

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 :

Selon l'OMS ≈ 1.85%
de la population utilisent un
fauteuil roulant

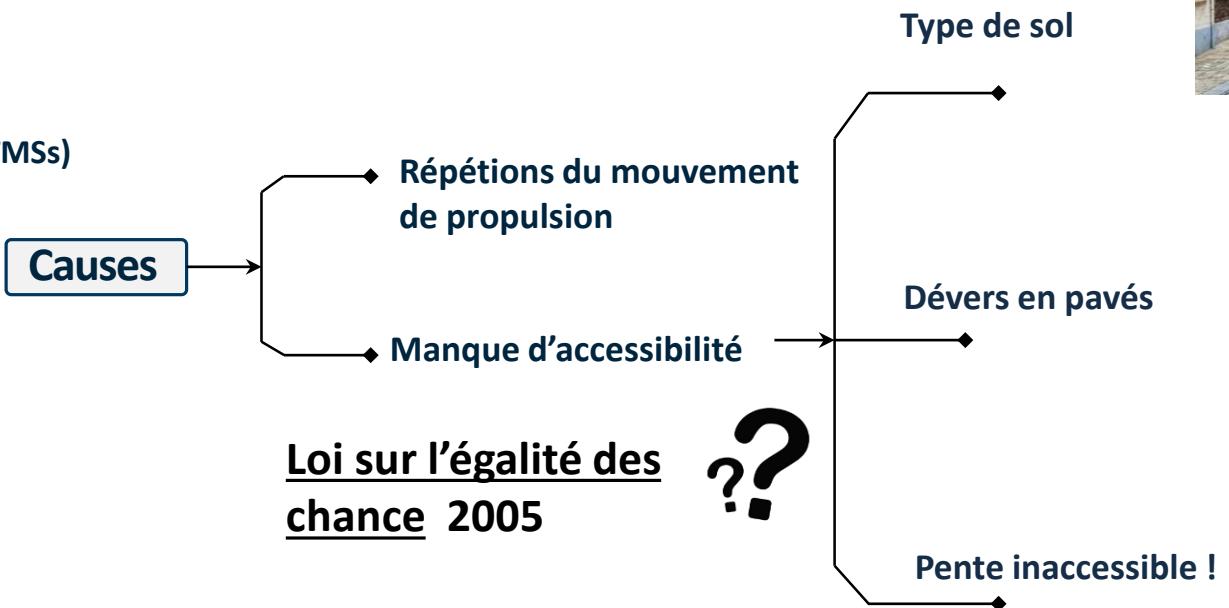
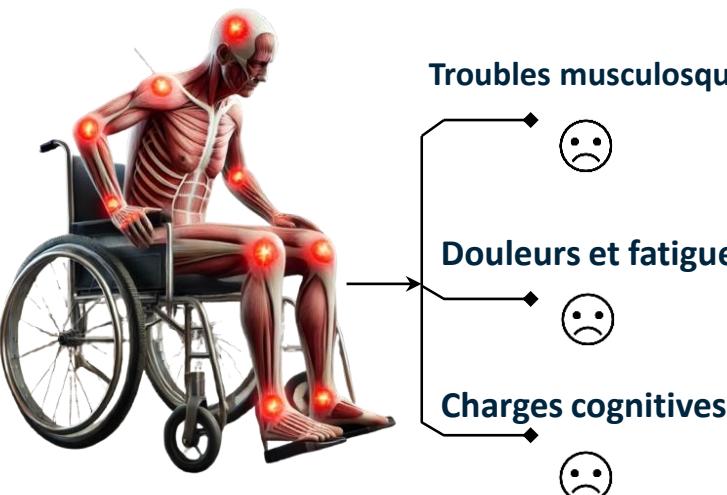


- Difficulté d'accessibilité en milieu urbain:
 - 62% des personnes à mobilité réduite souffrent d'isolement social¹
 - 67 % disent éprouver des difficultés pour se déplacer¹
 - Seulement 42 % des personnes sont en activité professionnelle²



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

Santé physique



1. APF France handicap

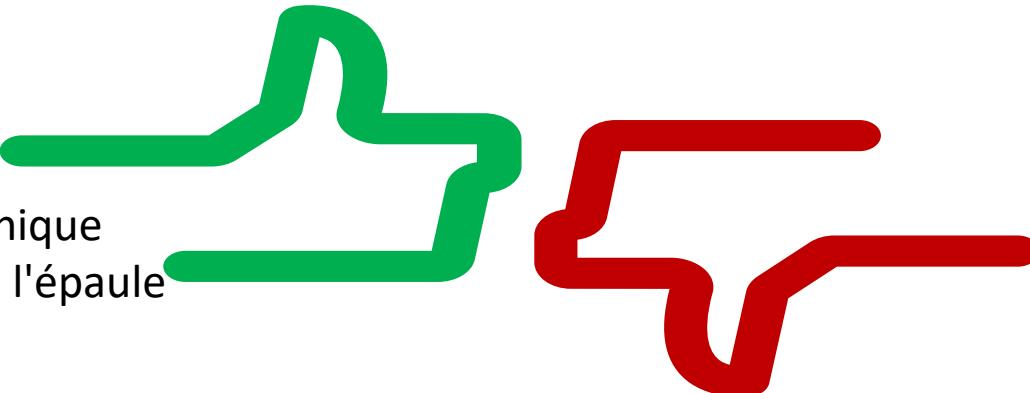
2. l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE)

► 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).



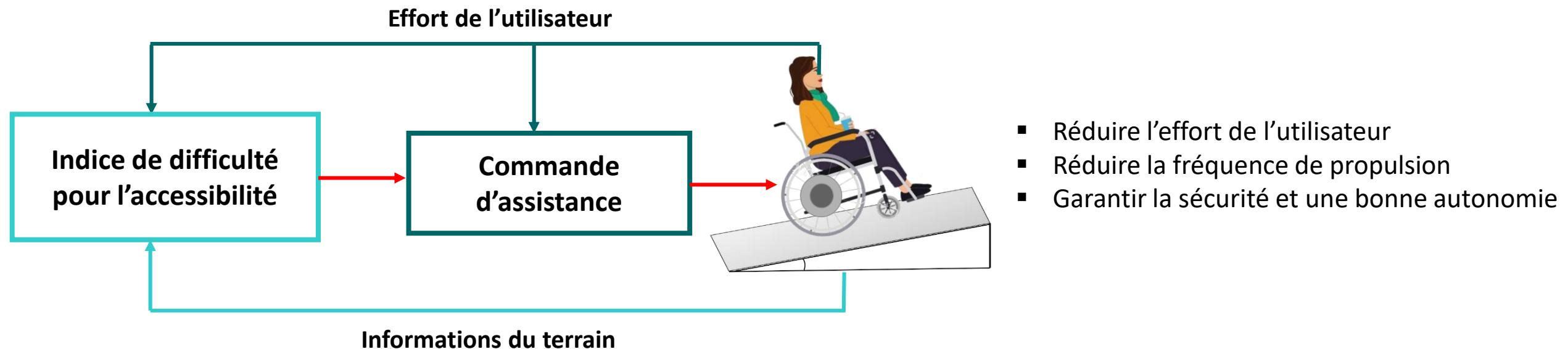
Poids ∈ [25, 50] kg

Poids ∈ [50, 150] kg





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

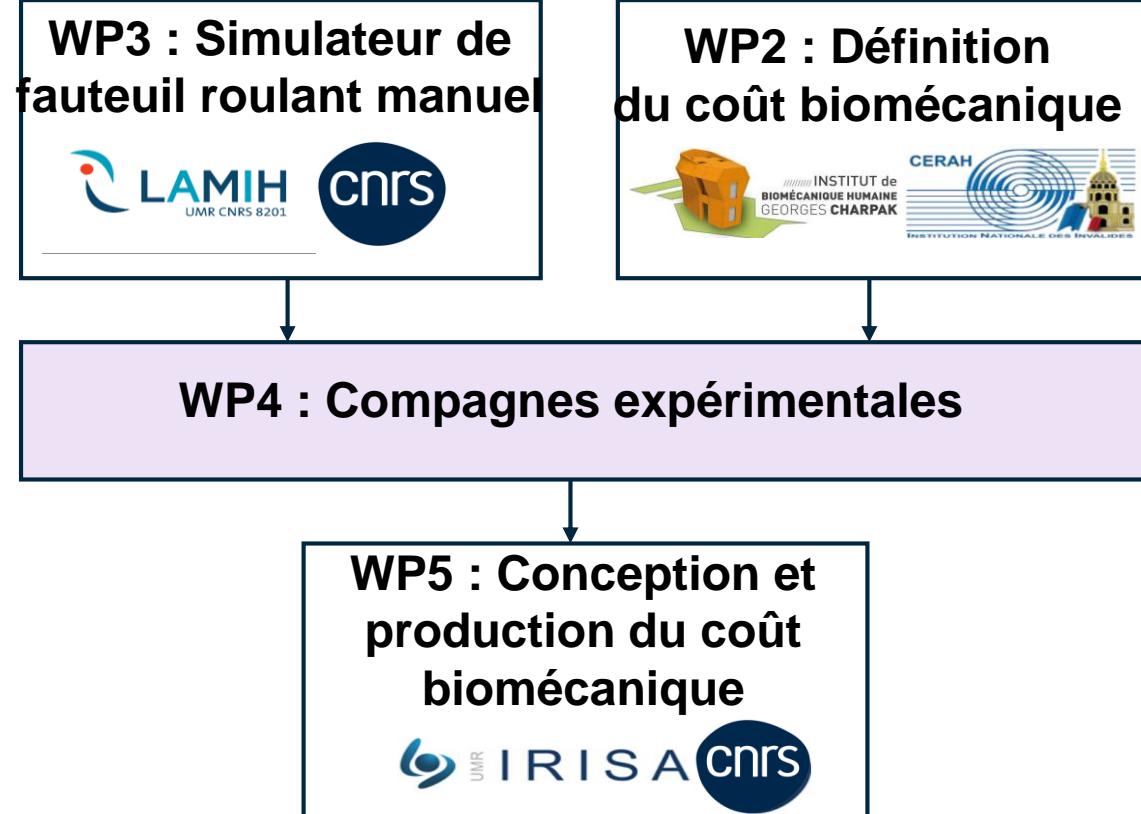


➡ Défis scientifique :

- Comment tenir compte 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 ?

