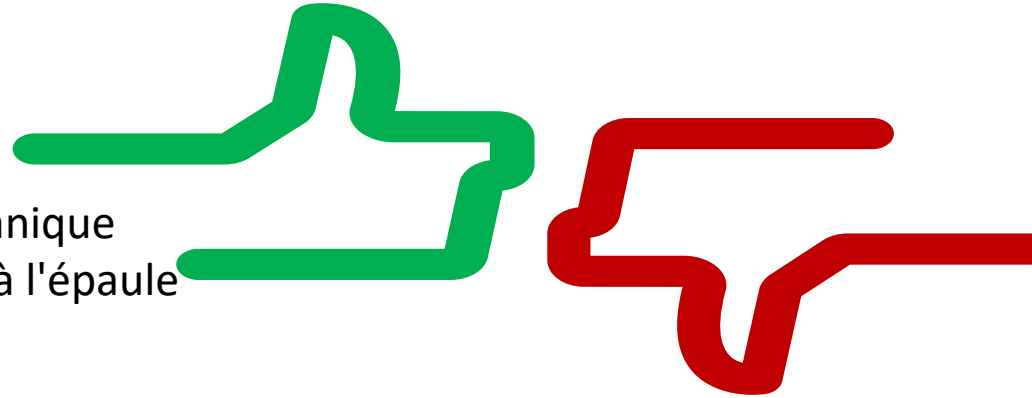
1. APF France handicap
2. l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE)

➡ Solutions technologiques pour résoudre ces problèmes de TMS :
ex. le fauteuil roulant électrique FRE.



Avantages

- Efficacité mécanique
- Pas de charge à l'épaule



Inconvénients

- Pas d'activité physique
- Encombrement
- Coût élevé
- Dépendance énergétique

➡ Fauteuil roulant manuel avec assistance électrique (FRM-AE).



Poids $\in [25, 50]$ kg

Poids $\in [50, 150]$ kg

Avantages clés

Réduit l'effort

Amovible

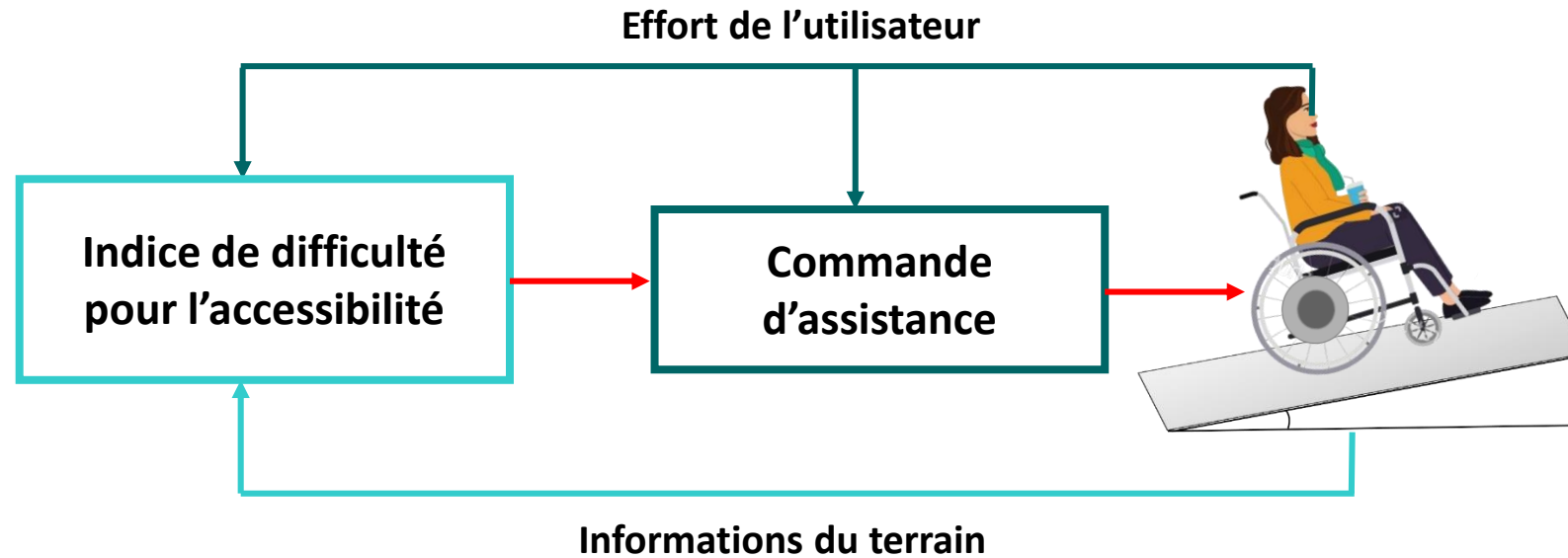
Maintien de
l'activité physique

Compact & plus
léger qu'un FRE





Proposition : Un système d'assistance qui s'adapte en fonction de l'effort de l'utilisateur et des caractéristiques du sol

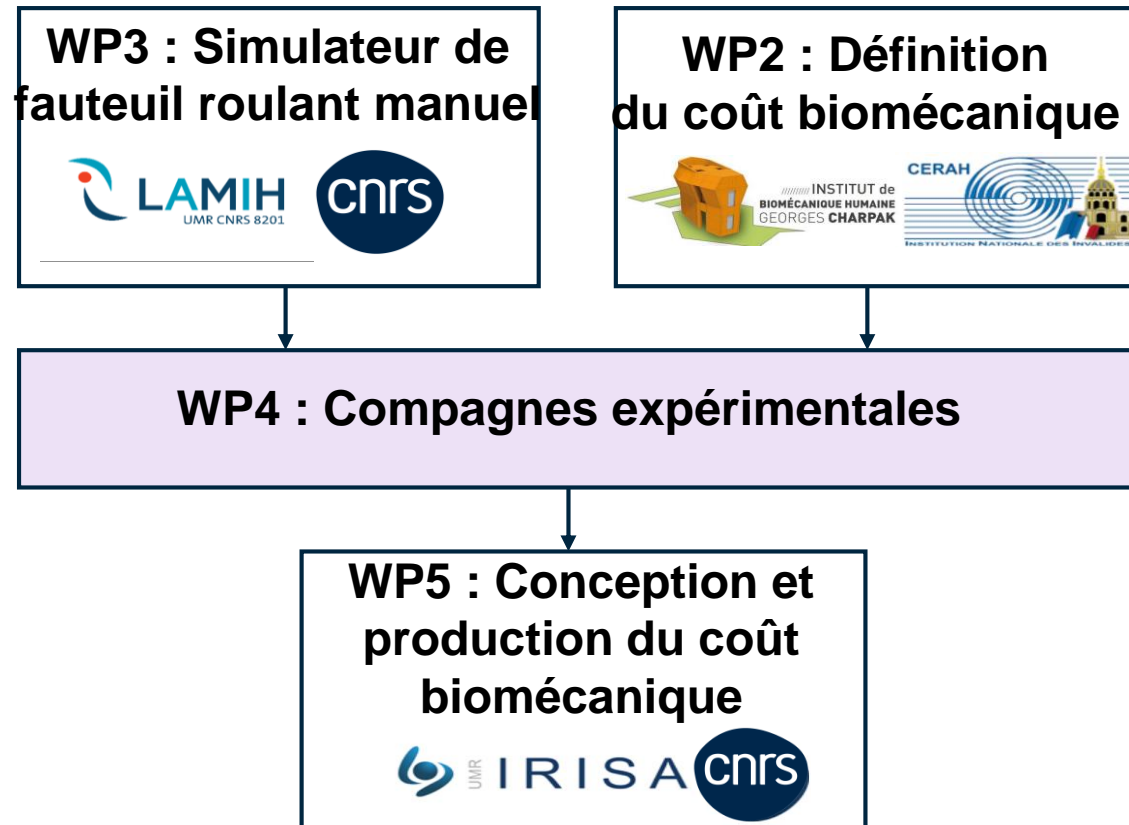


- Réduire l'effort de l'utilisateur
- Réduire la fréquence de propulsion
- Garantir la sécurité et une bonne autonomie

➡ Défis scientifique :

- Comment tenir comptes des contraintes liées à la géométrie du terrain ?
- Comment quantifier la capacité de l'utilisateur par rapport à ces contraintes ?
- Comment adapter le système d'assistance ?
- Comment assurer la stabilité, la robustesse et la fiabilité du système d'assistance ?

Collaboration : Projet ANR CapaCITIES (2020-2024)



➤ **Objectif du projet : quantifier un coût biomécanique des déplacements urbains en fauteuil roulant manuel**

Nécessité de concevoir, tester et évaluer les systèmes d'assistance dans un environnement contrôlé et riche en situations de déplacement en FRM

➡ Divers simulateurs de fauteuils roulants manuels existent

Défis actuels des simulateurs de fauteuil roulant

- La simplicité des modèles réduit le réalisme des simulateurs haptiques

• Current simulators are limited to movements up to four degrees of freedom, requiring more advanced models (horizontal, pente, dévers) (Chenier et al., 2012)

■ La réalité virtuelle améliore l'immersion, mais le retour haptique est souvent négligé

- Rares sont les simulateurs offrant un mouvement à 6 degrés de liberté

(a) : Ergomètre instrumenté pour fauteuil roulant (offrant résistance à l'effort, inertie) (Devillard et al., 2001), développement

(b) : CEAL - Toronto (Cichow et al., 2011)

(c) : Ergomètre à rouleaux (Chenier et al., 2012) Offrant résistance au roulement et une inertie, pour la conduite en ligne droite et en virage

