



# **Réalisation d'un simulateur dynamique en réalité virtuelle pour évaluer la locomotion en FRM dans un environnement contrôlé**

## **Plateforme PSCHITT-PMR**

*Plateforme de Simulation Collaborative Hybride, Intermodale en Transport Terrestre*

**C. Sentouh**

**LAMIH, Université Polytechnique Hauts-de-France**

**[Chouki.Sentouh@uphf.fr](mailto:Chouki.Sentouh@uphf.fr)**

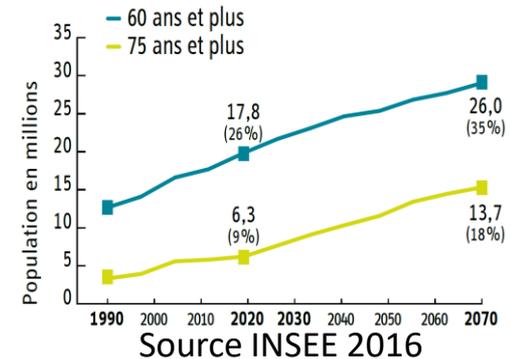
*G. Conreur, T. Poulain, T. Nguyen, T. Bentaleb, P. Pudlo*

# Contexte : Aide à la mobilité des PMR



- D'après l'INSEE, parmi les personnes touchés par un handicap, **850 000** ont une mobilité réduite
  - **2 à 3% de la population utilise un fauteuil roulant**
- Le déplacement en FRM est une activité induisant une surutilisation des membres supérieurs, souvent accompagnée par des capacités musculaires réduites des individus.
  - **Les troubles musculo squelettiques (TMS)**
- Problème d'accessibilité aux bâtiments
  - Lorsque ce **coût biomécanique** est trop important en regard des capacités du sujet, l'objectif devient inaccessible
  - situations variées

→ **Grandes difficultés à quantifier le coût biomécanique pour évaluer le niveau d'accessibilité d'un bâtiment ou d'un itinéraire**





- Fauteuil roulant électrique :
  - Personnes handicapées moteurs (ou PMR) ont pu remédier à leur handicap de mobilité.
- Certaines personnes (40% des patients)
  - Déficiences motrices qui impactent la précision et la coordination des mouvements des membres supérieurs
  - Dégradation de la qualité du contrôle moteur

→ **Grandes difficultés à exécuter des manœuvres de direction**



Tablet Control Omni

Dispositif d'entrée proportionnel



Compact Joystick  
Omni Light



Commande  
occipitale

**Projet ELSAT 2020**

# Objectifs



- Nécessité d'apporter une réponse spécifique aux divers handicaps sous forme de systèmes d'aide (ex : adapter les fauteuils ou les manipulateurs de commande, développer des systèmes « d'aide à la navigation »...)
- Evaluation des aménagements et développement de technologies d'assistance
- Thématiques scientifiques :
  - L'automatique : définition de stratégies de contrôle commande intégrées aux assistances, définition des modes de coopération entre l'utilisateur et l'assistance, par exemple les stratégies de partage du contrôle
  - Biomécanique : développement de critères biomécaniques d'évaluation des systèmes d'assistance et de quantification du coût biomécanique
  - Psychologie cognitive et ergonomie : évaluation de l'acceptabilité des systèmes d'assistance

➔ Ces objectifs nécessitent dans un premier temps l'accès à des variables spécifiques et un contrôle complet de l'environnement qui ne peuvent s'envisager que dans un contexte de simulation

**Comment simuler la locomotion en fauteuil roulant de manière réaliste, reproductible et contrôlée ?**

# Objectifs : Simulateur FRM/FRE



Mise en œuvre d'équipements scientifiques communs regroupés au sein de la **plateforme PSCHITT-PMR**

- **Simulation des déplacements en FRM** au plus proche de la réalité (Comportement dynamique : gestion des roues pivotantes, gestion des frottements, pente, dévers, etc.)
- **Niveau de réalisme acceptable** pour l'étude de situations de motricité en fauteuil roulant variées et contrôlées (haptique, dynamique et immersif)

## Les situations à reproduire

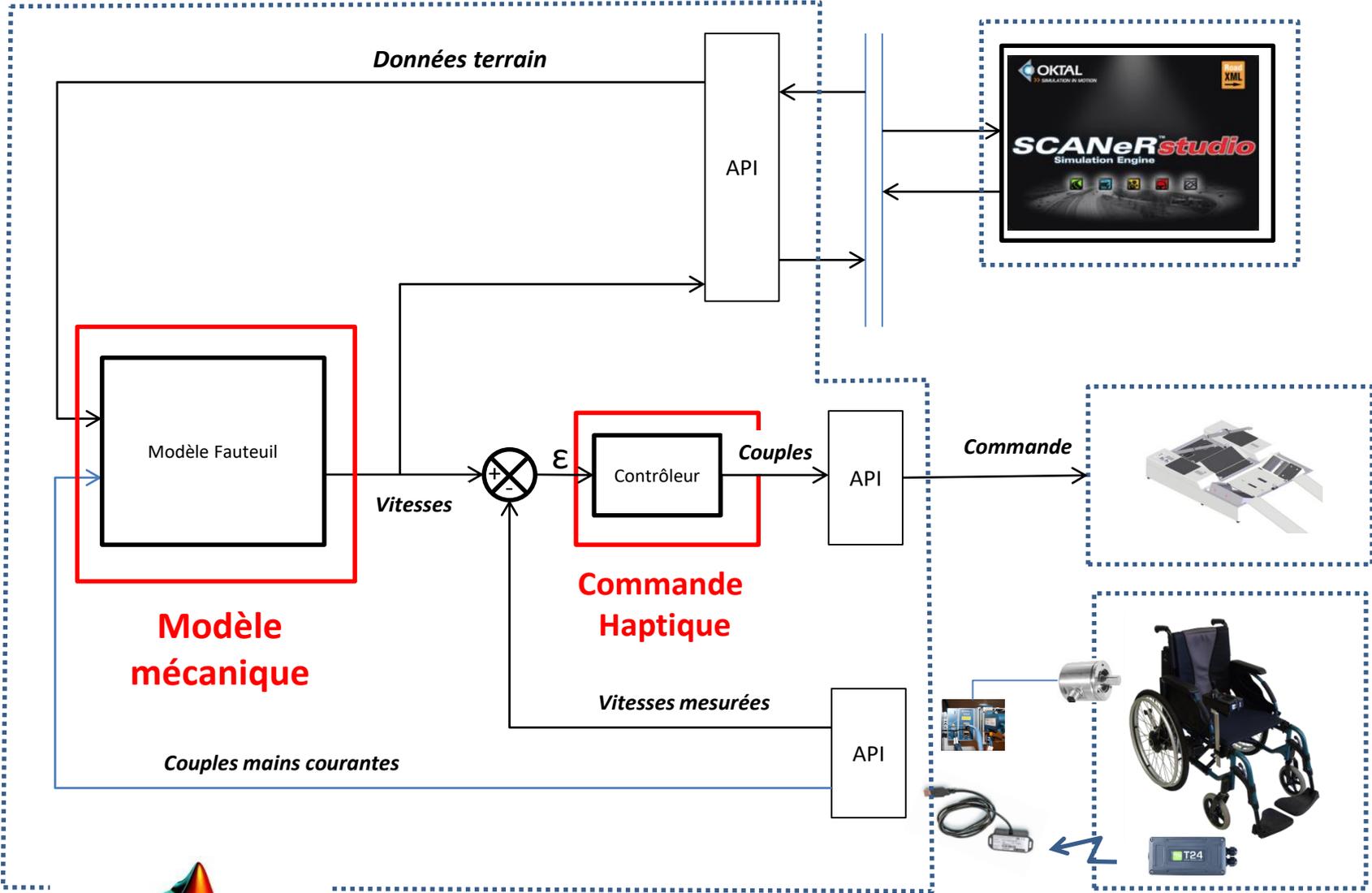
- Déplacement rectilignes et curvilignes (Avancer / reculer)
- Sol plan avec divers niveaux d'inclinaison (horizontal, pente, dévers)
- Sol avec différents revêtements (adhérence)
- Sol non plan / terrain accidentés
- Déplacement intérieur