Contexte & motivation

Collaboration : Projet ANR CapaCITIES (2020-2024)



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

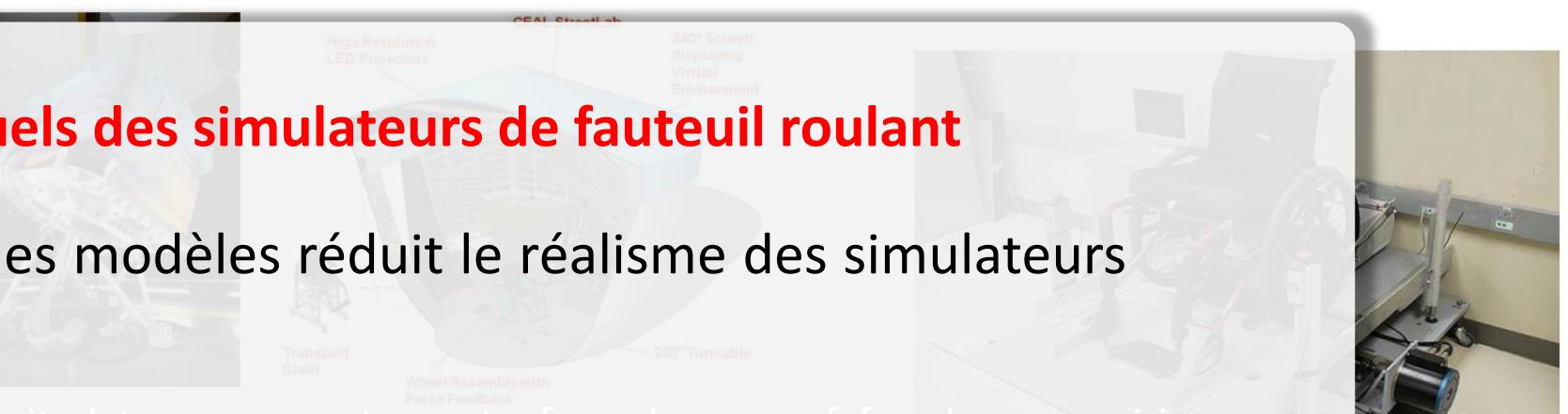
Nécessité de concevoir, tester et évaluer les systèmes d'assistance dans un environnement contrôlé et riche en situations de déplacement en FRM

Divers simulateurs de fauteuils roulants manuels existent

Défis actuels des simulateurs de fauteuil roulant

- La simplicité des modèles réduit le réalisme des simulateurs haptiques

(a) : Ergomètre instrumenté pour fauteuil roulant (offrant résistance et inertie) (Devillard et al., 2001).
adv. (b) : CEAL-Toronto (Crichlow et al. 2011)



- 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



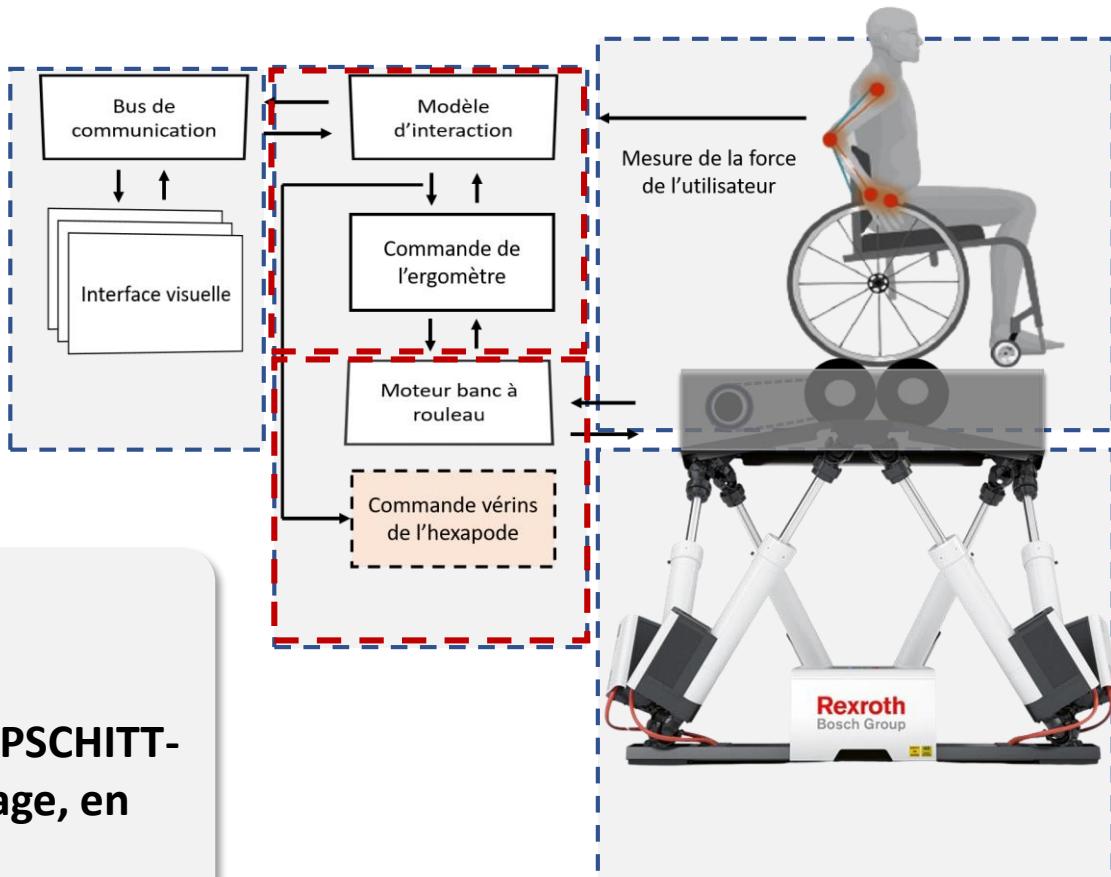
(c) : Ergomètre à rouleaux (Chenier et al., 2012)
effr. (d) : Simulateur pour fauteuils roulants manuels et électriques en réalité virtuelle immersive (CAVE), (C. Genova et al., 2022)