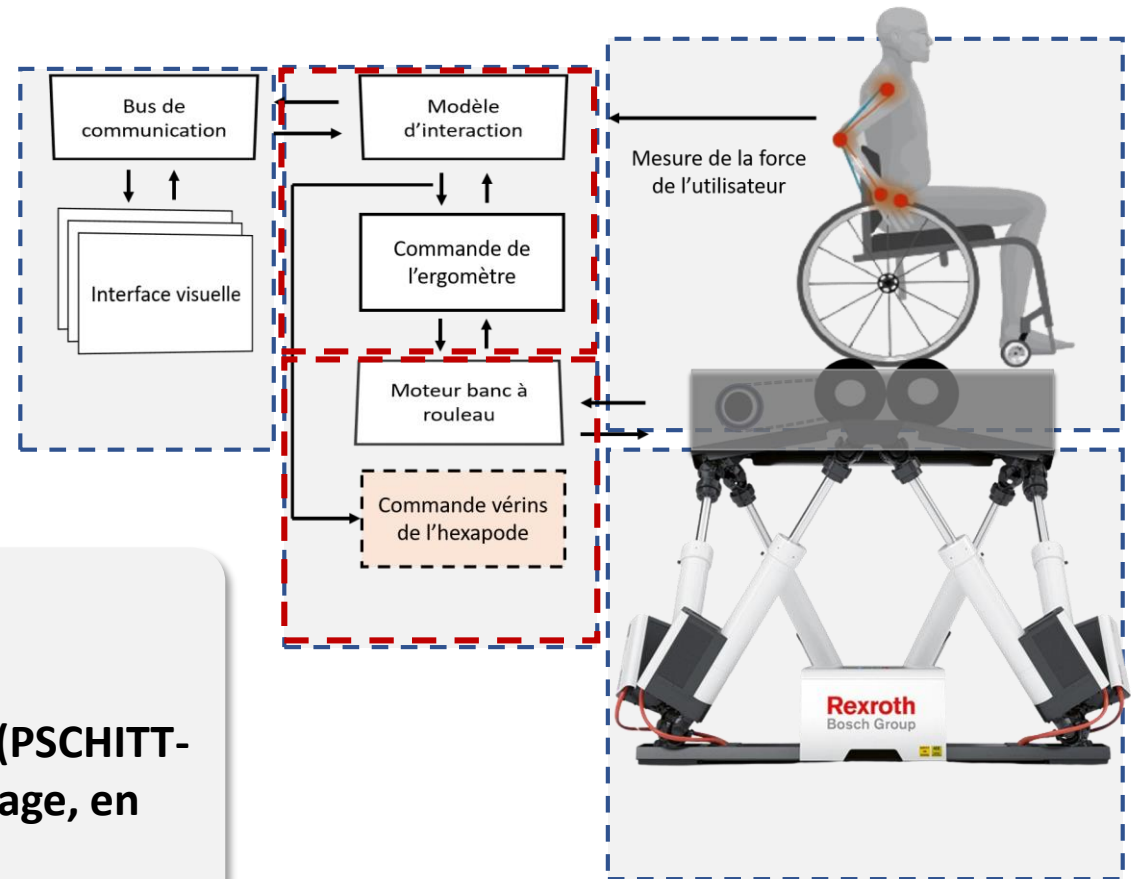
(d) : Simulateur pour fauteuils roulants manuels et électriques en réalité virtuelle immersive (CAVE), (C. Genova et al., 2022)

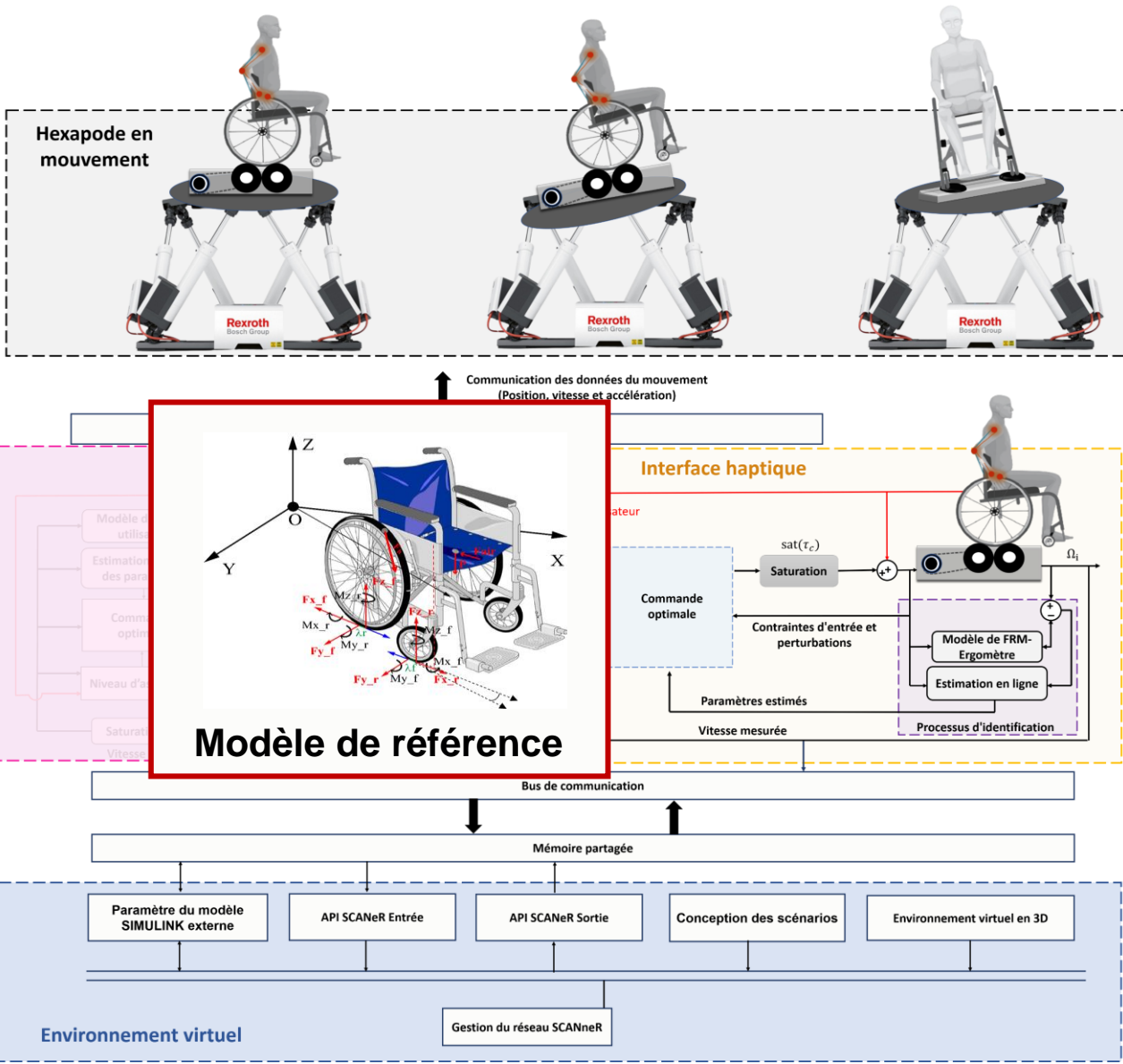
☞ Critères de réalisme

- Environnement virtuel (casque VR /écran)
- Interface haptique
- Fauteuil roulant manuel-ergomètre
- Plateforme de mouvement (hexapode)

Objectif

Développement d'une interface haptique et dynamique pour reproduire la locomotion en FRM dans le simulateur de FRM (PSCHITT-PMR du LAMIH) lors des déplacements en ligne droite, en virage, en pente et en dévers.





Simulateur de FRM PSCHITT-PMR (Plateforme de Simulation Collaborative, Hybride, Intermodale en Transports Terrestres)

Critères de réalisme d'un modèle d'interaction entre Utilisateur-FRM-sol

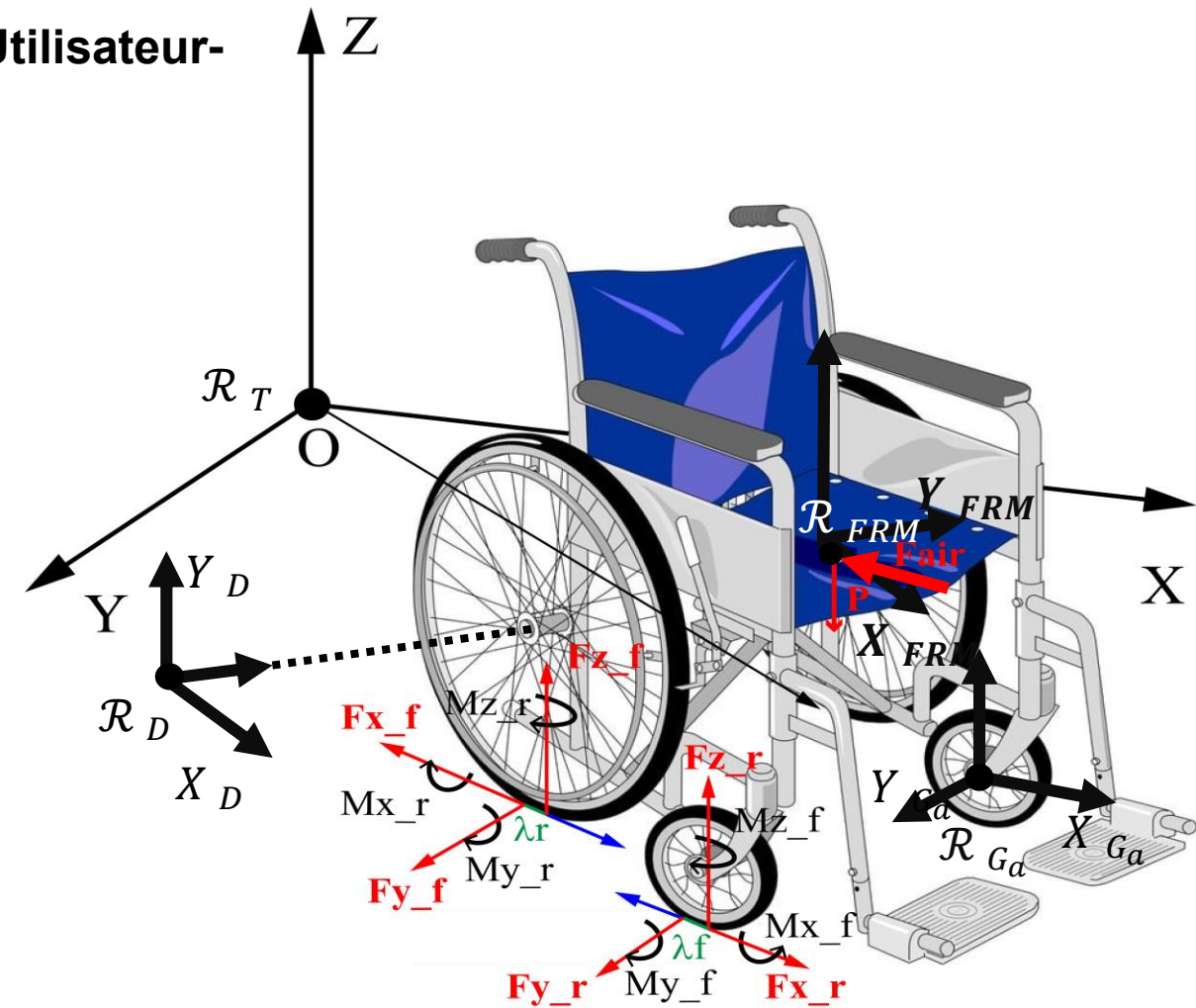
Modèle de locomotion sur sol plat et incliné