# *Architecture de la plateforme*

# PSCHITT- PMR : Architecture générale

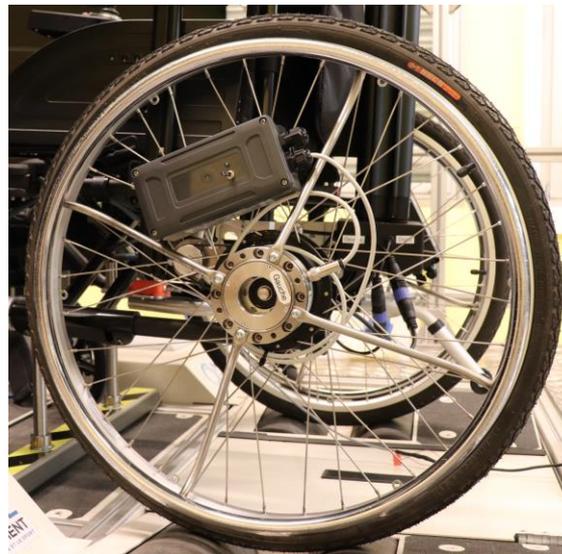
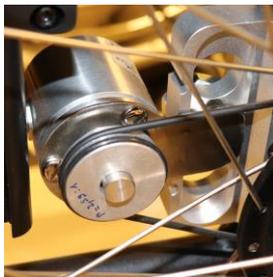




## Matériel

- Fauteuil « électrique » utilisé en mode manuel (AutoNomad)
- Réalisation des mains courantes reliées à des couplemètres
- Installation de codeurs (vitesses des roues)

### Codeurs



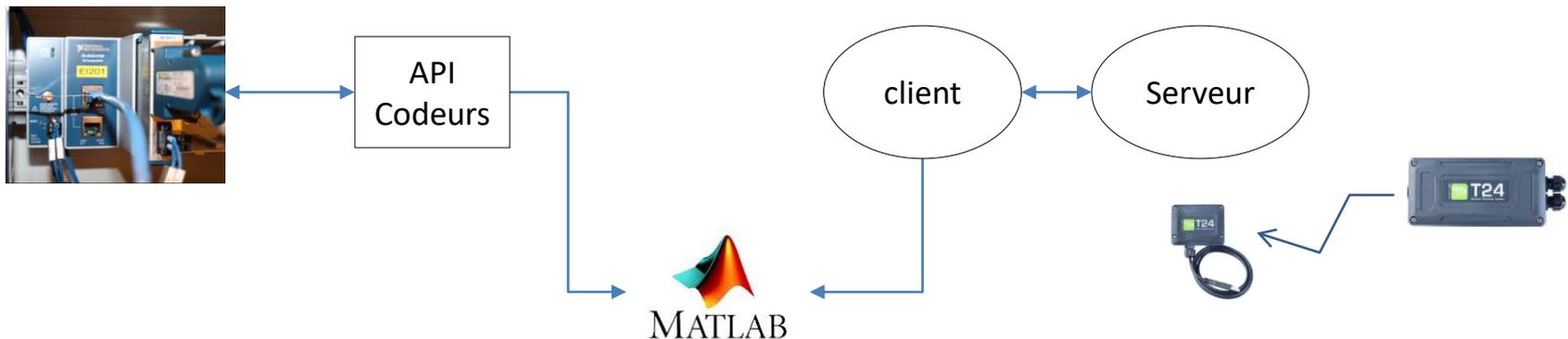
### couplemètres





## Logiciel

- Couplemètres
  - Utilisation de modules radio et réalisation d'une application autonome pour récupérer les valeurs de couples (serveur)
  - Réalisation d'un client Matlab
- Codeurs
  - Utilisation de cartes National Instruments (connexion filaire)
  - Réalisation d'une API Matlab