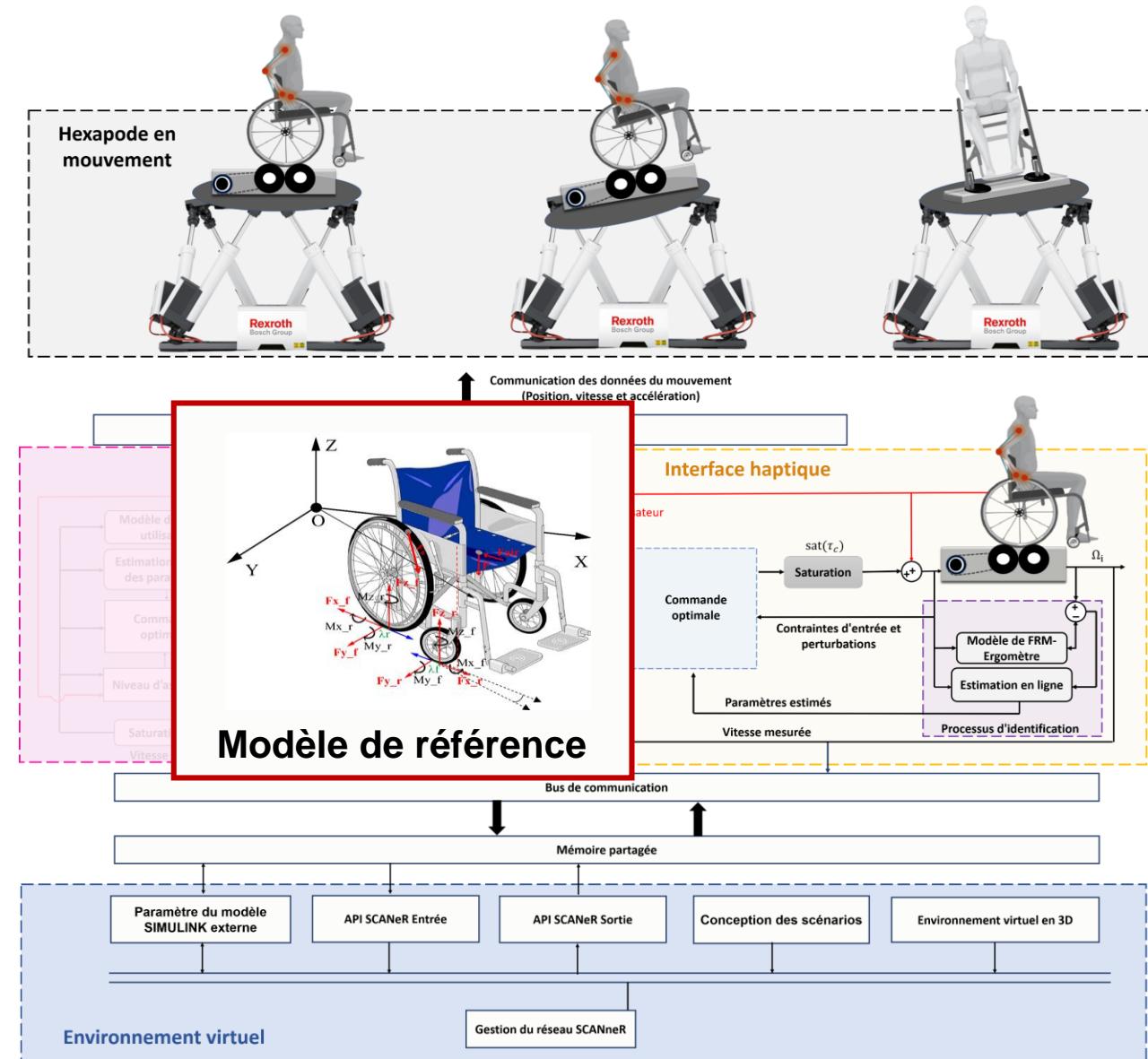
Critères de réalisme

- 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

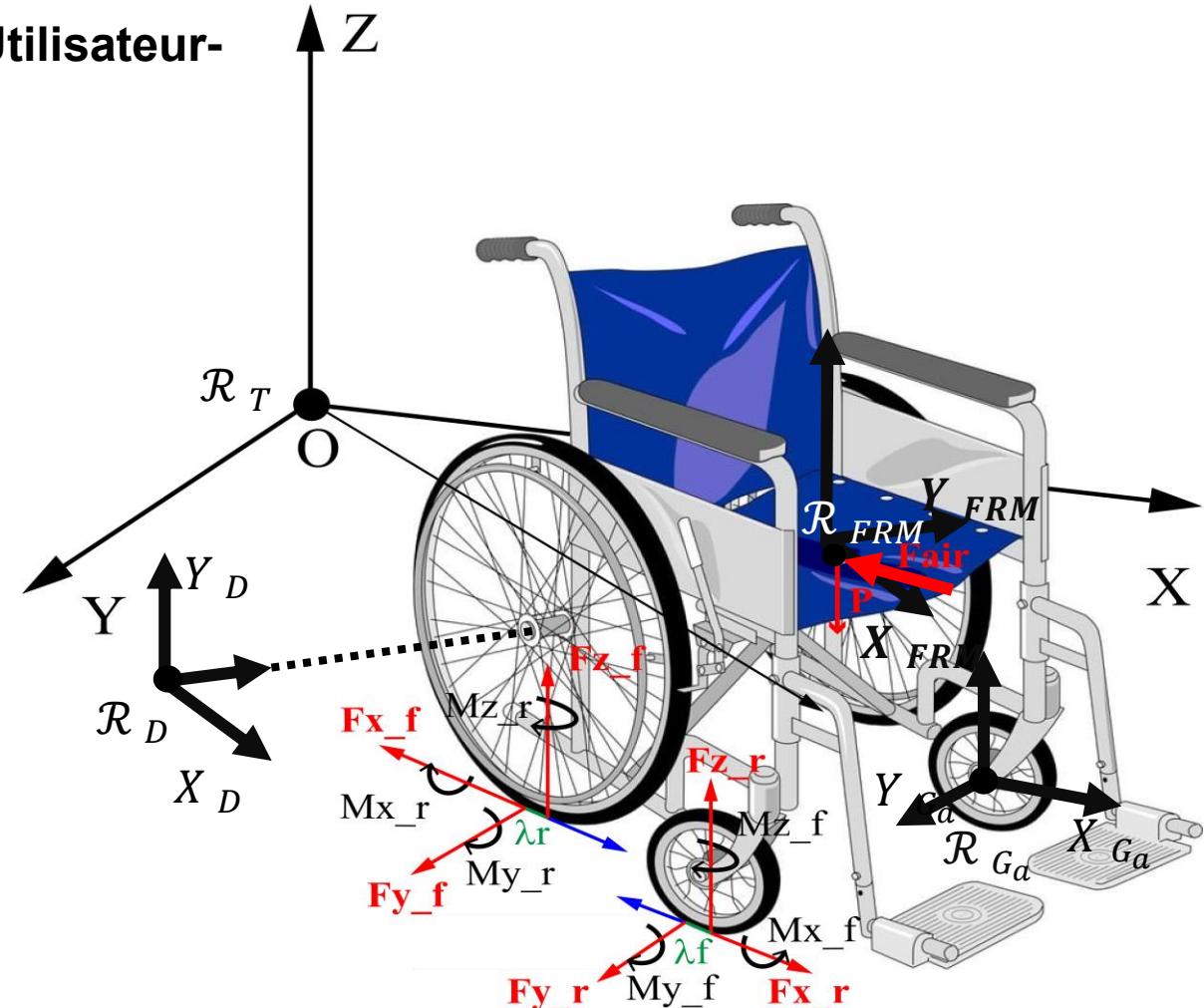
□ Modèle de locomotion sur sol plat et incliné

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

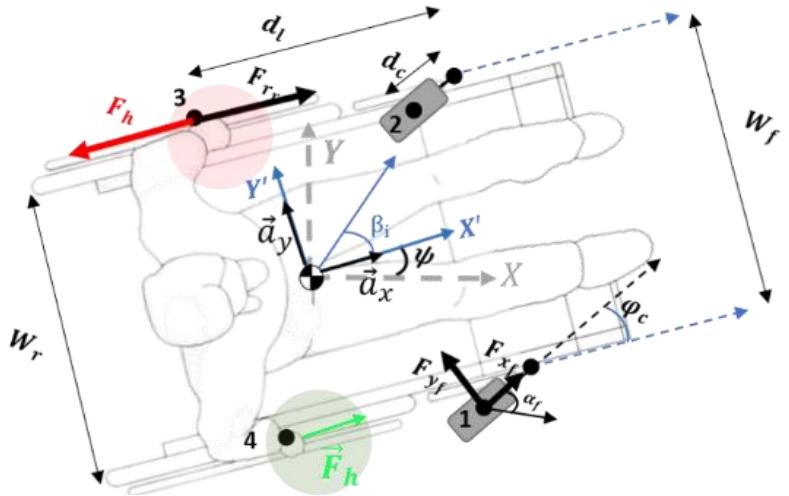
□ Influence des roues avant [Chénier et al., 2011]

□ Dynamique des réactions du sol

- Résistance au roulement
- Résistance au pivotement



Locomotion en FRM sur simulateur: Modèle dynamique



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

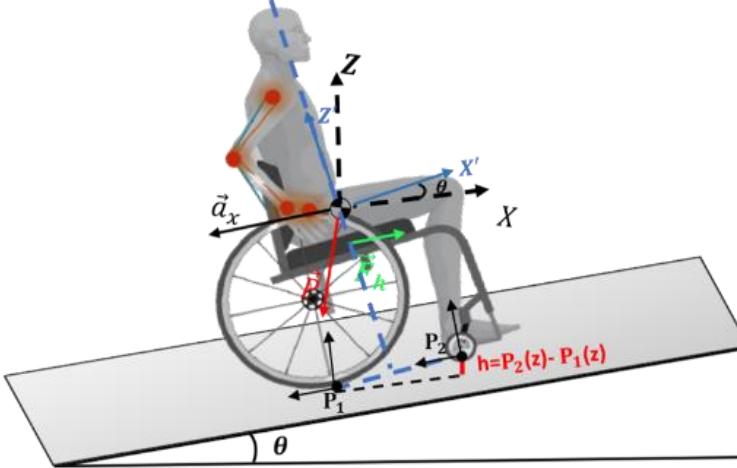
$$M_T(\dot{V}_y + \dot{\psi}V_x) = \sum_{i=1}^N F_{yi}(\omega)$$

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

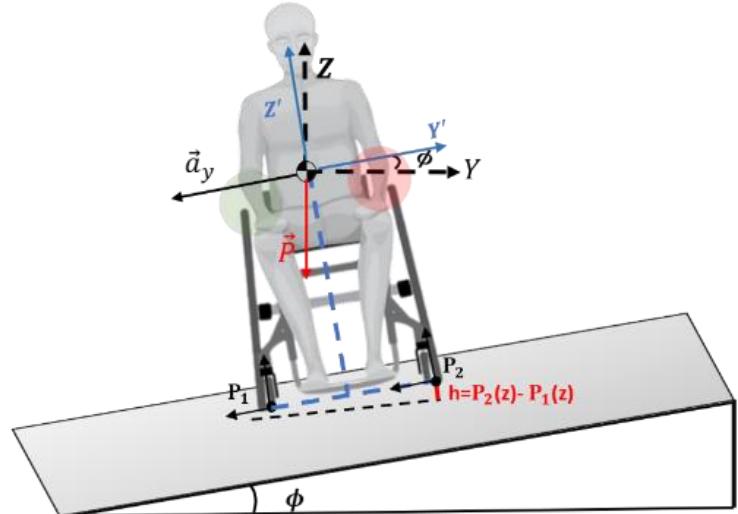
$$I_r \dot{\omega} = \tau_{hi} - \sum_{i=1}^N T(\omega)$$

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

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



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



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

Situations de locomotion :

- ❖ Ligne droite
- ❖ Virage

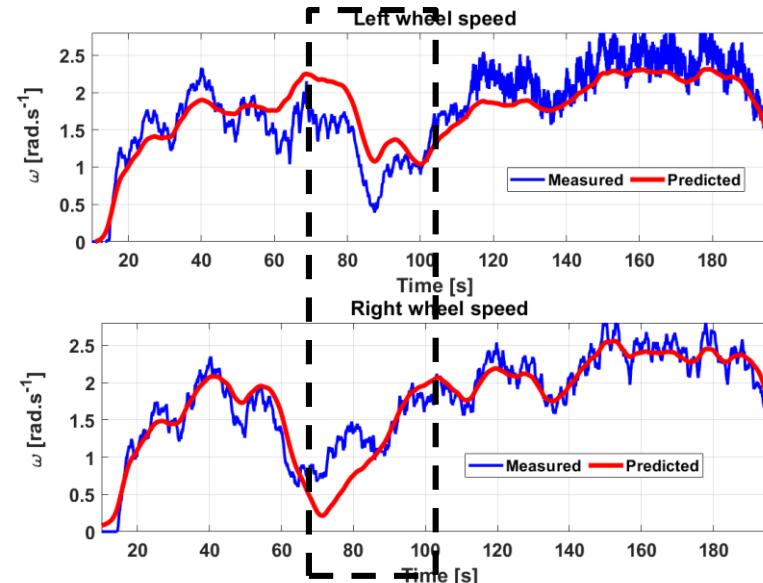
Situations de locomotion :