- Géométrie du sol
- Ligne droite
- Virage
- Influence de la pente et du dévers

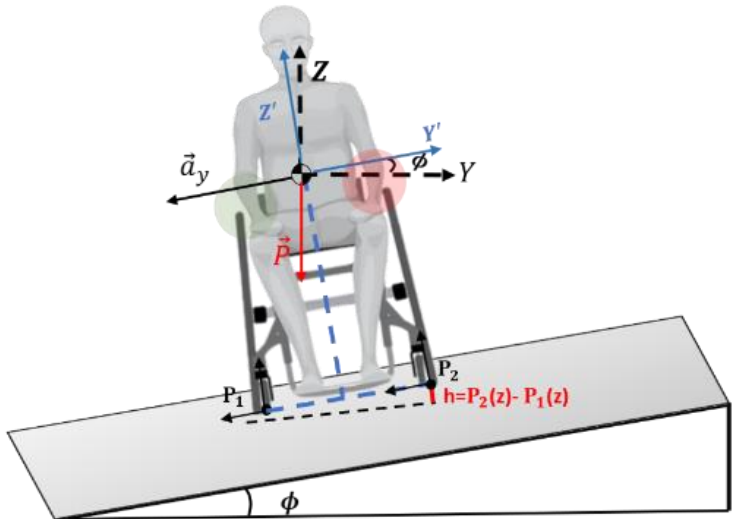
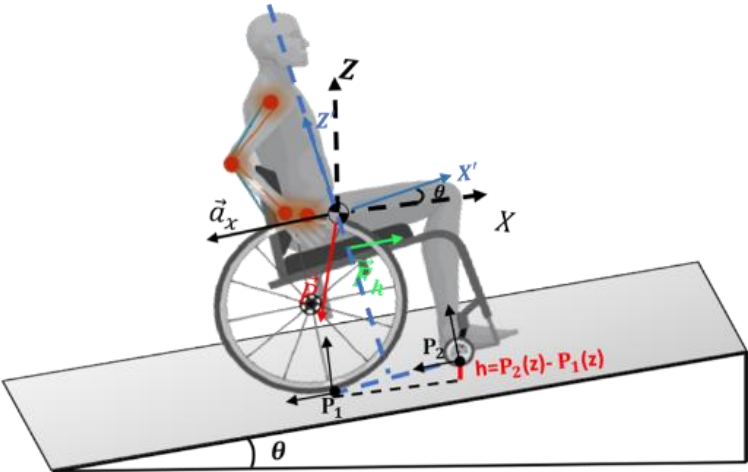
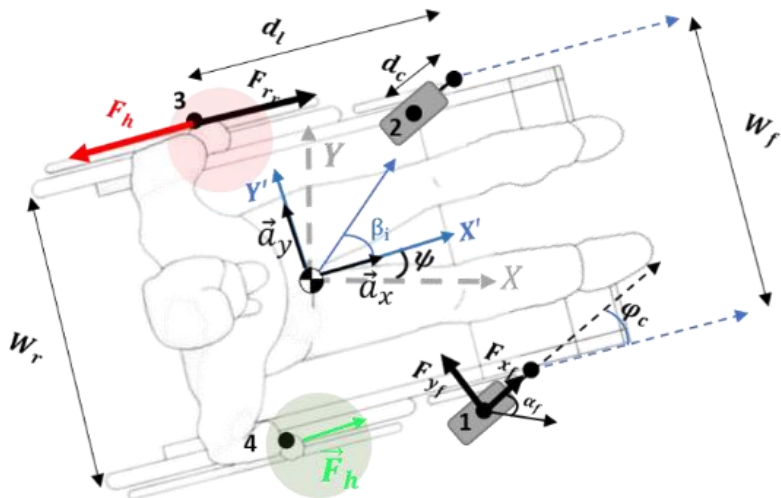
Influence des roues avant [Chénier et al., 2011]

Dynamique des réactions du sol

- Résistance au roulement
- Résistance au pivotement



Locomotion en FRM sur simulateur: Modèle dynamique



$$M_T(\dot{V}_x - \dot{\psi}V_y) = \sum_{i=1}^N F_{xi}(\omega)$$

$$M_T(\dot{V}_y + \dot{\psi}V_x) = \sum_{i=1}^N F_{yi}(\omega)$$

$$I_z\ddot{\psi} = \sum_{i=1}^N T(\psi)$$

$$I_r\dot{\omega} = \tau_{hi} - \sum_{i=1}^N T(\omega)$$

$$J_c\dot{\omega}_c = (d_c + R_{ci})F_{xci} - \eta\omega_c - R_{ci}F_{fi}$$

$$J_f\ddot{\phi}_c = d_{ci}(F_{fyi} - F_{xfi})$$

$$\theta = \sin^{-1}\left[\frac{\frac{P_{z1} + P_{z2}}{2} - \frac{P_{z3} + P_{z4}}{2}}{d_l}\right]$$

$$\phi = \sin^{-1}\left[\frac{\frac{P_{z1} + P_{z3}}{2} - \frac{P_{z2} + P_{z4}}{2}}{w_r}\right]$$

Situations de locomotion :

- ☒ Ligne droite
- ☒ Virage

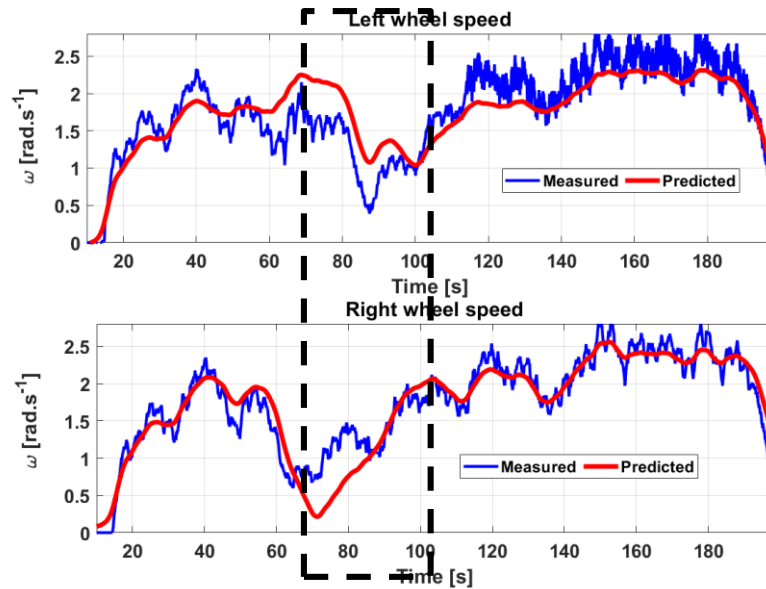
Situations de locomotion :

- ☒ Ligne droite
- ☒ Virage
- ☒ Pente

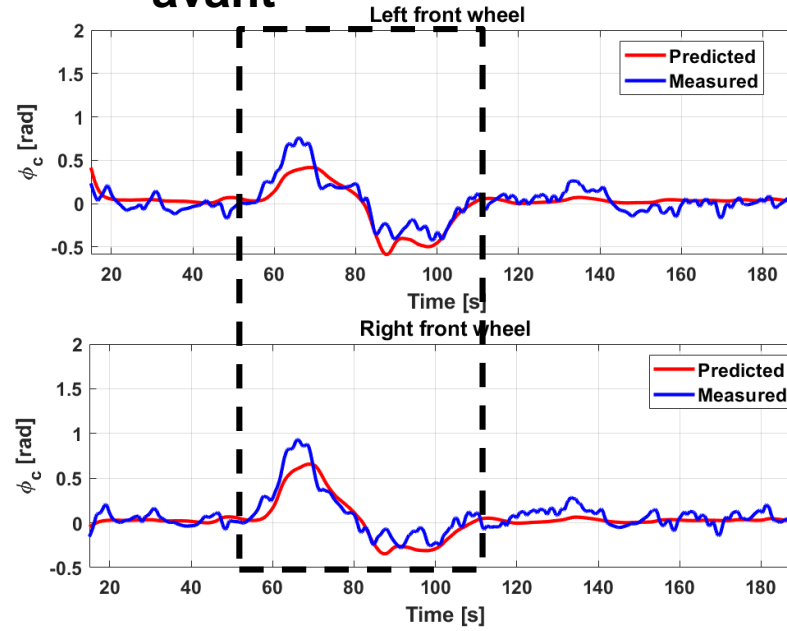
Situations de locomotion :

- ☒ Ligne droite
- ☒ Virage
- ☒ Dévers

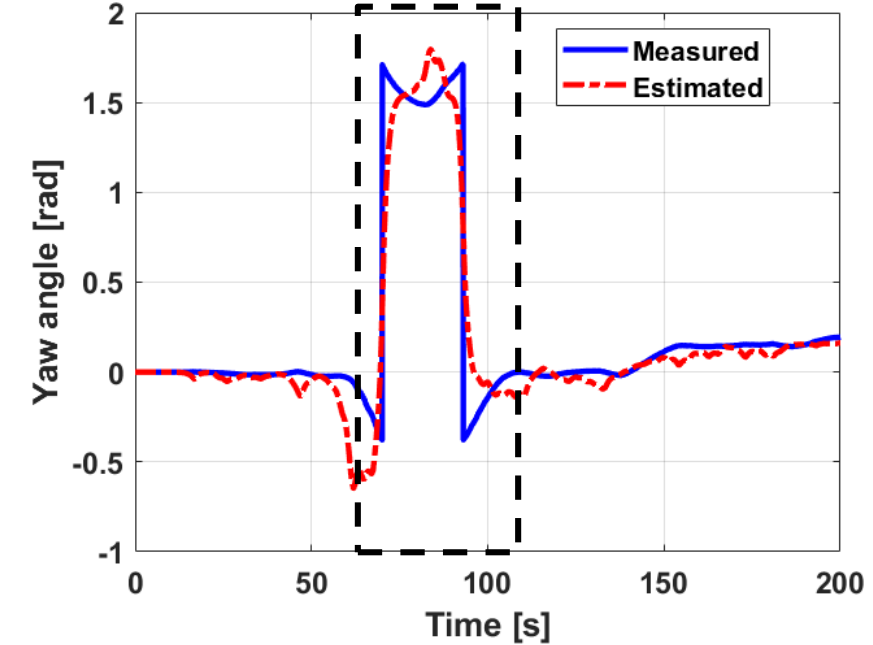
Modèle des roues arrière



Modèle des fourches avant



Modèle de lacet



Identification du modèle → Algorithme Levenberg-Marquard -RLS

$$\begin{aligned} \text{RMSE}_L &= 0,61 \\ \text{RMSE}_R &= 0,625 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{RMSE}_L &= 0,42 \\ \text{RMSE}_R &= 0,392 \end{aligned}$$