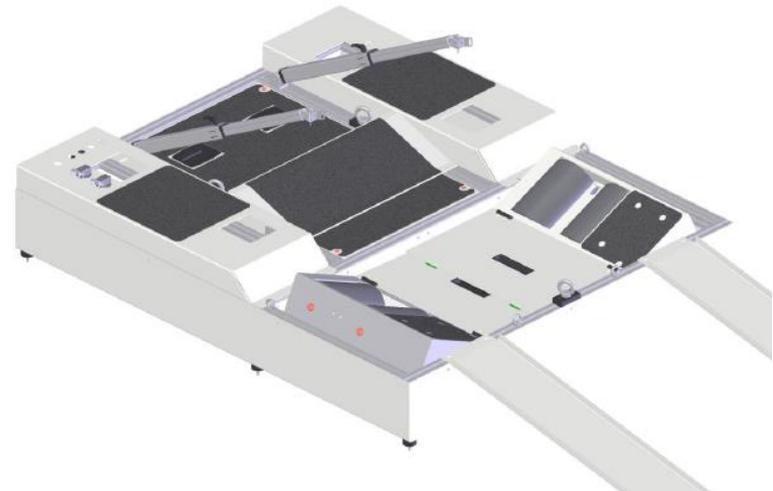
- Le Fauteuil pourra être utilisé hors plateforme pour :
  - La mise au point du modèle fauteuil
  - L'acquisition :
    - des couples aux mains courantes
    - des vitesses des roues arrière
    - des données issues de la centrale inertielle
  - Enregistrements sous Matlab



Centrale inertielle



- Conception d'un nouveau système de fixation du fauteuil
- Réalisation de l'API Matlab pour
  - Gérer les modes de marches
  - Piloter en couple les rouleaux



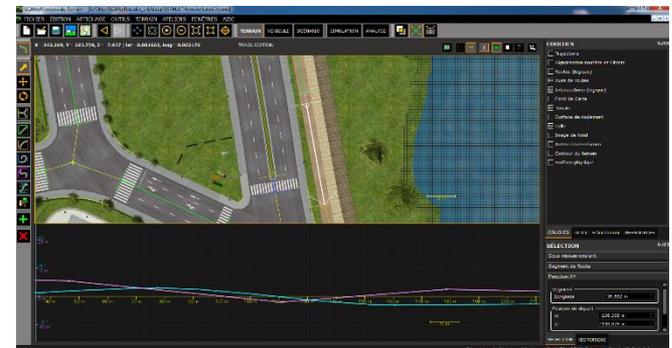


- 6 écrans embarqués, full HD.
- Champs visuel
  - Horizontal : 170 °
  - Vertical : 65 °





- SCANeR™ studio
  - Utilisé principalement pour
    - Simuler le déplacement dans un monde virtuel
    - Récupérer des infos terrains du monde virtuel (pente, dévers, rayon de courbures...)
  - Modélisation d'un fauteuil au sens SCANeR (Callas)
    - Le fauteuil est considéré comme une voiture
  - Réalisation d'un module logiciel assurant l'interface entre le modèle fauteuil et SCANeR



Editeur de terrain



- **Terrain** : Edition de base de données 3D
- **Véhicule** : Edition du véhicule EGO et/ou trafic
- **Scénario** : Définition des scénarii trafic/environnement/etc.
- **Simulation** : Exécution d'une simulation
- **Analyse** : Rejeu/analyse des données enregistrées

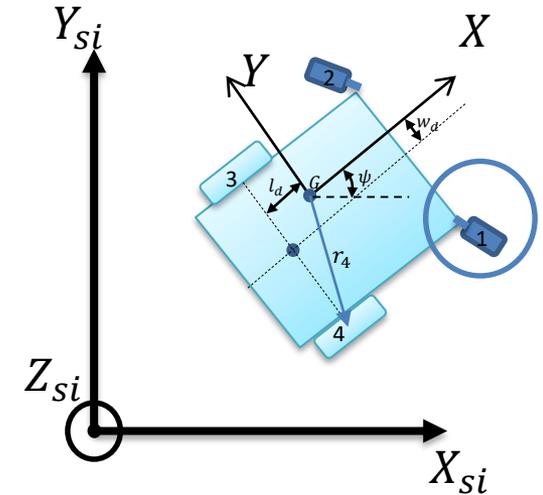


# ***Modélisation dynamique du FRM***

# Modèle dynamique du FRM



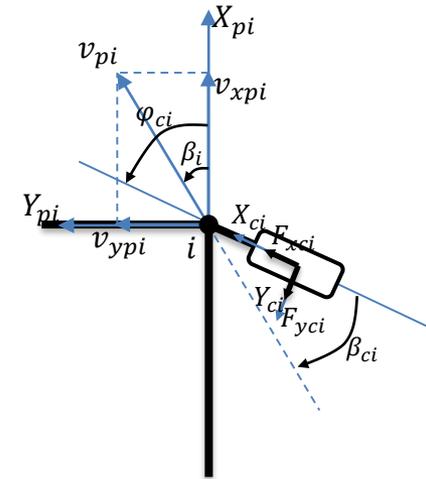
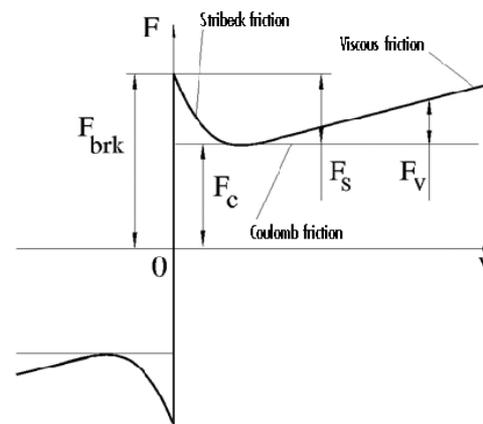
$$\left\{ \begin{array}{l} m\dot{v}_x = m\omega v_y + \sum_{i=3,4} F_{xi} + \sum_{i=1,2} F_{xpi} + F_{xP} \\ m\dot{v}_y = -m\omega v_x + \sum_{i=3,4} F_{yi} + \sum_{i=1,2} F_{ypi} + F_{yP} \\ I_z \ddot{\psi} = \sum_{i=3,4} \vec{F}_{xi} \times \vec{r}_i + \sum_{i=3,4} \vec{F}_{yi} \times \vec{r}_i - T_{turning.resistance} \\ J_i \dot{\omega}_i = T_i - F_{xi} R_r - T_{rotating.resistance} \quad (i = 1 - 4) \\ J_{ci} \dot{\varphi}_{ci} = F_{y_{ci}} d_c - \beta_{vc} \omega_{ci} + F_{P_{ciy}} d_c \quad (i = 1,2) \end{array} \right.$$