- ❖ Ligne droite
- ❖ Virage
- ❖ Pente

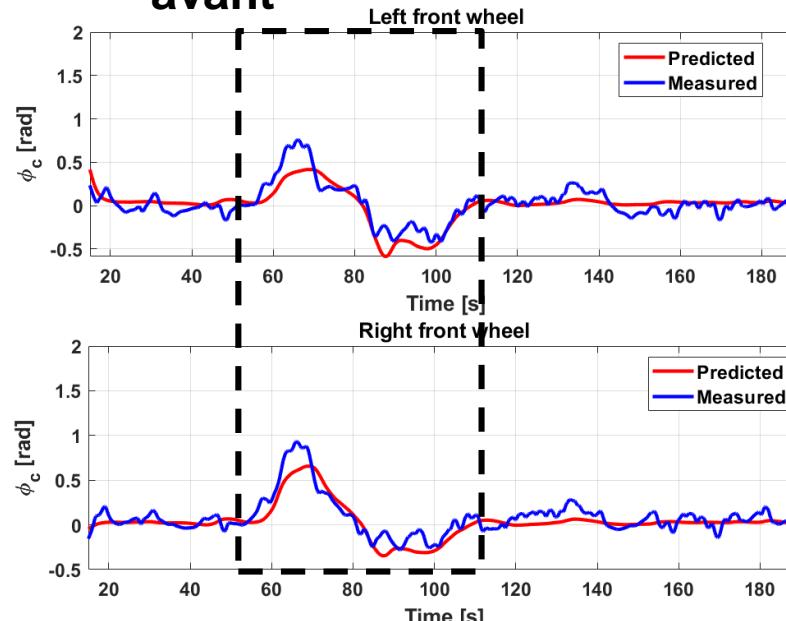
Situations de locomotion :

- ❖ Ligne droite
- ❖ Virage
- ❖ Dévers

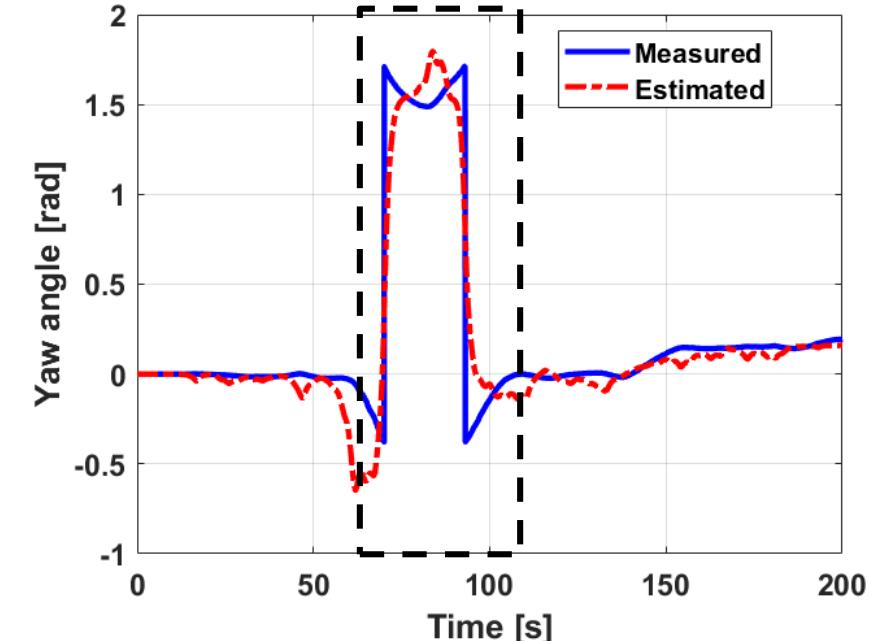
Modèle des roues arrière



Modèle des fourches avant



Modèle de lacet



Identification du modèle → Algorithme Levenberg-Marquardt-RLS

$$\text{RMSE}_L = 0,61$$

$$\text{RMSE}_R = 0,625$$

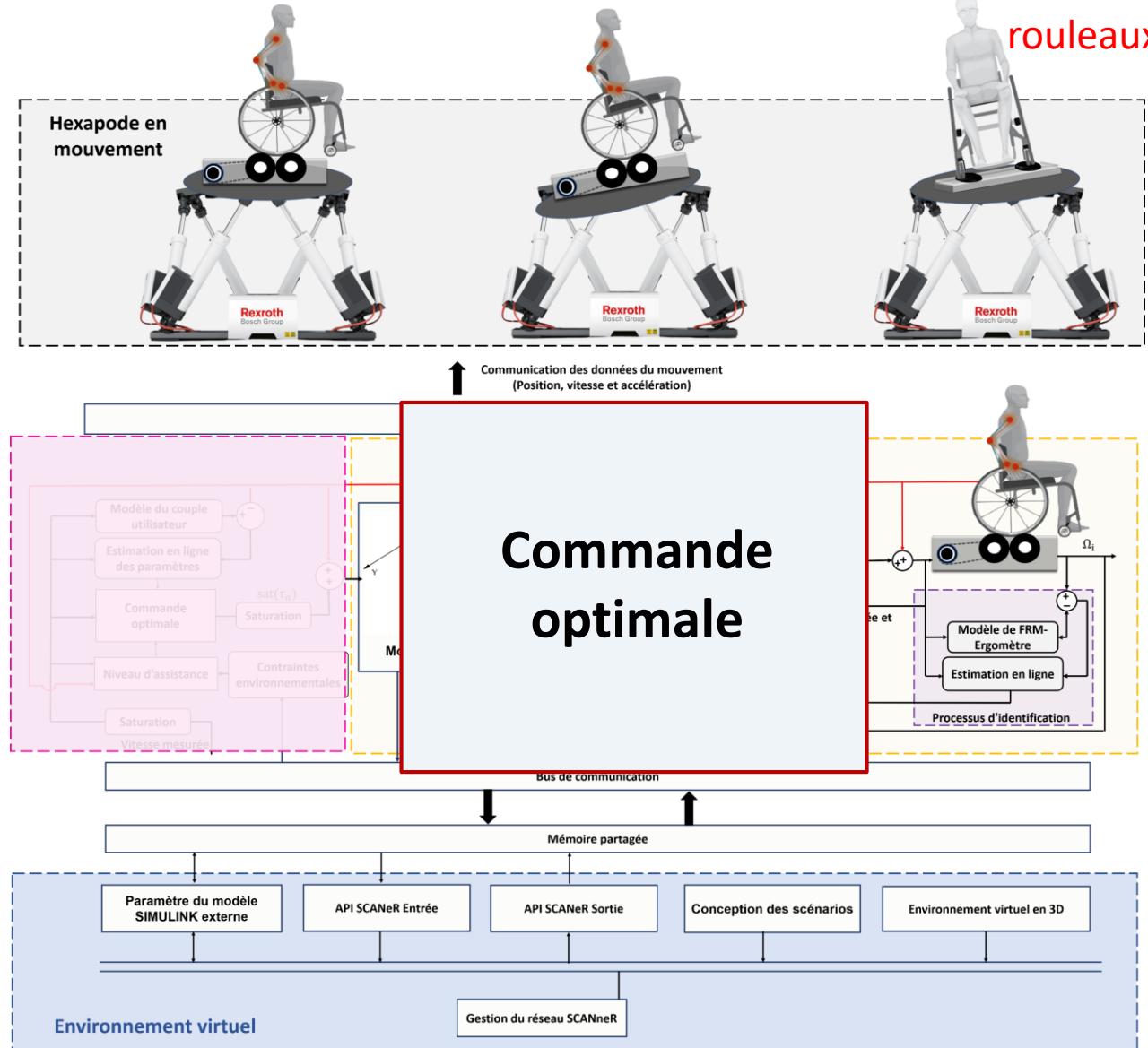
$$\text{RMSE}_L = 0,42$$

$$\text{RMSE}_R = 0,392$$

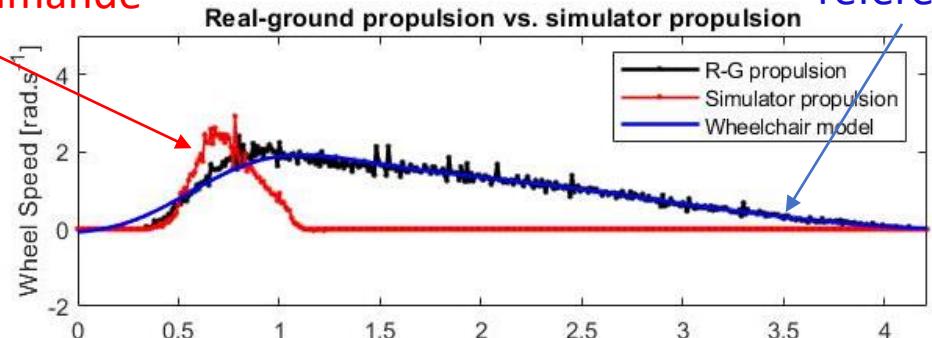
$$RMSE = 0,275$$



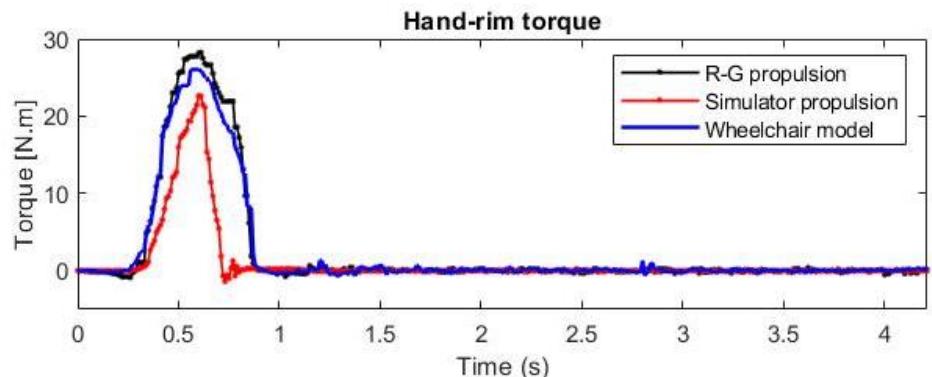
Le modèle de référence parvient à reproduire le profil des trajectoires mesurées du fauteuil roulant propulsé sur sol réel