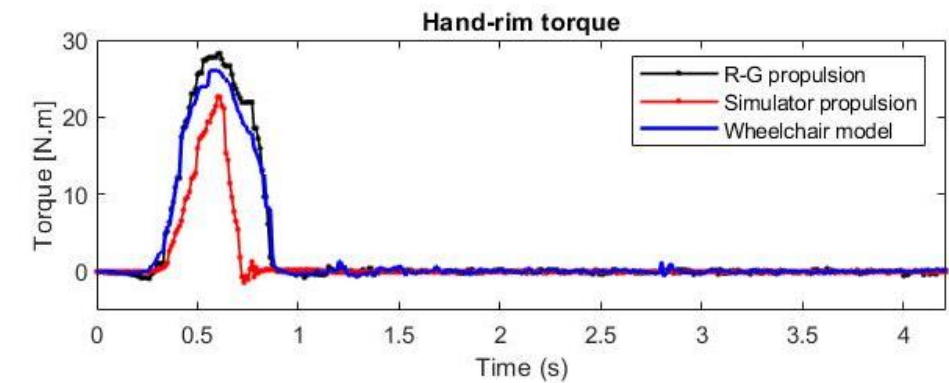
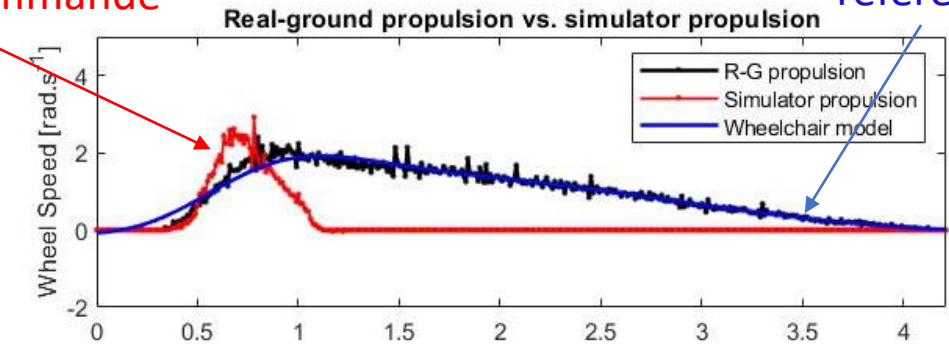
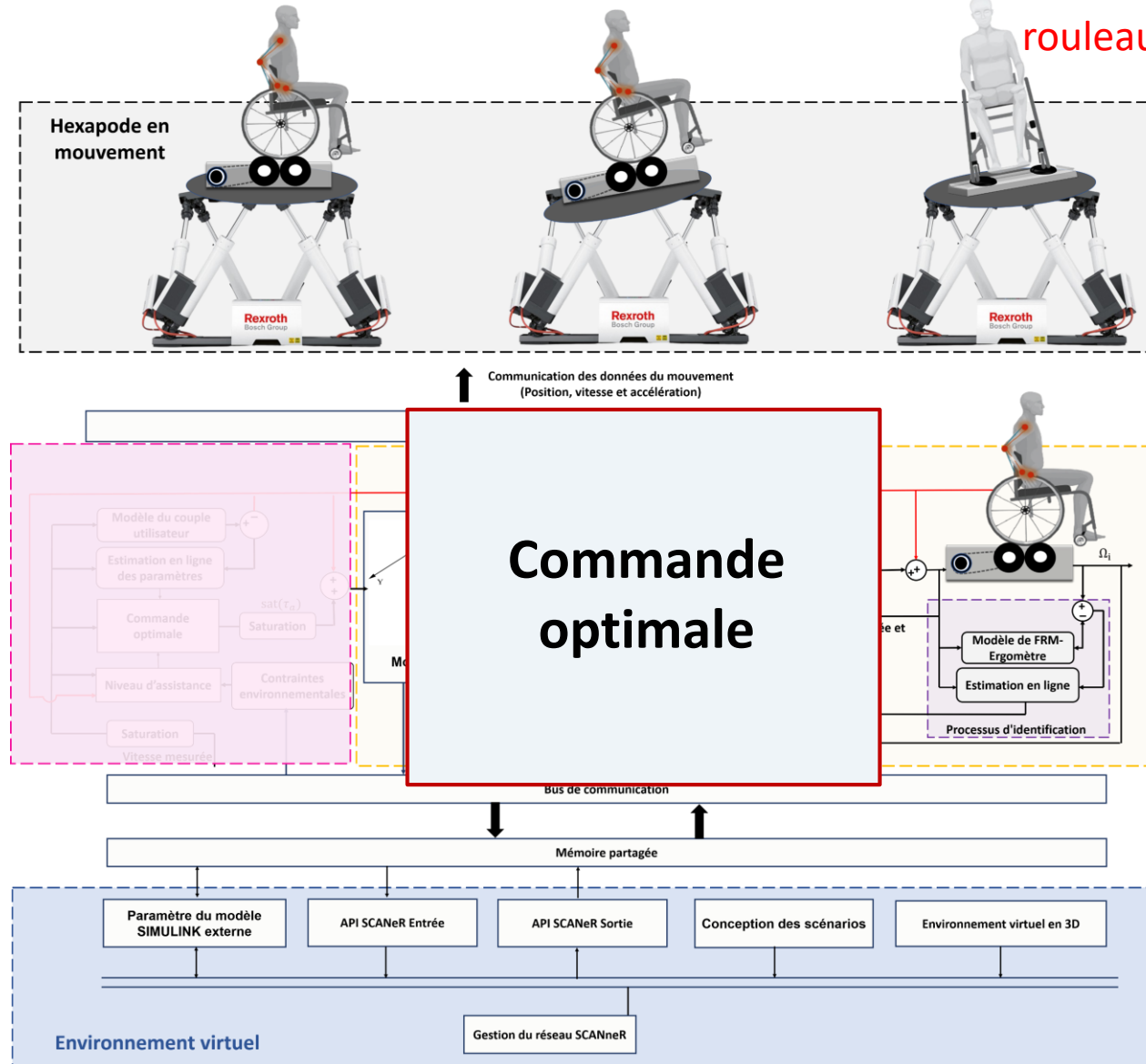
$$\text{RMSE} = 0,275$$



Le modèle de référence parvient à reproduire le profil des trajectoires mesurées du fauteuil roulant propulsé sur sol réel

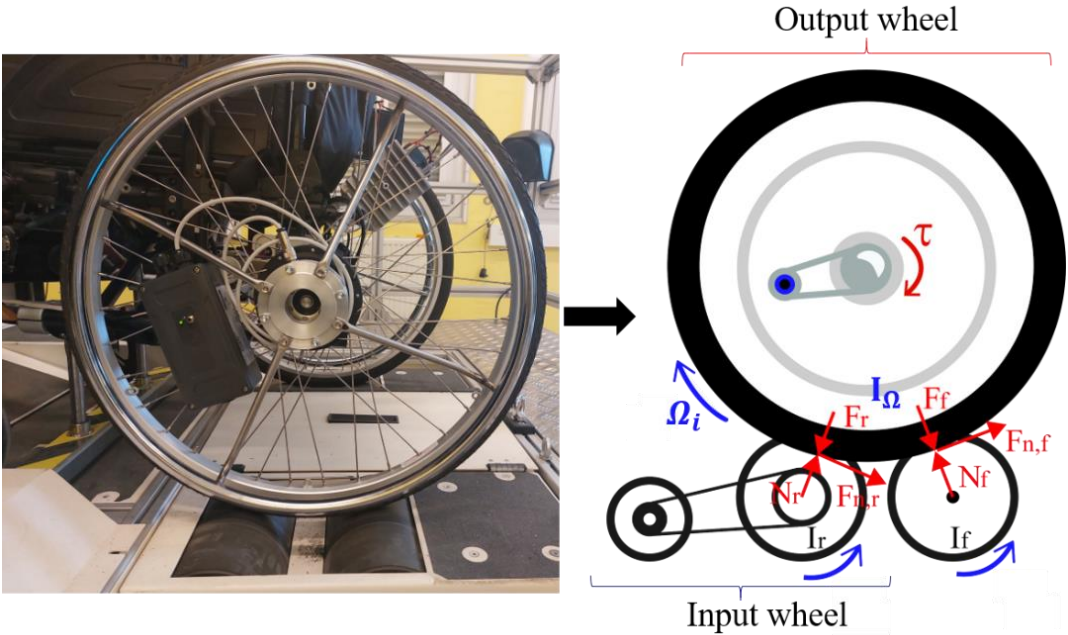
Vitesse d'un FRM sur un banc à
rouleaux non commandé

Le modèle de
référence



- Interface haptique et dynamique
- Modélisation de l'interaction entre Utilisateur-FRM-sol (modèle de référence)
- Commande haptique

➤ **Modèle non linéaire du système roues-rouleaux** [Bentaleb et al., 2019]

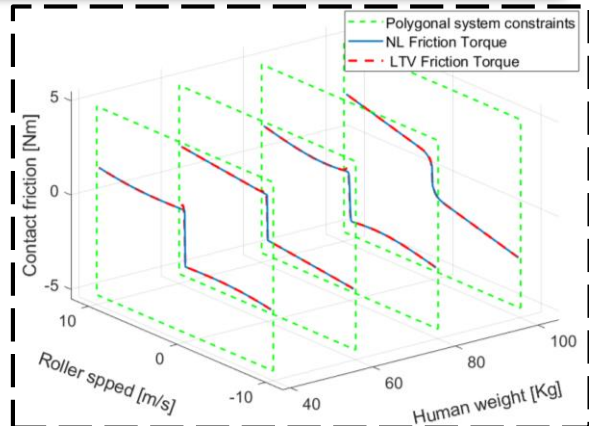


$$\left\{ \begin{aligned} I_l \dot{\Omega}_{el}(t) - F_l(\Omega_{el}(t)) &= K \text{sat}(T_{ml}(t)) + T_{hl}(t) \\ \text{Effort de contact} &= \text{Stiction} + \text{Coulomb} + \text{dissipative viscouse} \end{aligned} \right.$$

Caractéristiques de l'interaction banc à rouleaux-FRM:

- **Saturations** en couple d'entrée/ vitesse de sortie
- **Effort de contact non mesurable**
- **Perturbations** internes et externes
- **Commande en temps réel**

$$+ \theta_6 \Omega_{si}(t)$$



➤ **Modèle de frottement de contact linéaire à paramètres variants**

$$F_i(\theta_i, \Omega_{si}) = \Theta_1(t) \Omega_{si}(t) + \Theta_2(t)$$

➤ **Modèle LPV**

$$\begin{aligned} \dot{\Omega}_i(t) &= -\frac{\Theta_1(k)}{j_{i1}} \Omega_i(t) + \frac{K}{j_i} T_i(t) + D(t)w(t) \\ D(t)w(t) &= \frac{1}{j_i} \Theta_2(t) w(t) \\ y(k) &= \Omega_i(k) \end{aligned}$$

La représentation d'état est donnée par :

$$\dot{x}(t) = A(\Theta(t))x(t) + B \text{sat}(u) + D(\Theta)w(t)$$

La représentation floue T-S, [Wang and Tanaka, 2004] est donnée par :

$$\sum_{\Theta} : \dot{x} = \sum_{i=1}^4 h_i(\Theta)(A_i x + D_i w) + B \text{sat}(u)$$