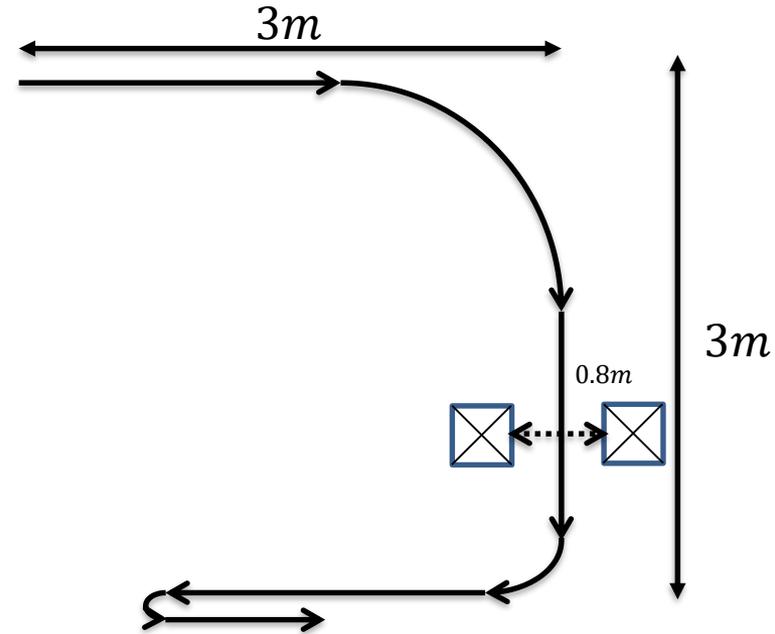
$$T_{turning.resistance} = f(\omega_i, \beta, \psi) \cdot T_{friction.turn}$$

$$T_{rotating.resistance} = f(\omega_i) \cdot T_{friction.rot}$$

$$T_{friction} = \frac{\sqrt{2e}(F_{brk} - F_c) e^{-\left(\frac{v}{v_{st}}\right)^2} v}{v_{st}} + F_c \tanh\left(\frac{v}{v_{Coul}}\right) + fv$$



# Validation du model dynamique du FRM

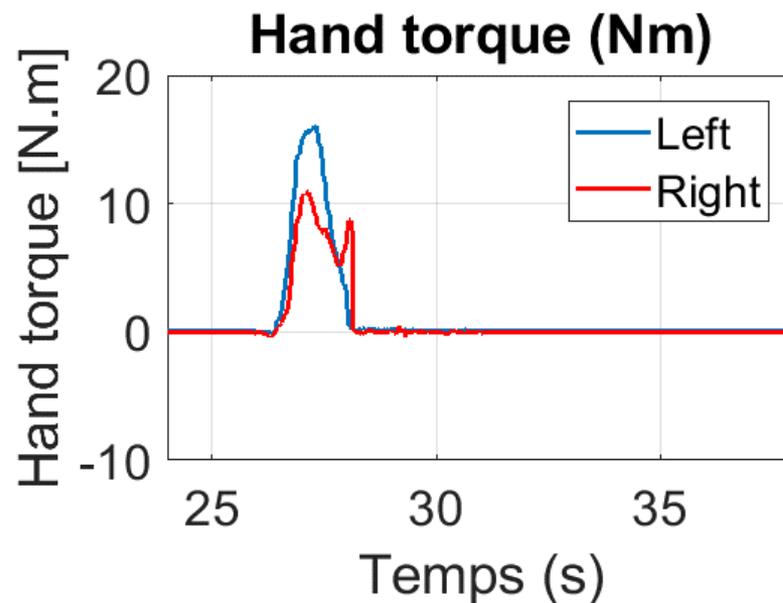
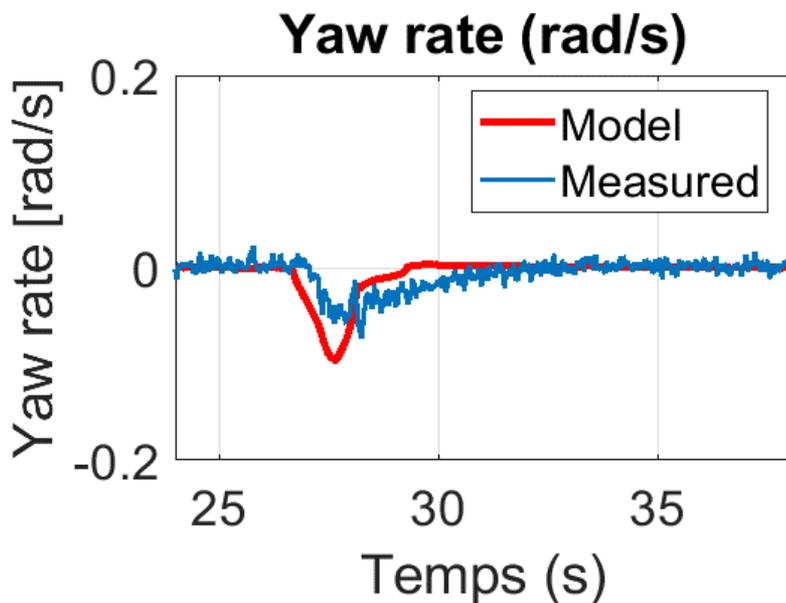
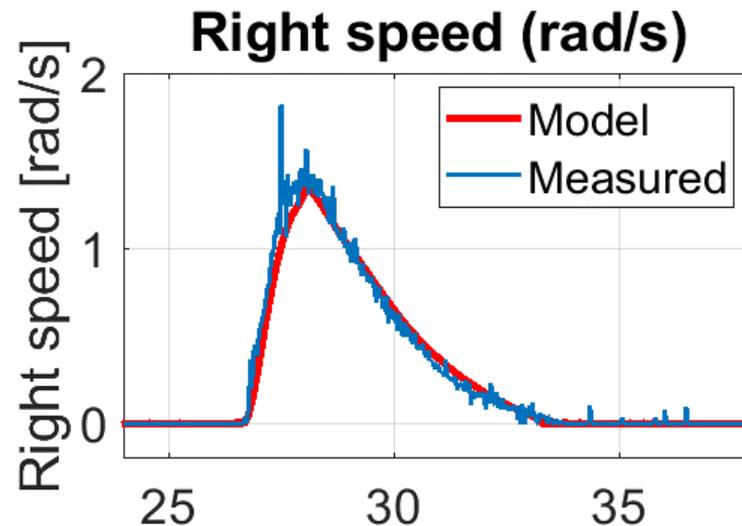
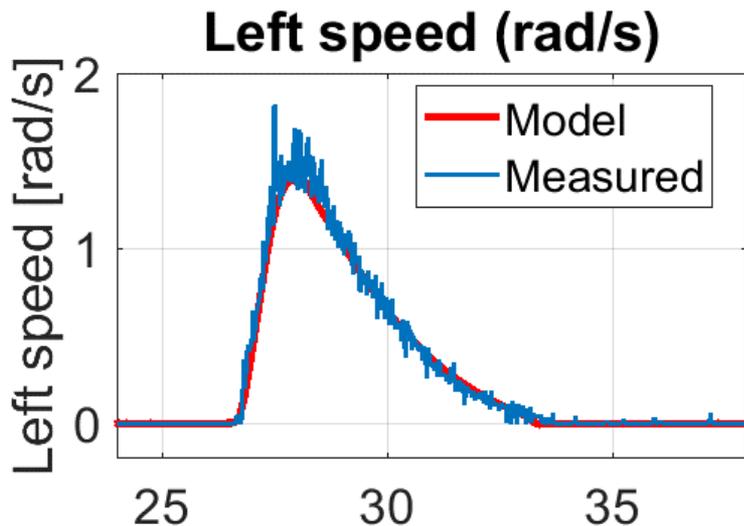