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

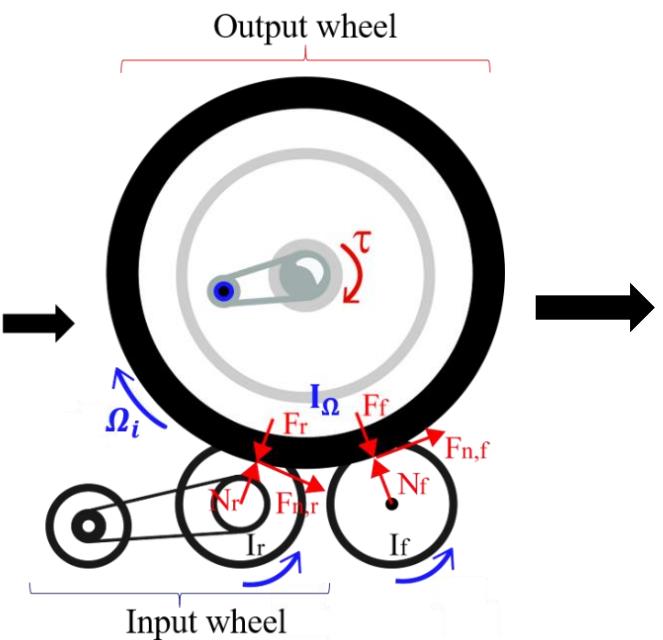


Le modèle de référence



- 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]

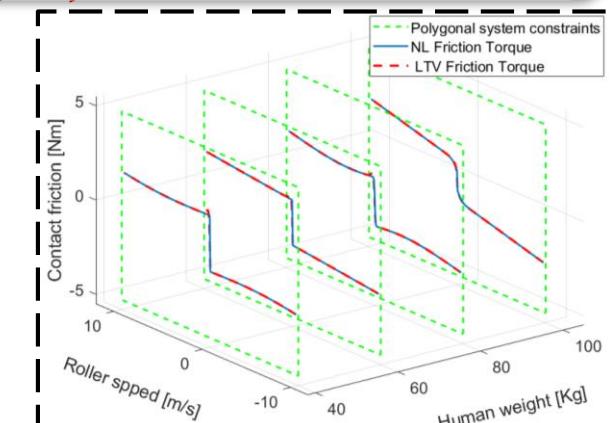


$$\int I_l \dot{\Omega}_{el}(t) - F_l(\Omega_{el}(t)) = K \text{sat}(T_{ml}(t)) + T_{hl}(t)$$

Caractéristiques de l'interaction banc à rouleaux-FRM:

- Saturations en couple d'entrée/ vitesse de sortie
- Effet ~~saturation~~ de contact rouleau-rouleau et dissipation visqueuse
- 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

$$\dot{\Omega}_i(t) = -\frac{\Theta_1(k)}{J_i} \Omega_i(t) + \frac{K}{J_i} T_i(t) + D(t)w(t)$$

$$D(t)w(t) = \frac{1}{J_i} \Theta_2(t) w(t)$$

$$y(k) = \Omega_i(k)$$

► La représentation d'état est donnée par :

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

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

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

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

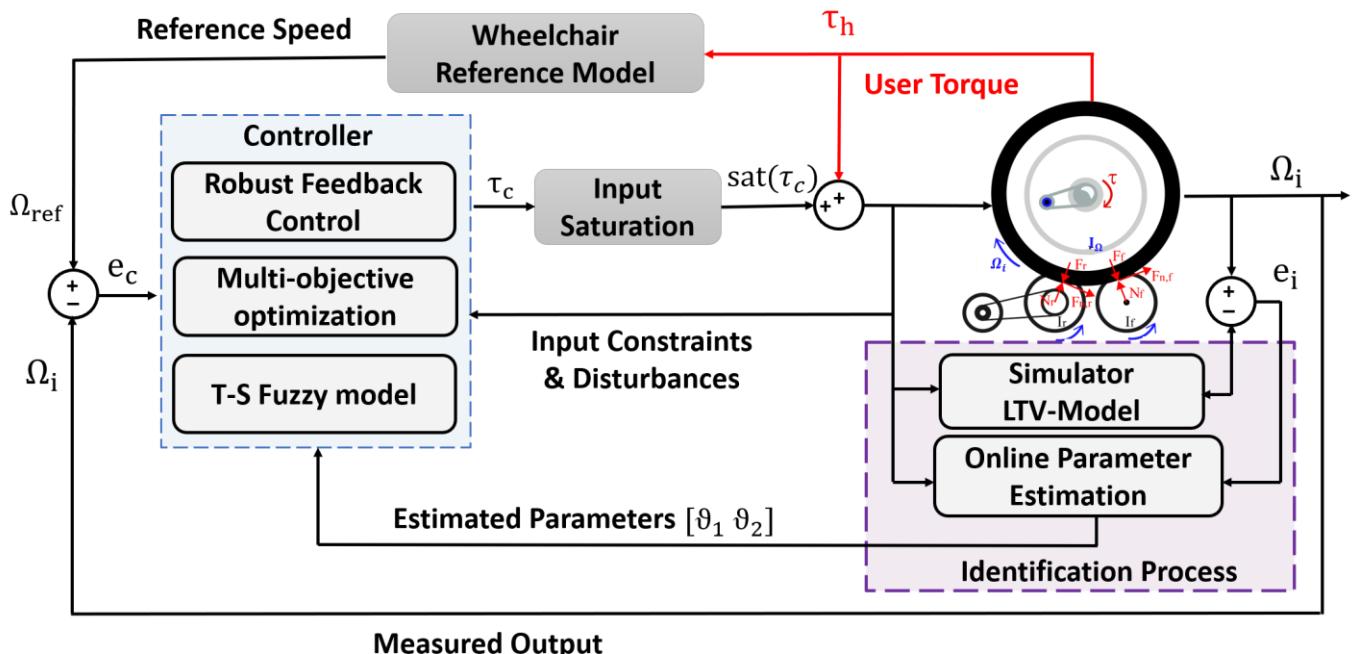
$$\sum_{i=1}^2 E_i^1(\Theta_i) = 1, \quad \text{et} \quad \sum_{i=1}^2 E_i^2(\Theta_i) = 1, \quad 0 \leq E_i^2(\Theta_i) \leq 1$$

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

$$h_1 = E_1^1 E_2^1 \quad h_2 = E_1^1 E_2^2$$

$$h_3 = E_1^2 E_2^1 \quad h_4 = E_1^2 E_2^2$$

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

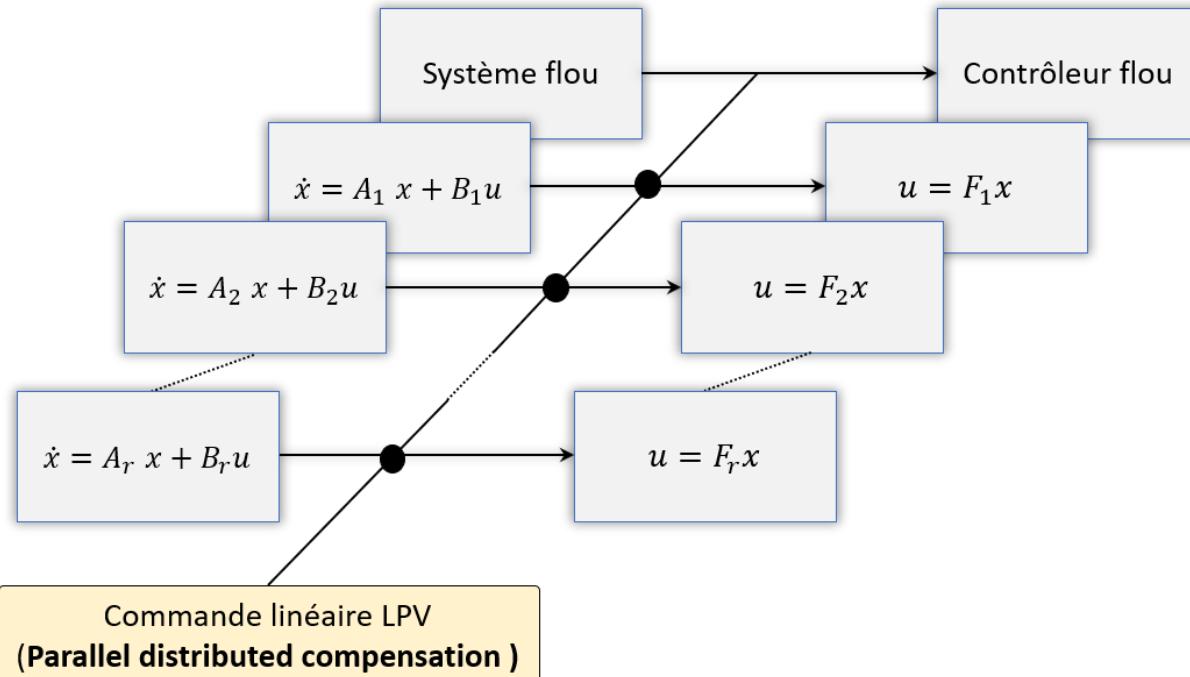
$$\mathcal{J} = \int_0^{\infty} (e^T(t) Q e(t) + u^T(t) R u(t)) dt$$

- Commande PDC (Parallel Distributed Compensation)

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



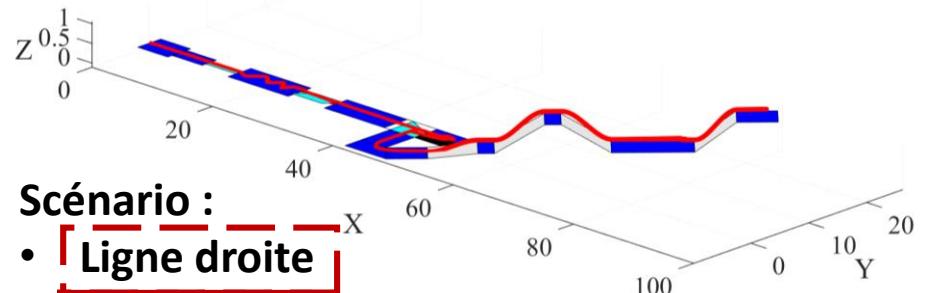
$$\begin{bmatrix} H e(A_i X - B M_i) & X^T & M_i^T & D_i \\ * & Q^{-1} & 0 & 0 \\ * & * & R^{-1} & 0 \\ * & * 0 & -\sigma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad \begin{bmatrix} 1 & x(0)^T \\ x(0) & X \end{bmatrix} \geq 0 \quad \begin{bmatrix} X & M_i^T \\ M_i & u_{max}^2 I \end{bmatrix} \geq 0$$