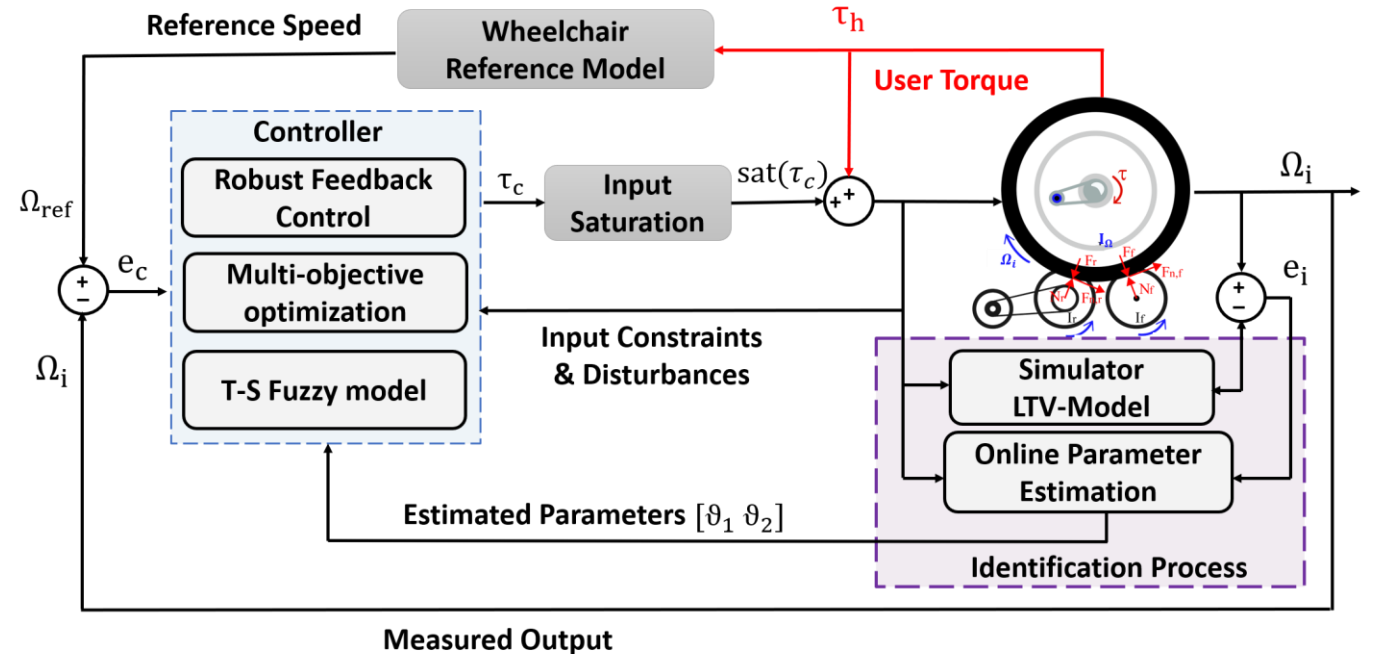
$$\text{avec } E_i^1(\Theta_i) = \frac{\overline{\Theta_i} - \Theta_i}{\overline{\Theta_i} - \underline{\Theta_i}}, \quad E_i^2(\Theta_i) = 1 - E_i^1(\Theta_i),$$

$$\sum_{i=1}^2 E_i^1(\Theta_i) = 1, \quad \text{et} \quad \sum_{i=1}^2 E_i^2(\Theta_i) = 1, \quad 0 \leq E_i^2(\Theta_i) \leq 1$$

La fonction d'appartenance de la règle i est le produit des fonctions E_i^1 et E_i^2 :

$$\begin{aligned} h_1 &= E_1^1 E_2^1 & h_2 &= E_1^1 E_2^2 \\ h_3 &= E_1^2 E_2^1 & h_4 &= E_1^2 E_2^2 \end{aligned}$$

Architecture de commande TS-LPV



Synthèse de la commande LPV

Fonction de coût à minimiser

$$\sup_{\|w\|_2 \neq 0} \frac{\mathcal{J}}{\|w\|_2} \leq \gamma$$

avec

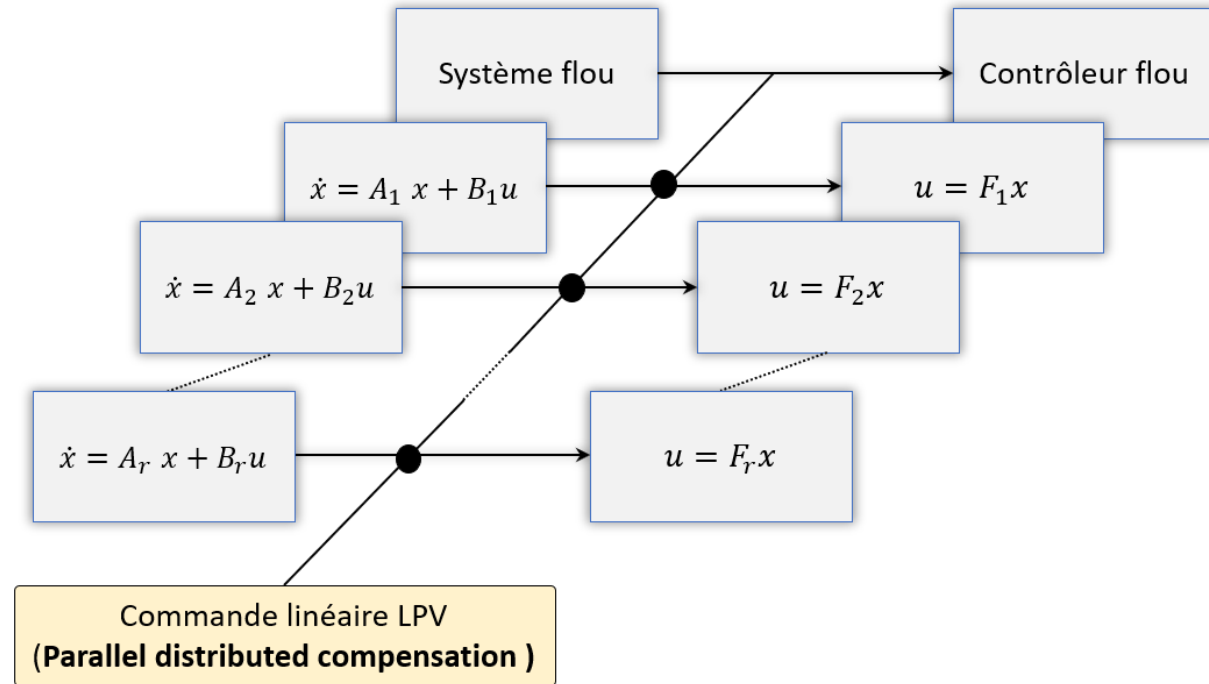
$$\mathcal{J} = \int_0^\infty (e^T(t)Qe(t) + u^T(t)Ru(t)) dt$$

Commande PDC (Parallel Distributed Compensation)

$$u = - \sum_{i=1}^4 h_i F_i e \text{ et } F_i = M_i X^{-1}, i \in \{1,4\}$$

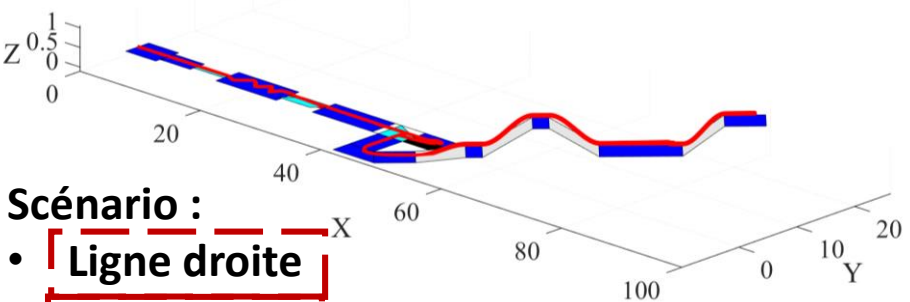


$$\begin{bmatrix} He(A_i X - B M_i) & X^T & M_i^T & D_i \\ * & Q^{-1} & 0 & 0 \\ * & * & R^{-1} & 0 \\ * & * 0 & * & -\sigma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad \begin{bmatrix} 1 & x(0)^T \\ x(0) & X \end{bmatrix} \geq 0 \quad \begin{bmatrix} X & M_i^T \\ M_i & u_{max}^2 I \end{bmatrix} \geq 0$$



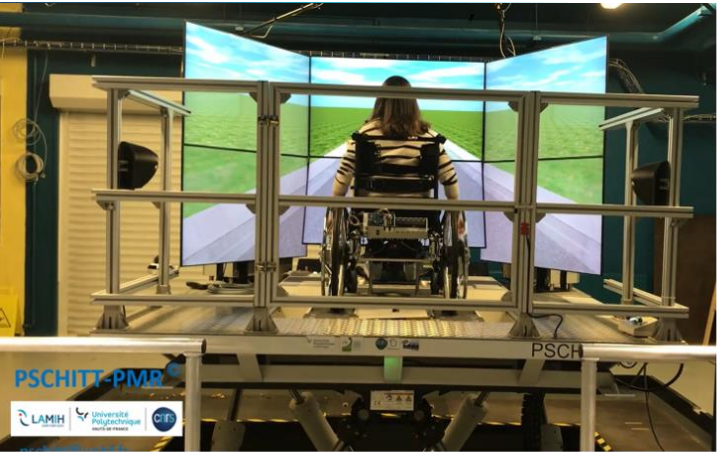
Caractéristiques de la commande TS-LPV

- La minimisation de $\sup_{\|w\|_2 \neq 0} \frac{\mathcal{J}}{\|w\|_2} \leq \gamma$ permet :
 - Stabilité au sens de Lyapunov
 - Rejet de perturbation

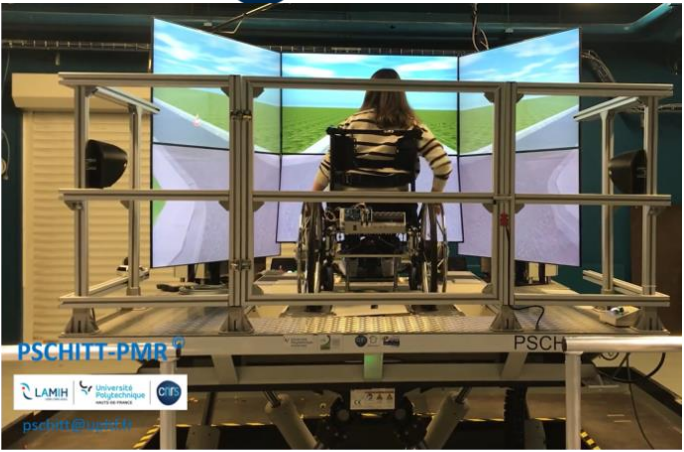


Scénario :