Experiment setup

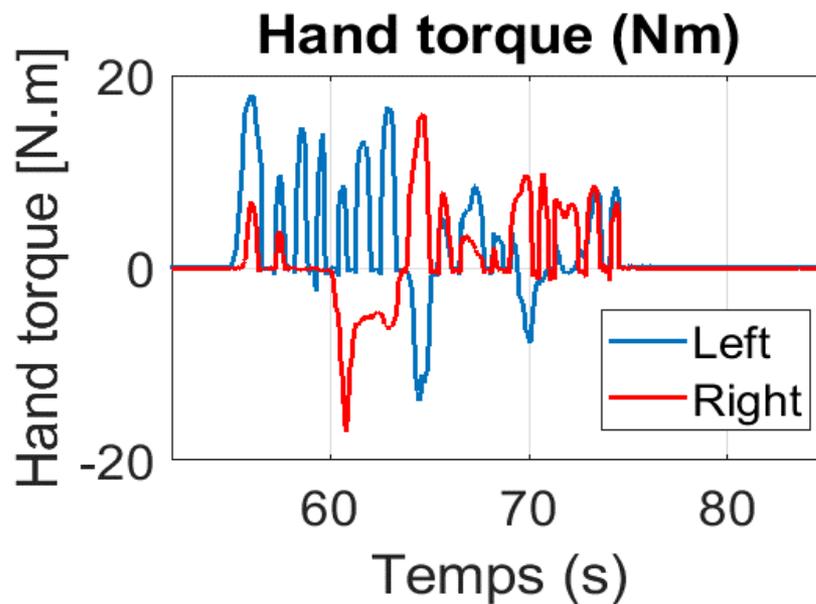
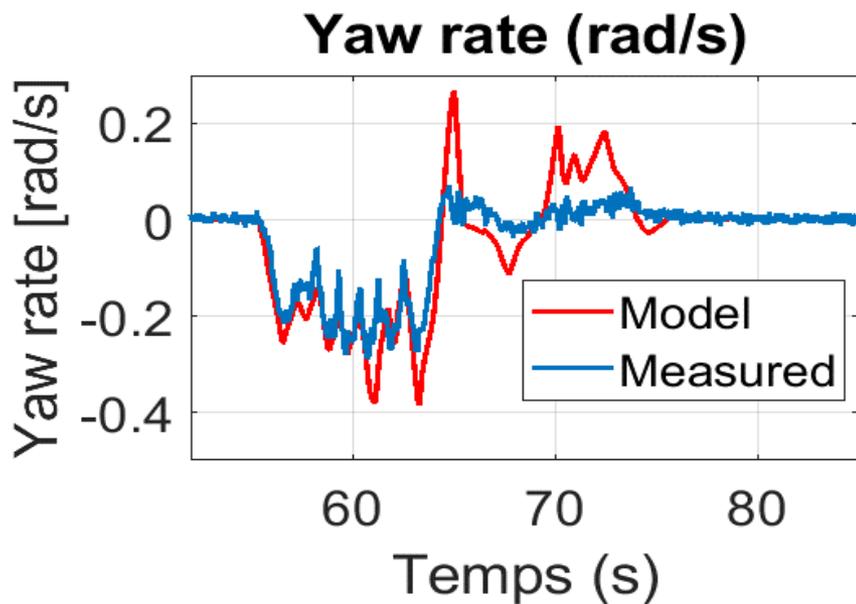
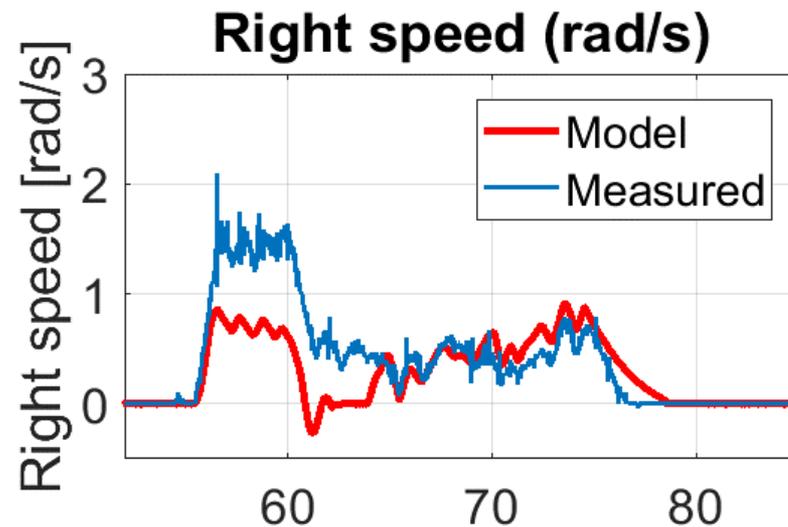
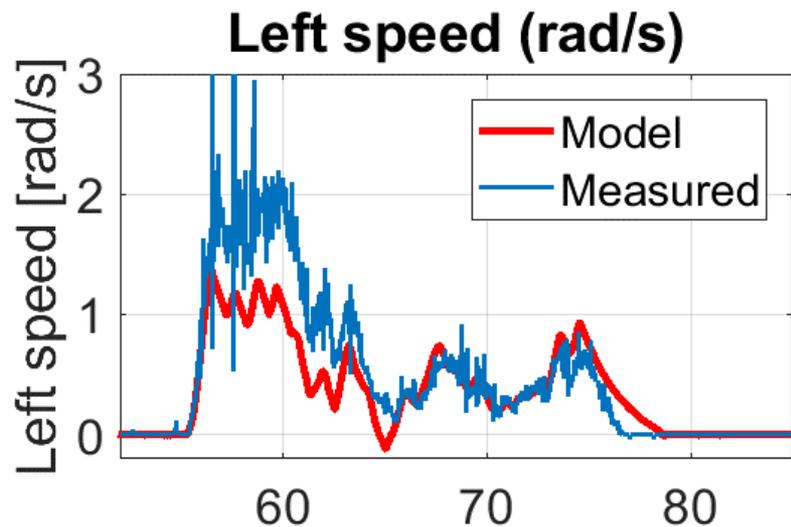
## Mesures