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

Commande haptique : Approche TS-LPV

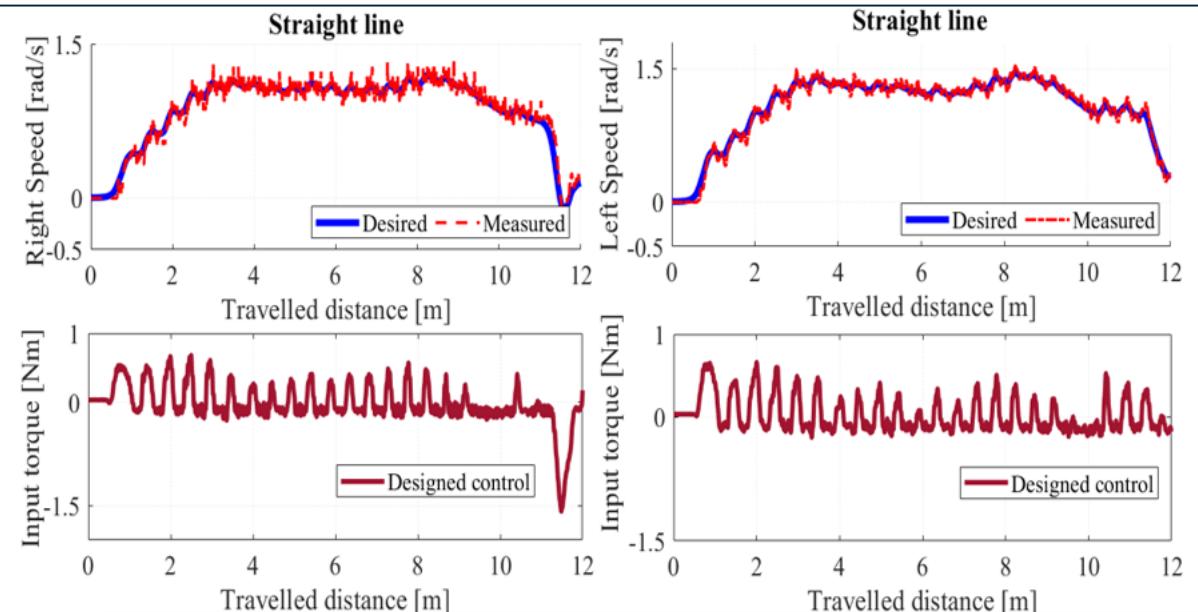


(a) Ligne droite

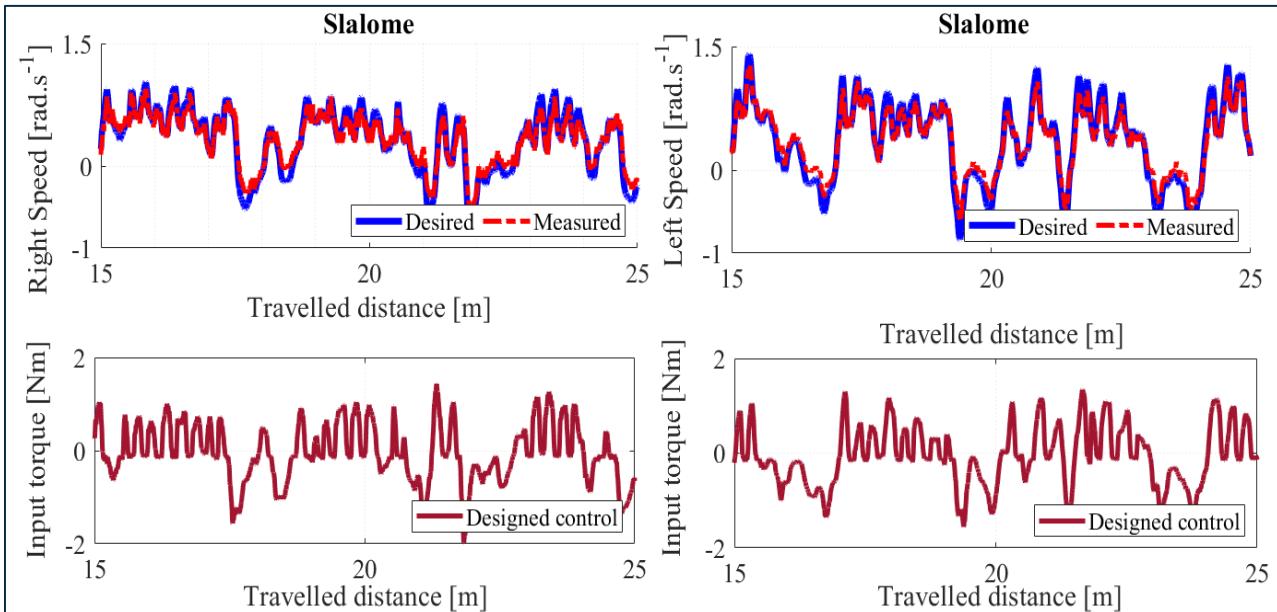


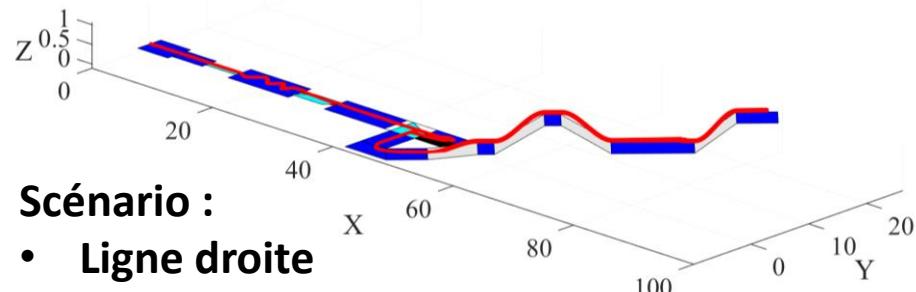
(b) Virage

Déplacement en ligne droite



Déplacement en slalom





- Scénario :**
- Ligne droite
 - Virage
 - Pente
 - Dévers

Déplacement en pente

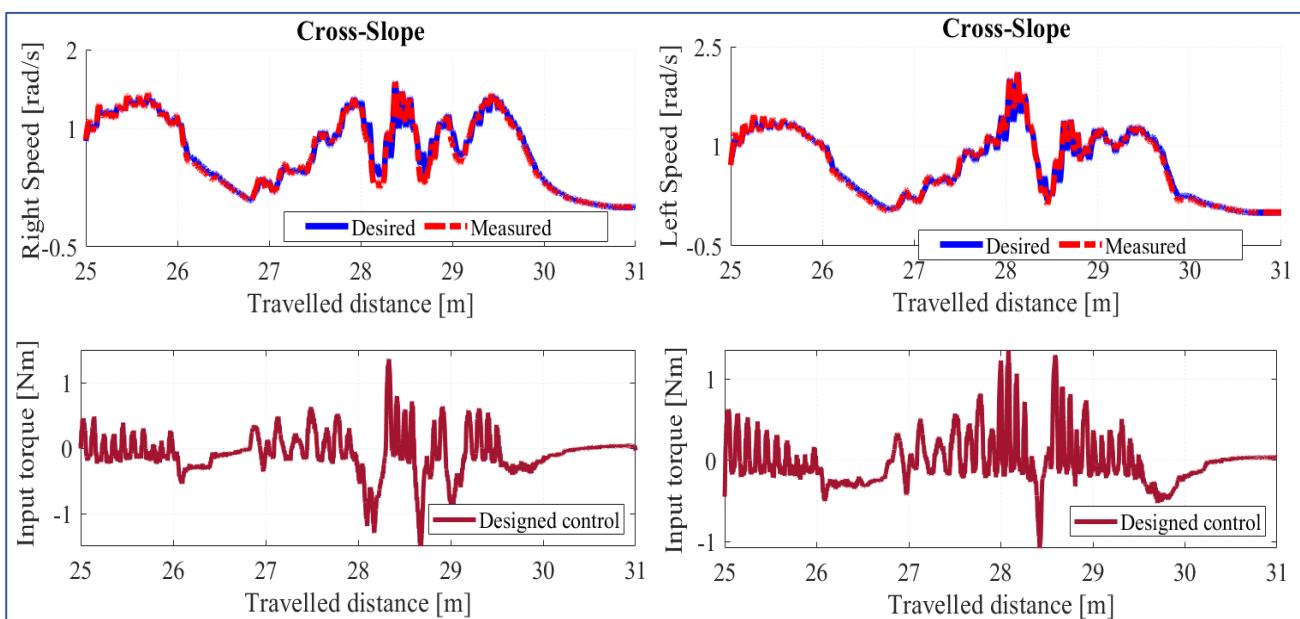
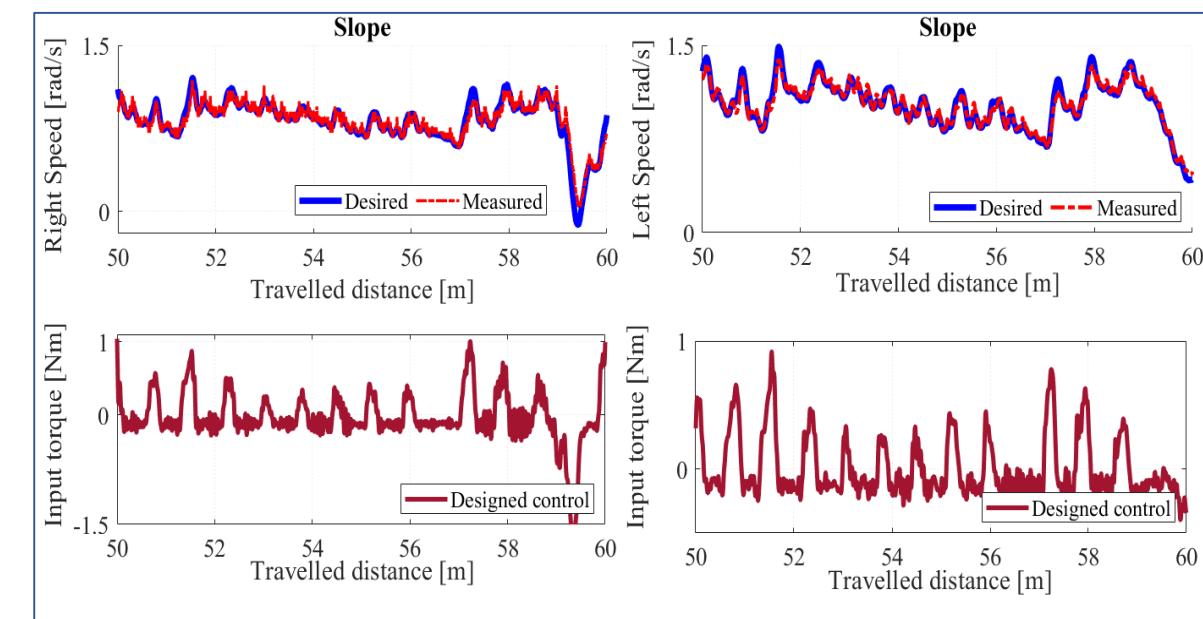