- Ligne droite
- Virage
- Pente
- Dévers

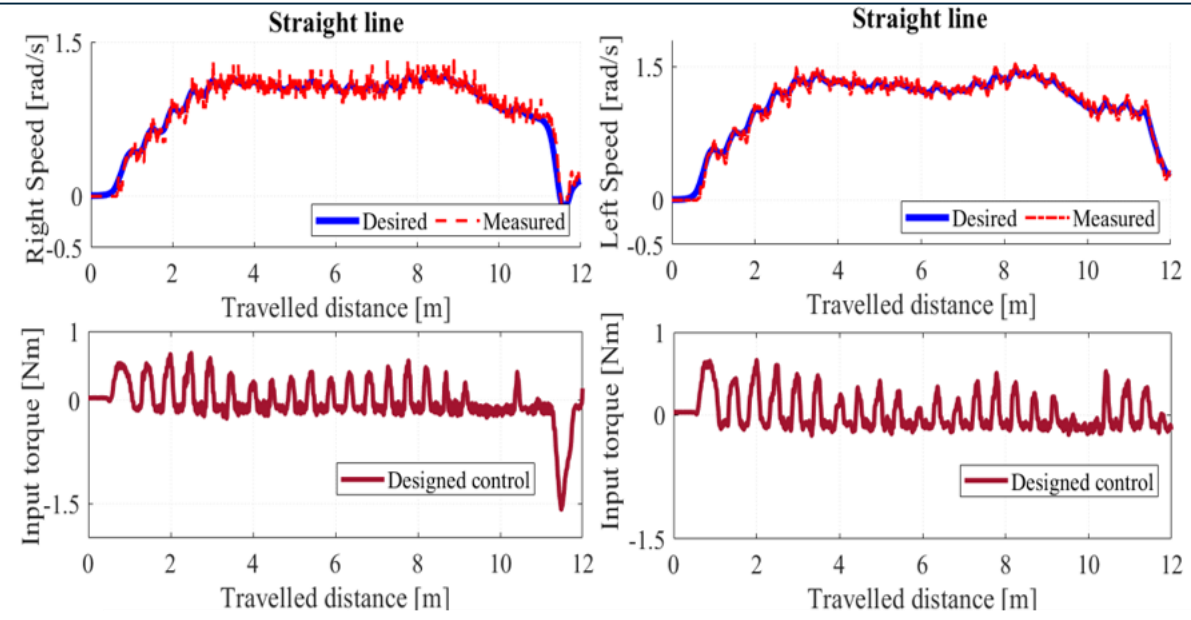


(a) Ligne droite

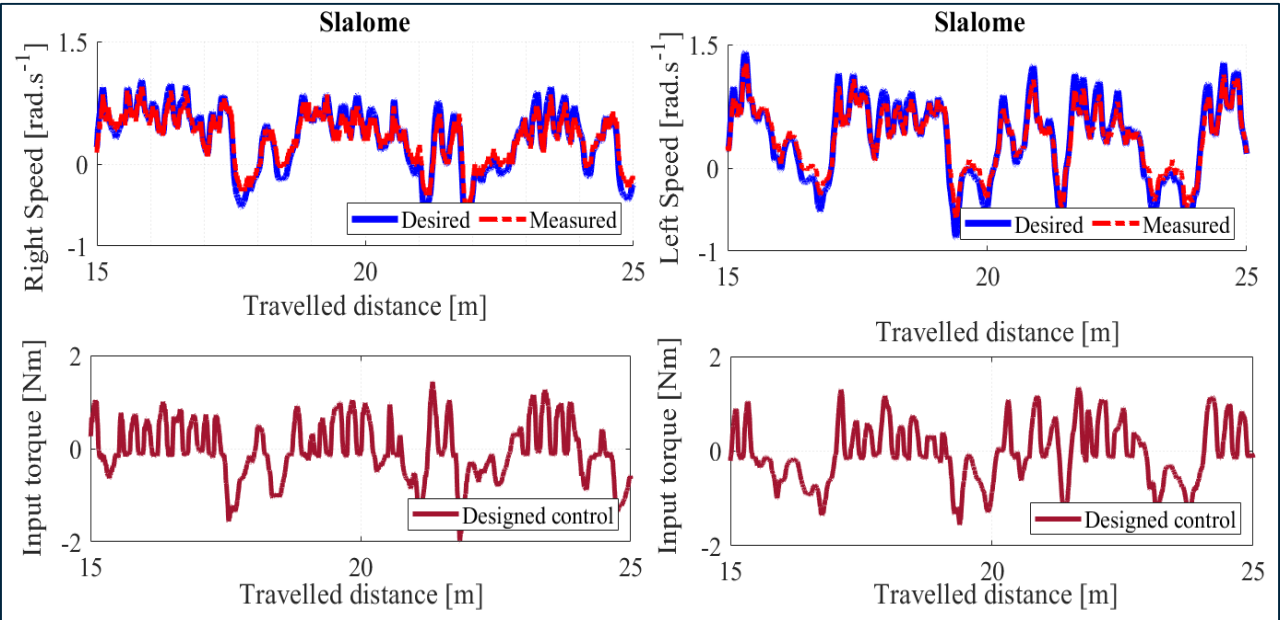


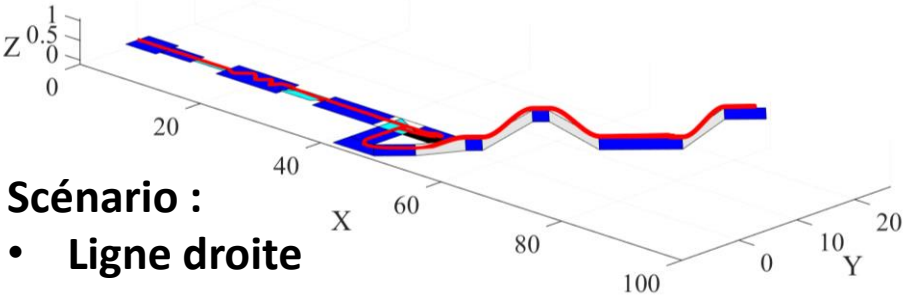
(b) Virage

Déplacement en ligne droite



Déplacement en slalom





Scénario :