- Vitesses de rotation des roues gauche/droite (Encodeurs)
- Couple main courante (Couplemètres)
- Vitesse de lacet
- Angle d'orientation

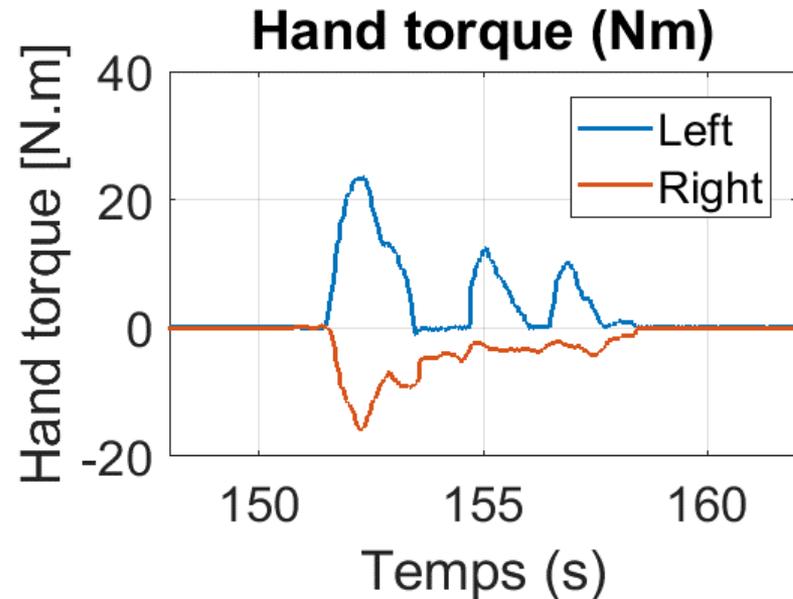
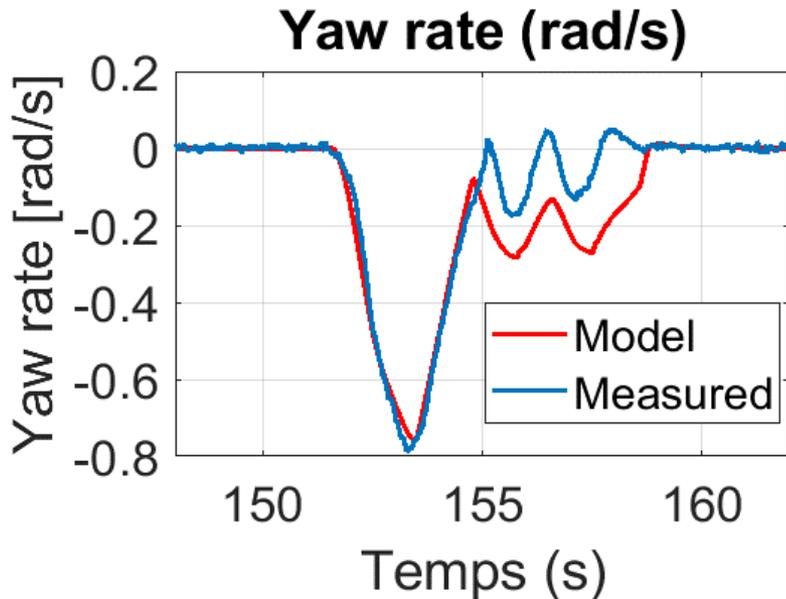
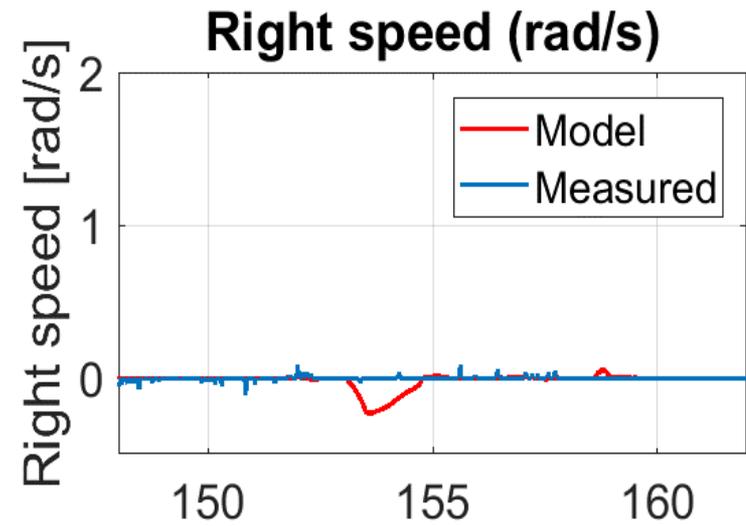
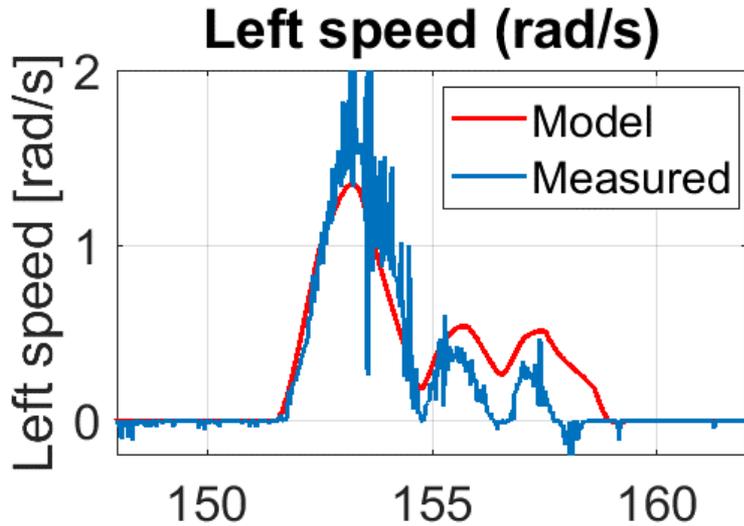
# Cas 1 – Test en ligne droite