(c) Pente

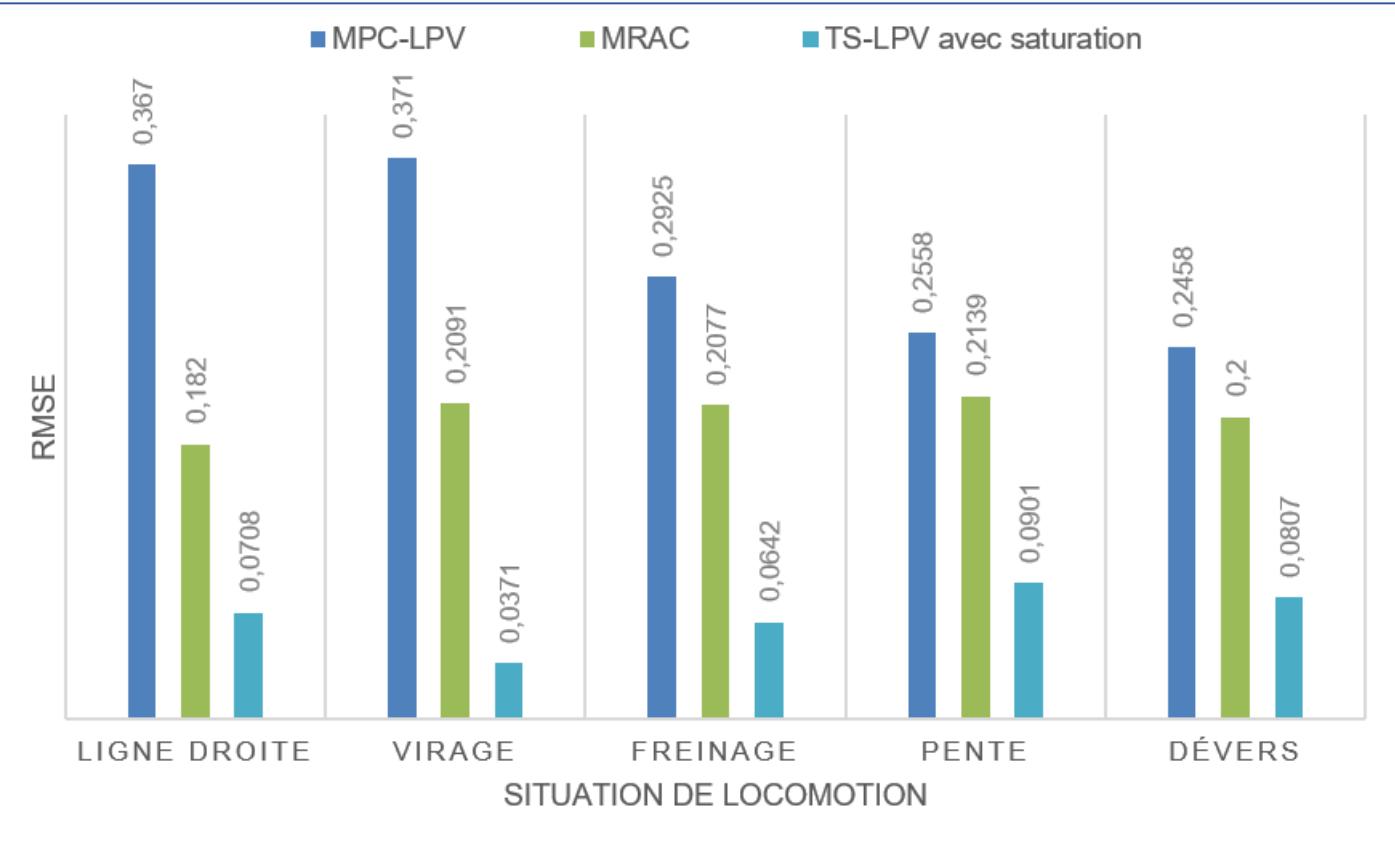
Déplacement en dévers



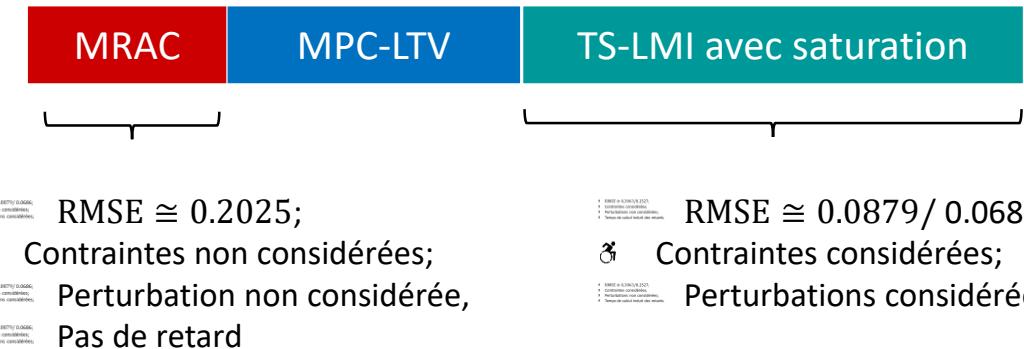
(d) Dévers



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.





Compagnes expérimentales

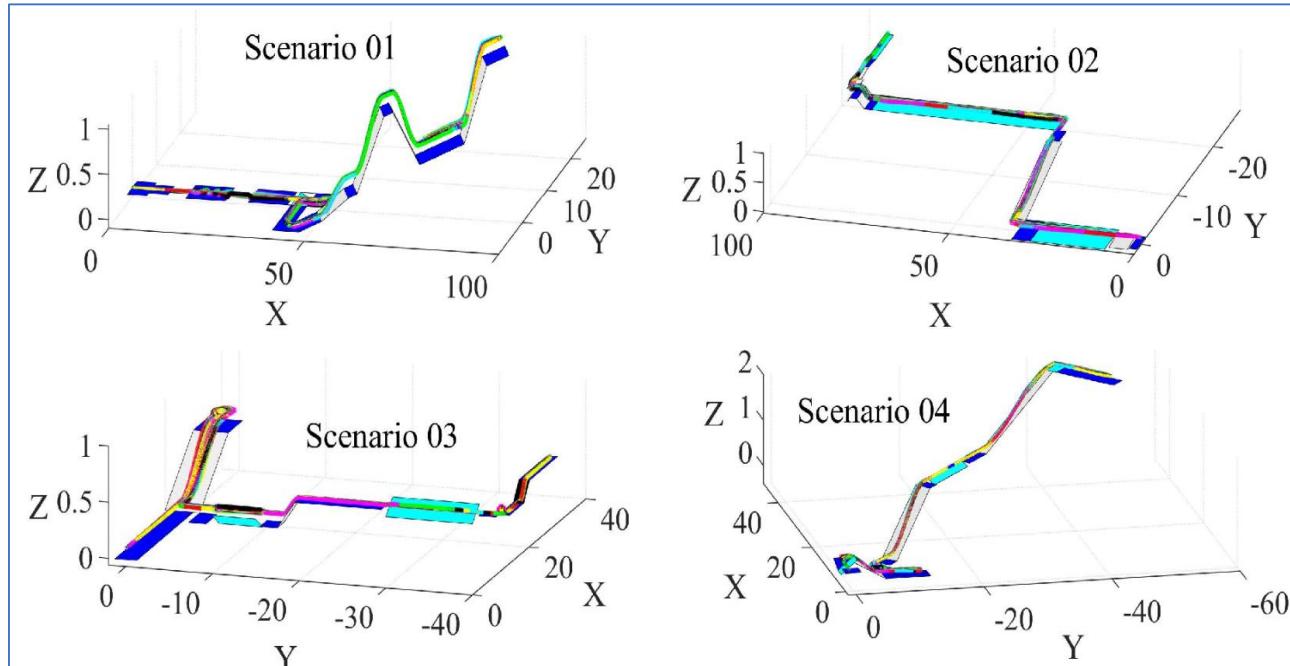
3 **18 sujets :**

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

3 **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]