- Ligne droite
- Virage
- **Pente**
- **Dévers**

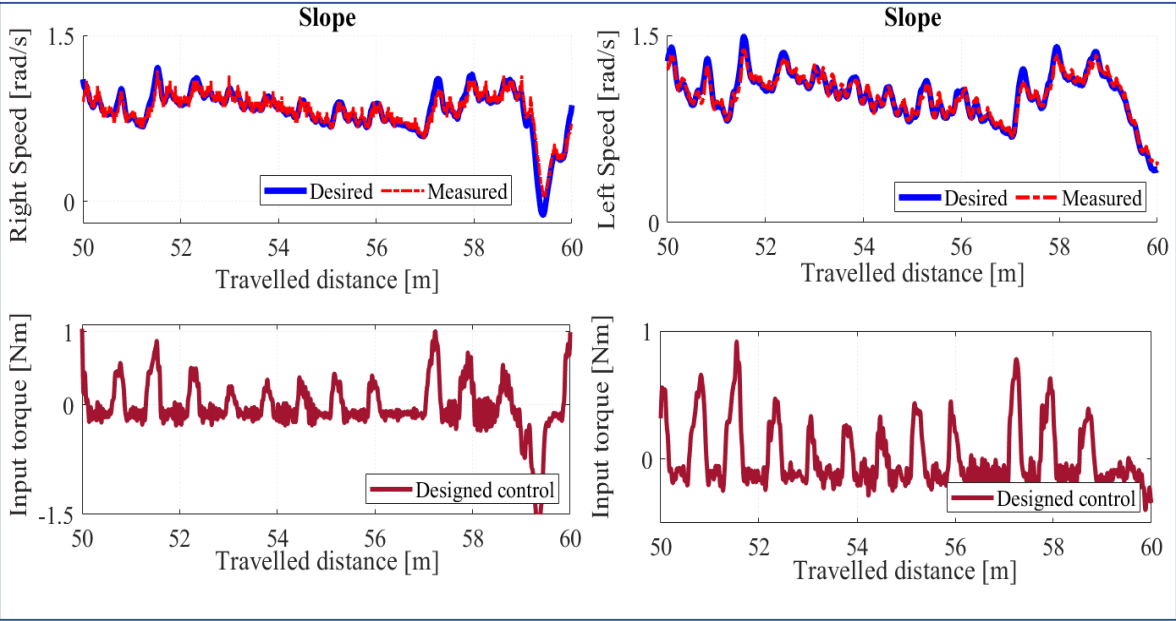


(c) Pente

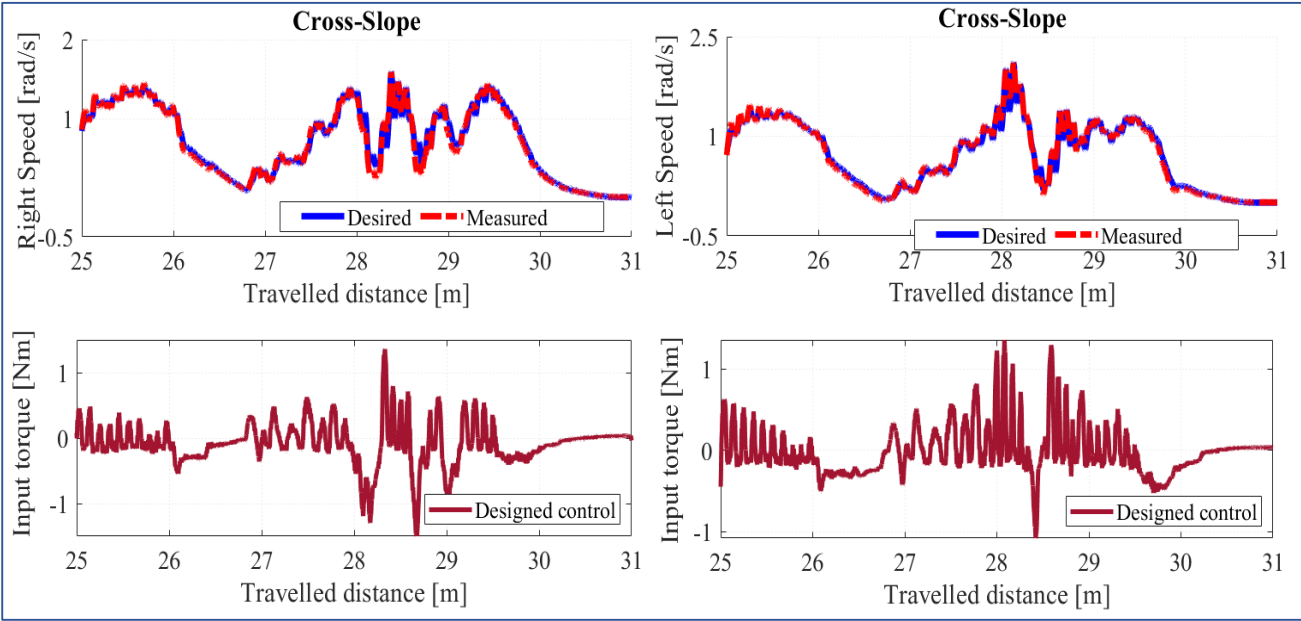


(d) Dévers

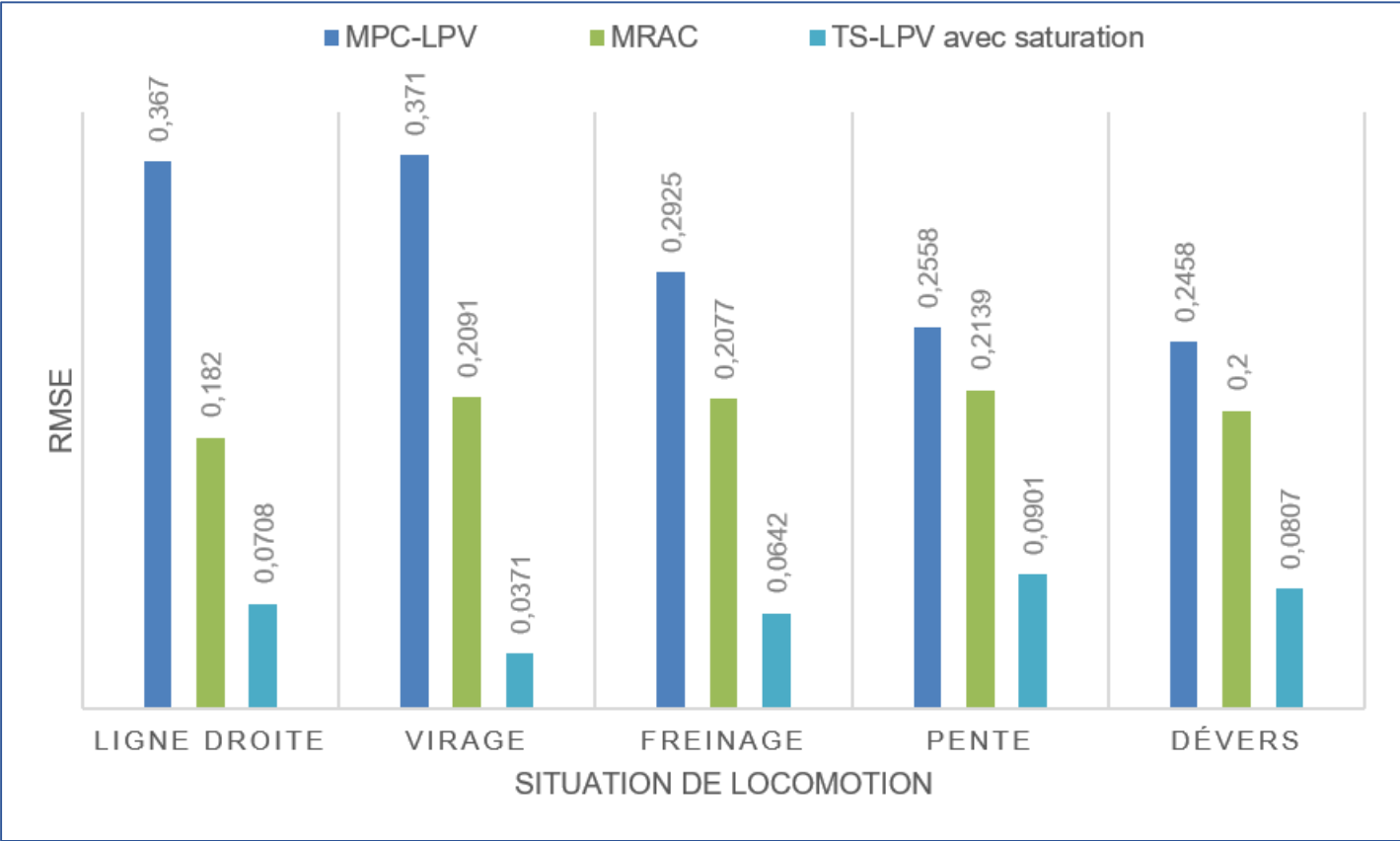
Déplacement en pente



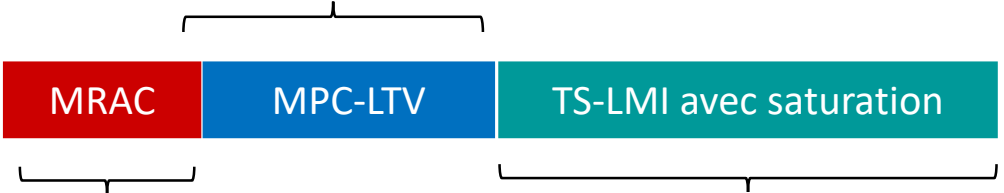
Déplacement en dévers



Comparaison des performances des trois stratégies de commande



- ✗ $RMSE \cong 0,3063/0.2527$;
- ✗ Contraintes considérées;
- ✗ Perturbations non considérées;
- ✗ Temps de calcul induit des retards.



- ✗ $RMSE \cong 0.2025$;
- ✗ Contraintes non considérées;
- ✗ Perturbation non considérée,
- ✗ Pas de retard

- ✗ $RMSE \cong 0.0879/ 0.0686$
- ✗ Contraintes considérées;
- ✗ Perturbations considérées;



Compagnes expérimentales

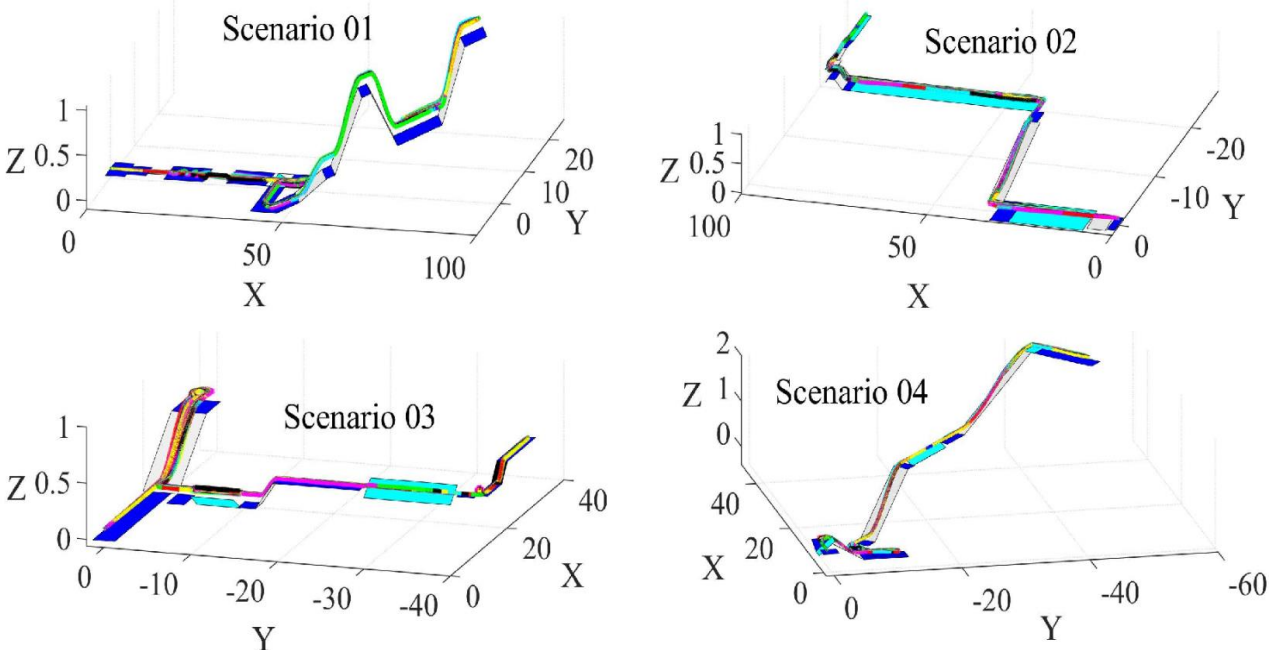
✂ **18 sujets :**

- 3 sujets exclus (mal du simulateur)
- 8 hommes [24, 50 ans]
- 7 femmes [28, 45 ans]

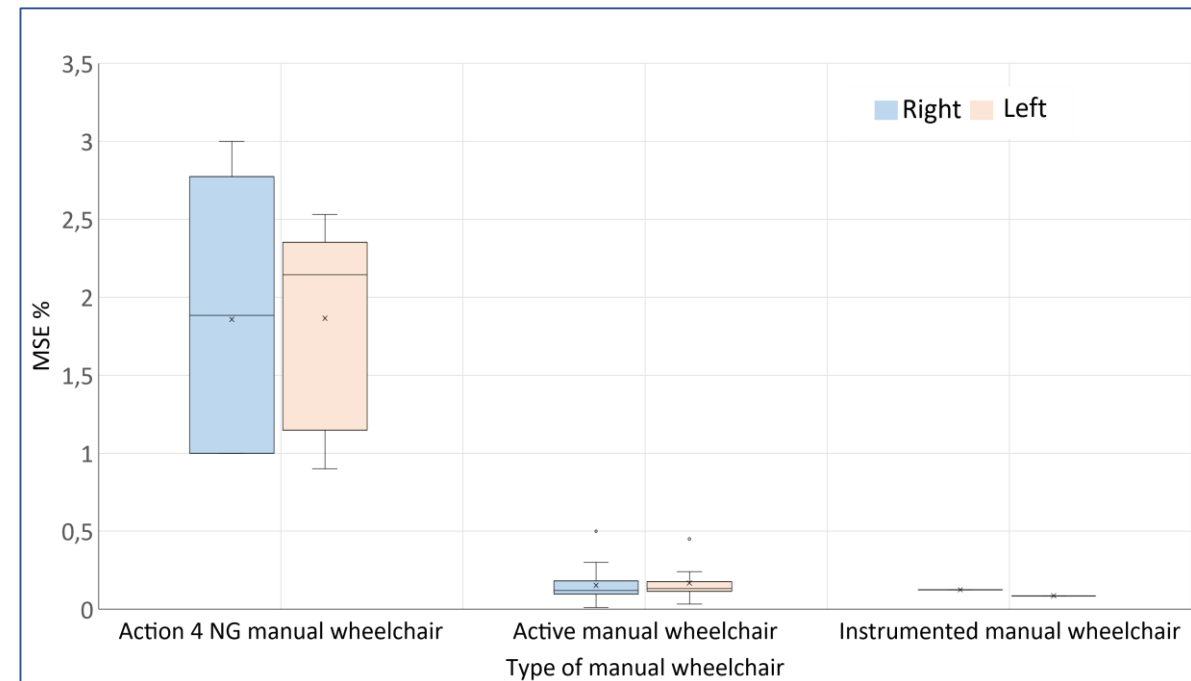
✂ **4 Scénarios de locomotion**, chaque scenario comporte :

- démarrage, freinage
- ligne droite, virage
- pente, dévers

Scénarios de locomotion



Test de robustesse sur 3 types de FRM





Compagnes expérimentales

♿ **18 sujets :**

- 3 sujets exclus (mal du simulateur)
- 8 hommes [24, 50 ans]
- 7 femmes [28, 45 ans]