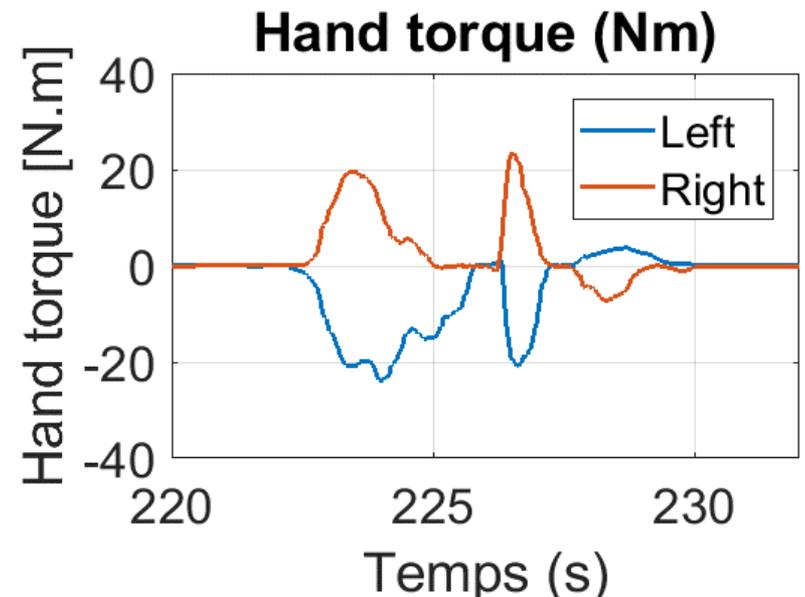
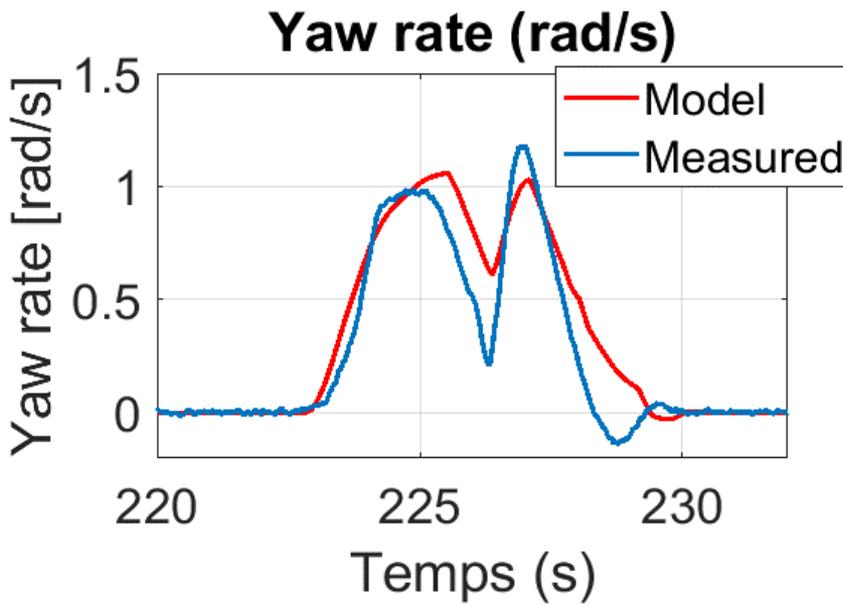
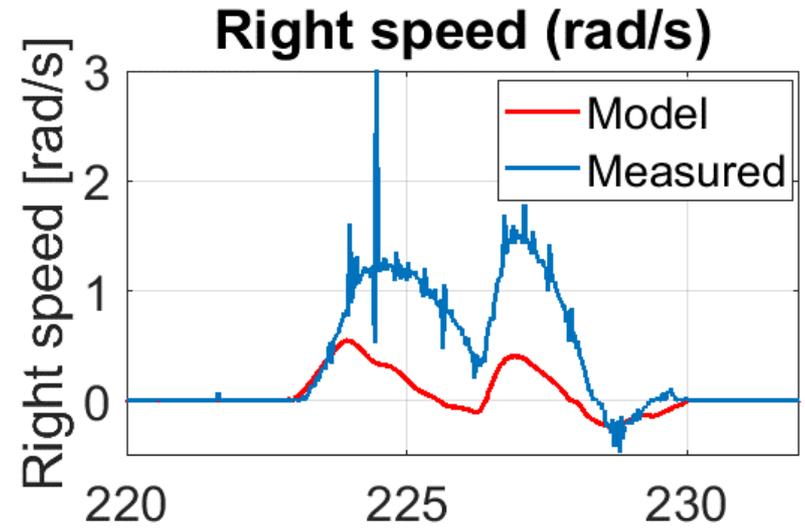
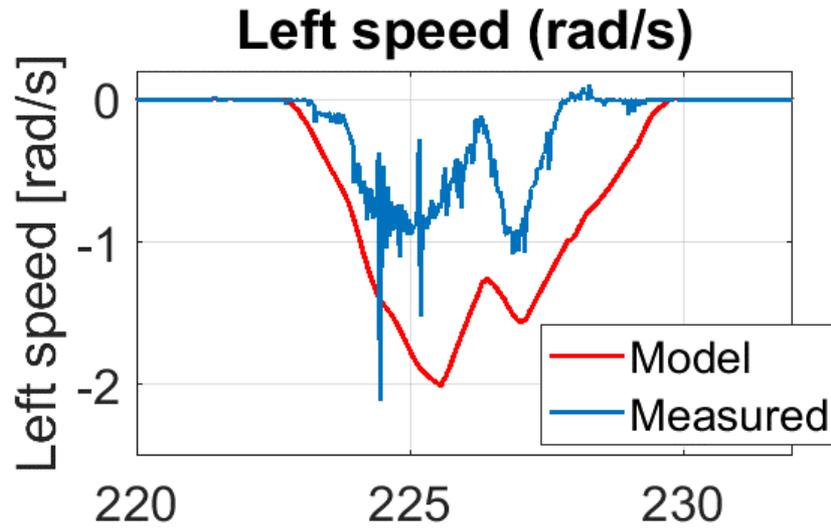
## Cas 2 – Test en tournant légèrement