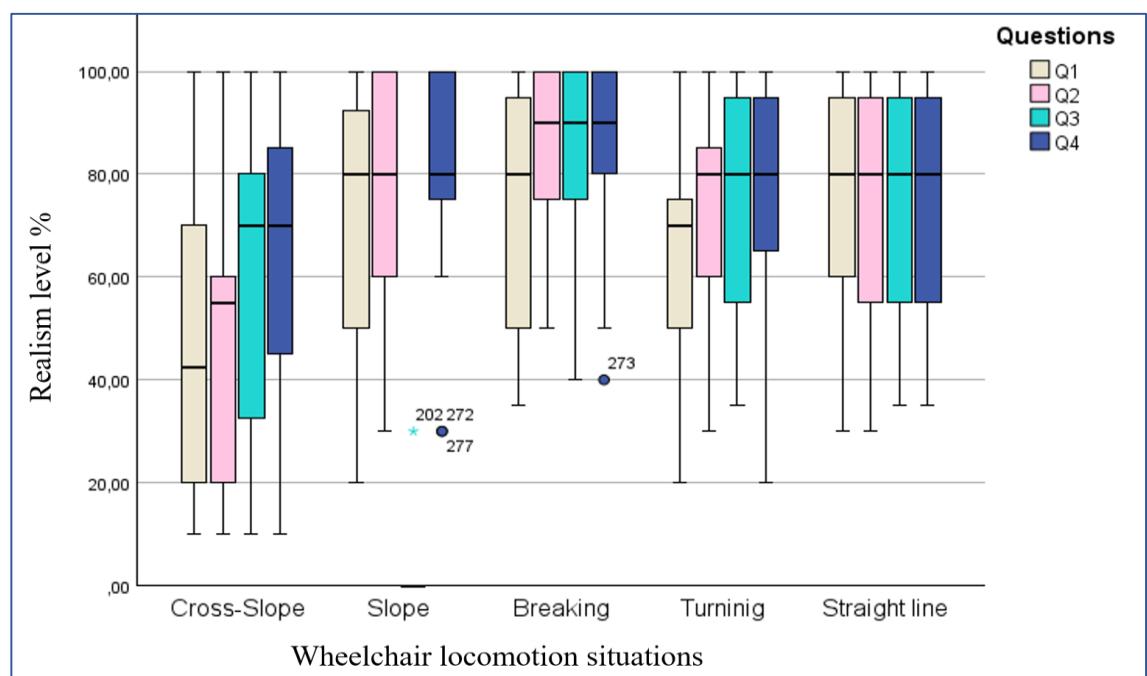
4 Scénarios de locomotion, chaque scenario comporte:

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

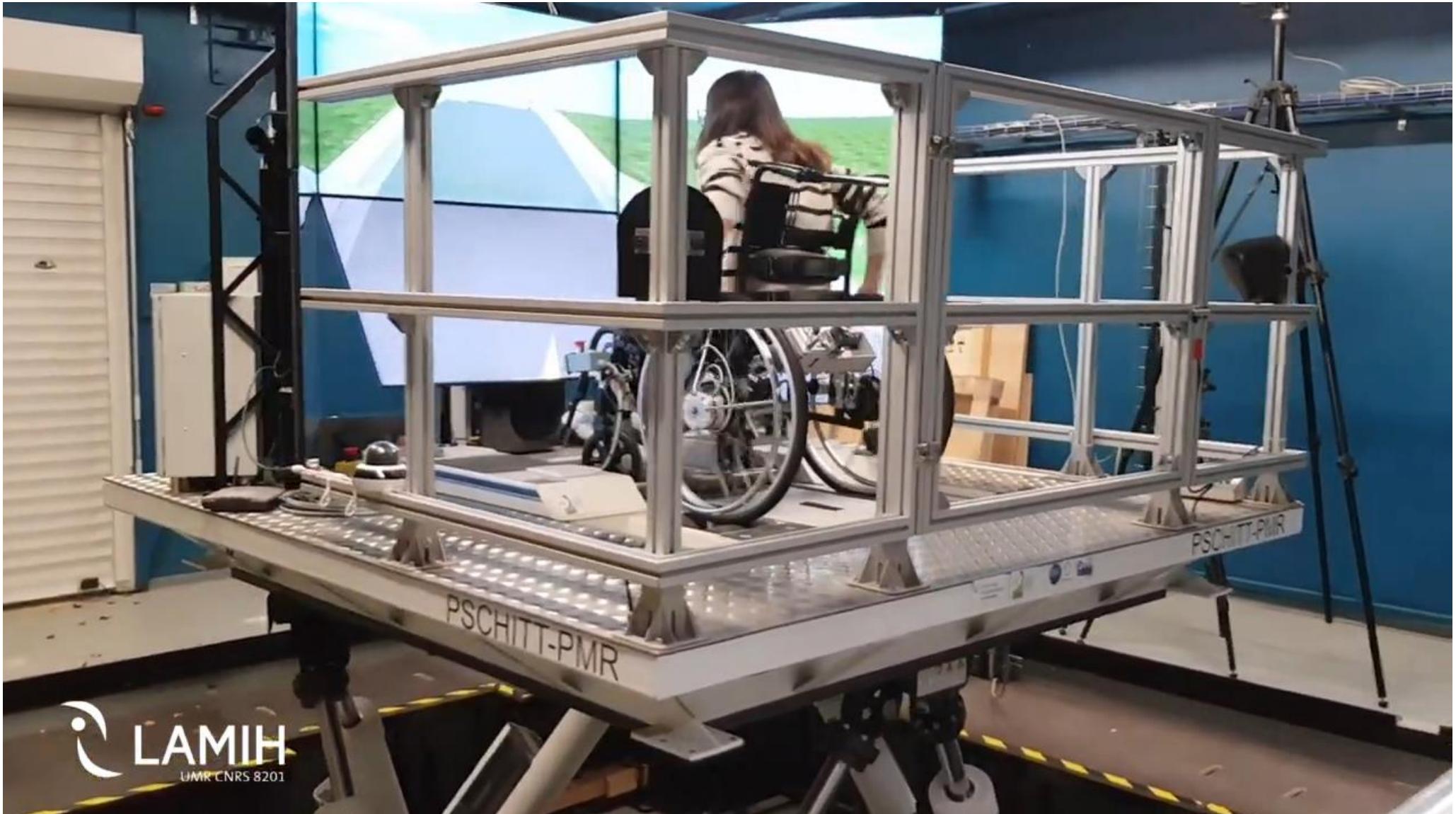
Quatre questions:

- 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 ?

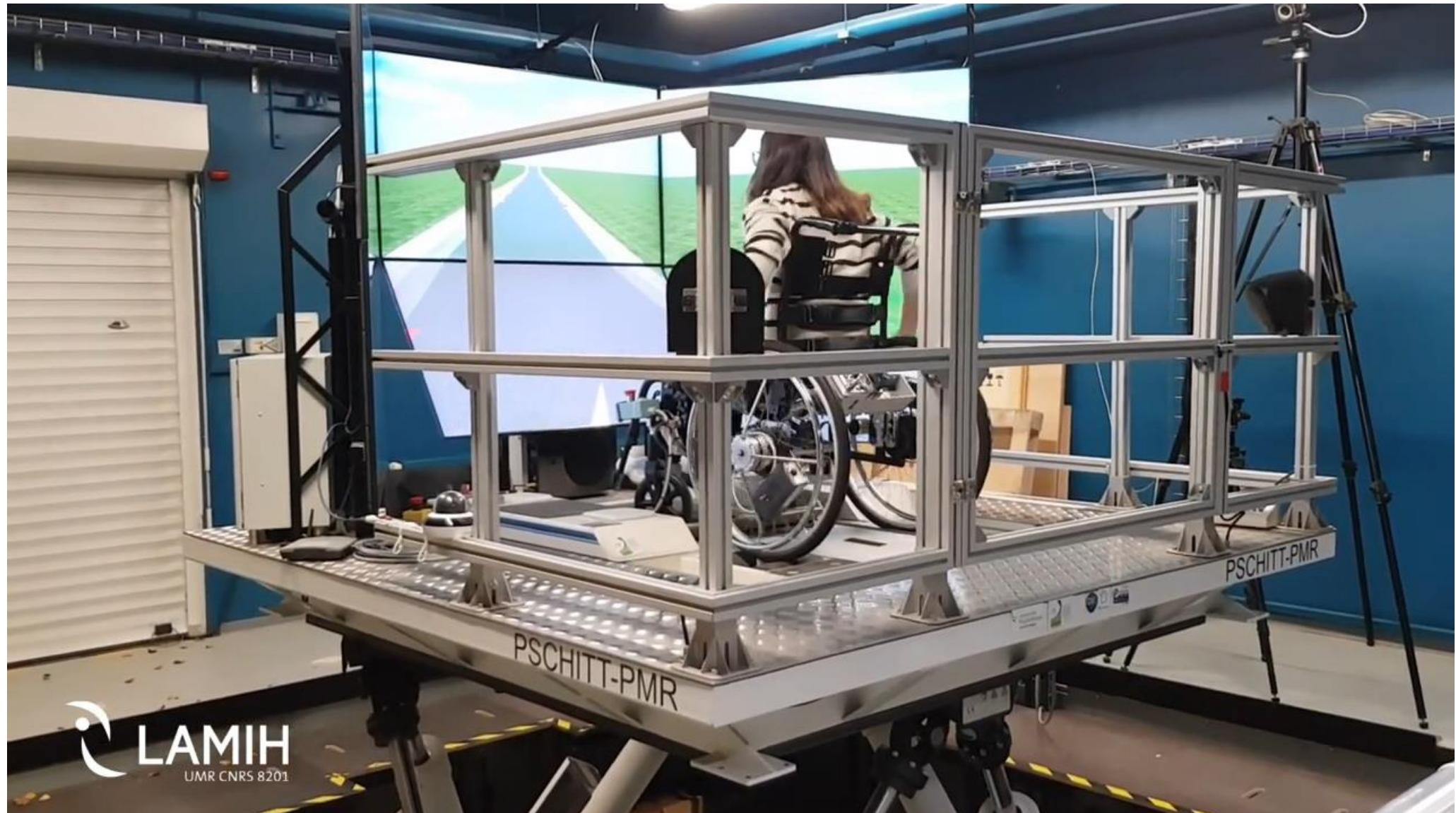
Evaluation subjective sur le réalisme



Vidéo de démonstration (Pente et virage)



Vidéo de démonstration (dévers)



Système d'assistance

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

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

► 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'usager

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