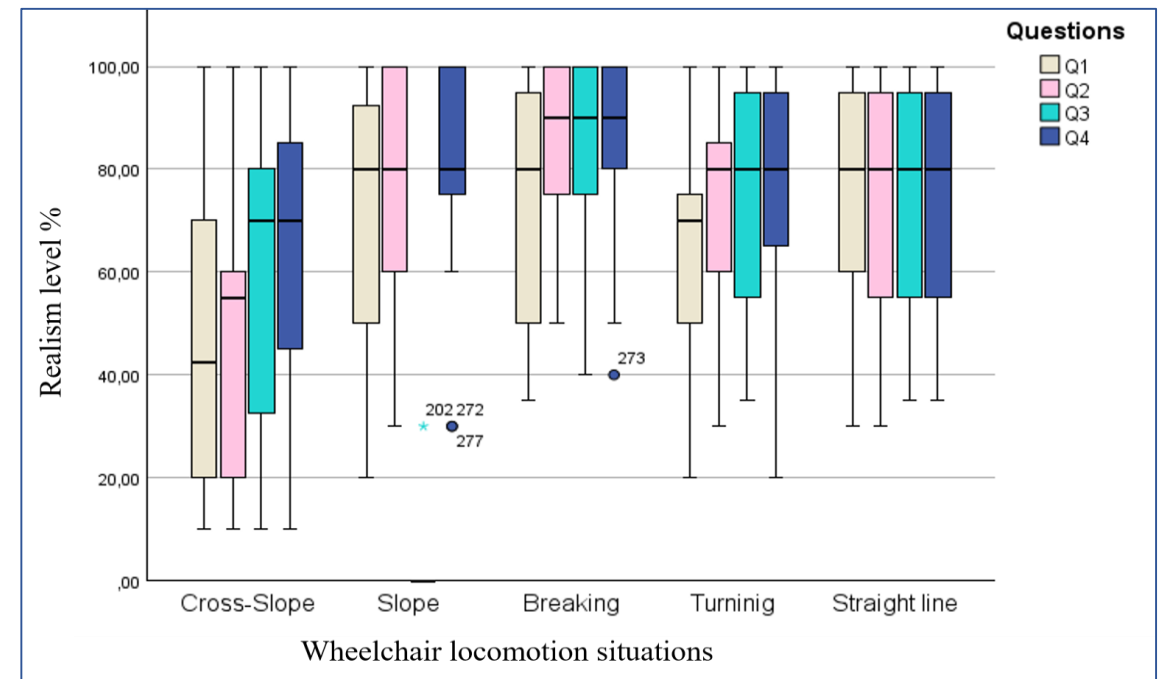
♿ **4 Scénarios de locomotion**, chaque scenario comporte:

- démarrage, freinage
- ligne droite, virage
- pente, dévers

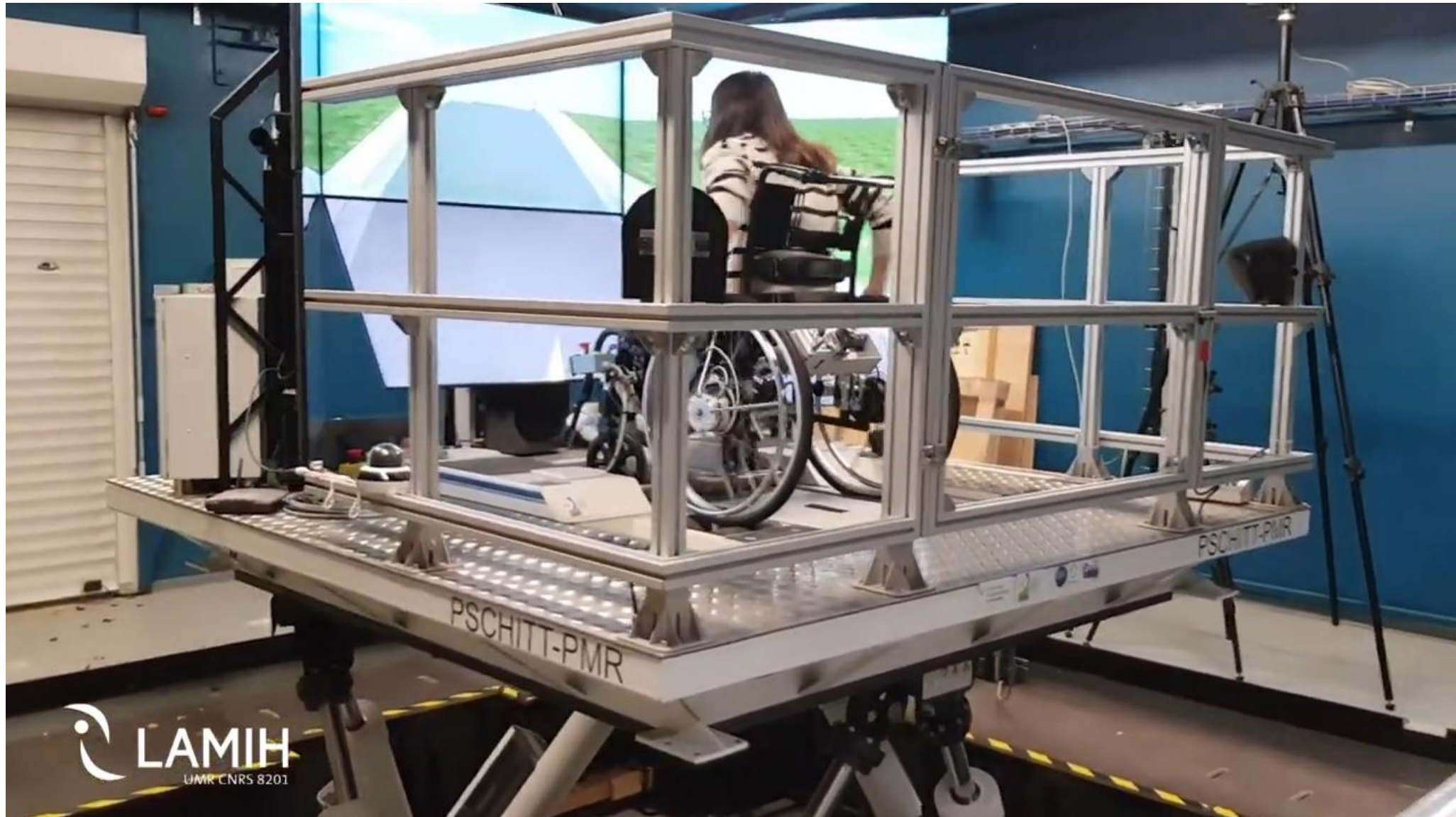
➡ Quatre questions:

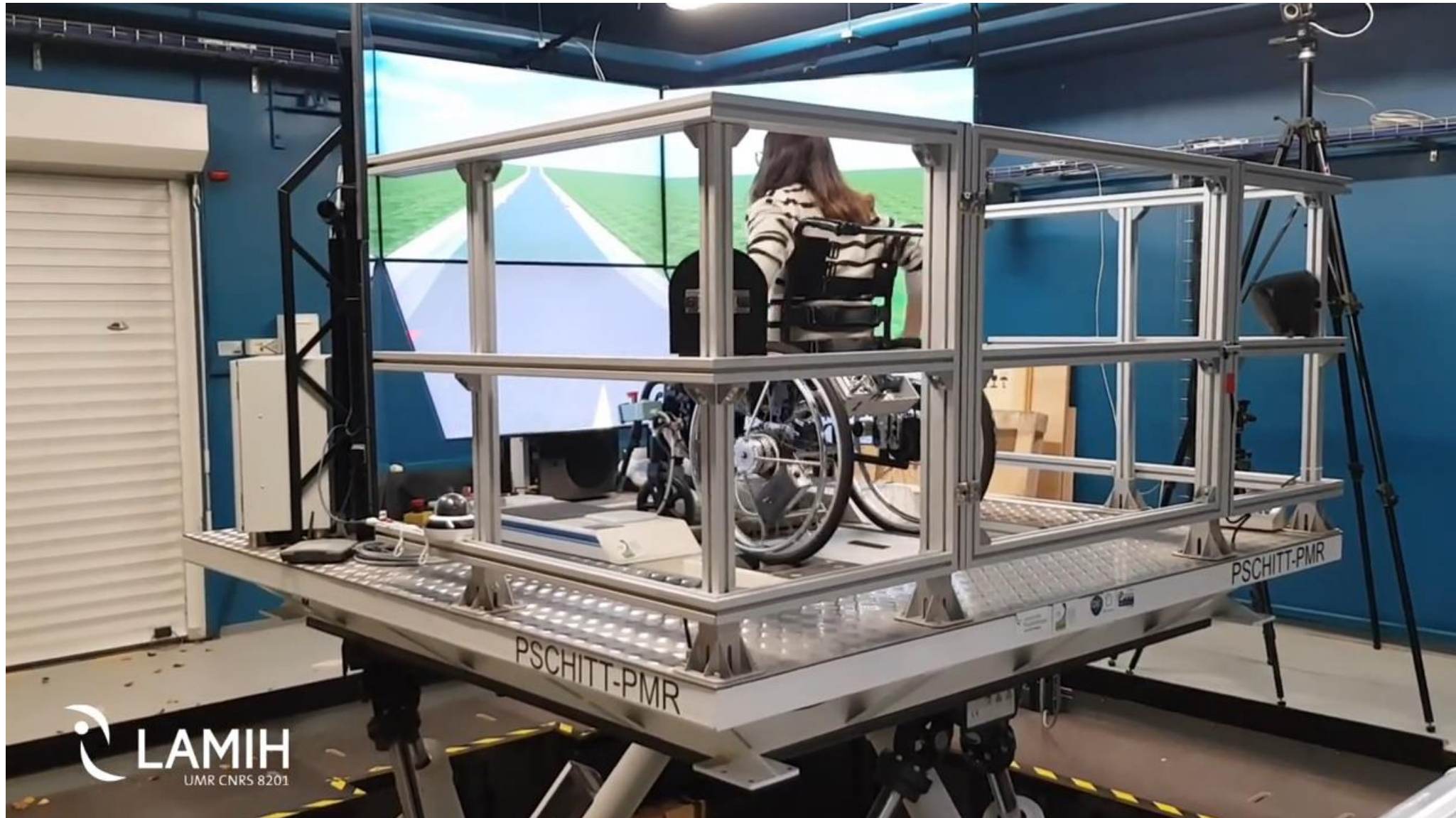
- Comment évaluez-vous le réalisme global de la locomotion ?
- Le comportement du fauteuil roulant est-il réaliste lors de la propulsion ?
- L'effort pour freiner le fauteuil roulant est-il réaliste ?
- Le comportement du fauteuil roulant est-il réaliste lorsque vous relâchez les poignées ?

Evaluation subjective sur le réalisme



Vidéo de démonstration (Pente et virage)





Système d'assistance

➤ Quantification d'un indice métrique de difficultés pour l'accessibilité :

- Tenir compte des **caractéristiques du terrain** et des **capacités de l'utilisateur**

➤ Implémentation du système d'assistance

- La validation de ces système d'assistance en conditions réelles, en utilisant un fauteuil roulant avec assistance électrique.

➤ Personnalisation du système d'assistance

- Algorithme d'apprentissage pour personnaliser le niveau d'assistance en fonction des comportements spécifiques de propulsion de l'utilisateur

Simulateur PSCHITT-PMR

➤ Réalisme du simulateur

- Intégration de la **dynamique du tronc** dans le modèle de référence du FRM
- **Fauteuil roulant prototype doté de moyens de mesures (forces, localisation, ...)** permettant la caractérisation du comportement dynamique du FRM (piste d'essais Gyrovia)

Merci pour votre attention