# Cas 3 : Virage à 90° avec roue droite bloquée



# Cas 4 – Tourner sur place





# *Contrôle de l'ergomètre*

# Contrôle de l'ergomètre : Modélisation



- Modélisation du fauteuil roulant manuel sur un ergomètre avec l'humain dans la boucle

$$\tilde{J}_s \dot{\omega}_s - \tilde{\tau}_{F,s}(\omega_s) = \tau_s + k \bar{\tau}_s$$

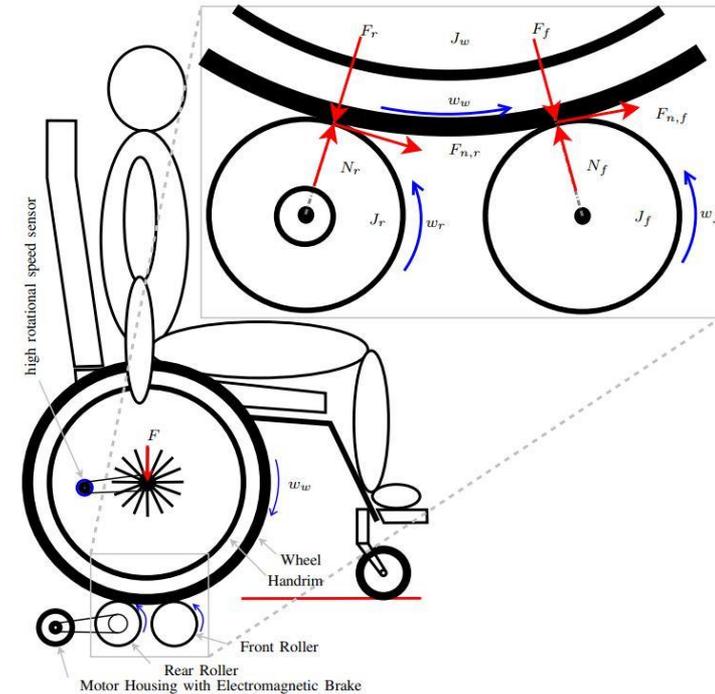
- Le modèle proposé pour le terme de friction

$$\begin{aligned} \tilde{\tau}_{F,s}(\omega_s) = & \gamma_1 (\tanh(\gamma_2 \omega_s) - \tanh(\gamma_3 \omega_s)) \\ & + \gamma_4 \tanh(\gamma_5 \omega_s) \\ & + \gamma_6 \omega_s \end{aligned}$$

$K$  est l'inverse du rapport de réduction

$$k = \frac{1}{N} = \frac{r_{Roller}}{r_{Wheel}}$$

L'indice  $s$  indique  $f$  et  $r$



parameters	left	right
$J$	0.1111	0.1108
$\gamma_1$	3.5879	3.7303
$\gamma_2$	2.0771	1.9868
$\gamma_3$	1.6712	185.9736
$\gamma_4$	0.0060	0.0065
$\gamma_5$	0.0167	0.0137
$\gamma_6$	3.2581e-04	0.0022

# Contrôle de l'ergomètre : Validation

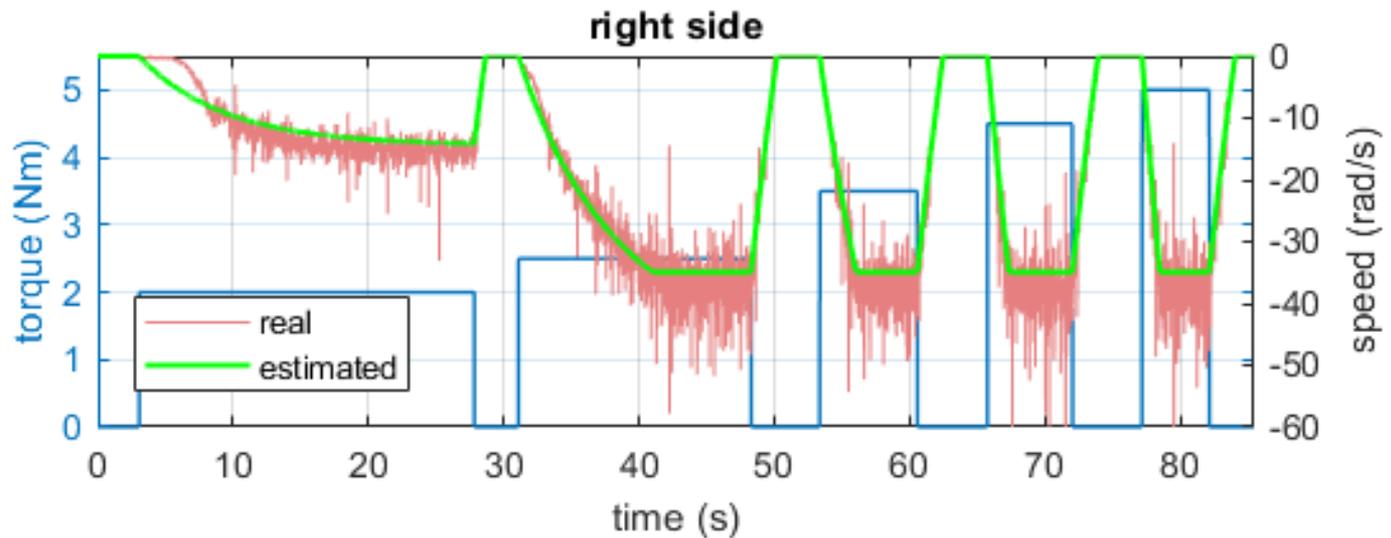
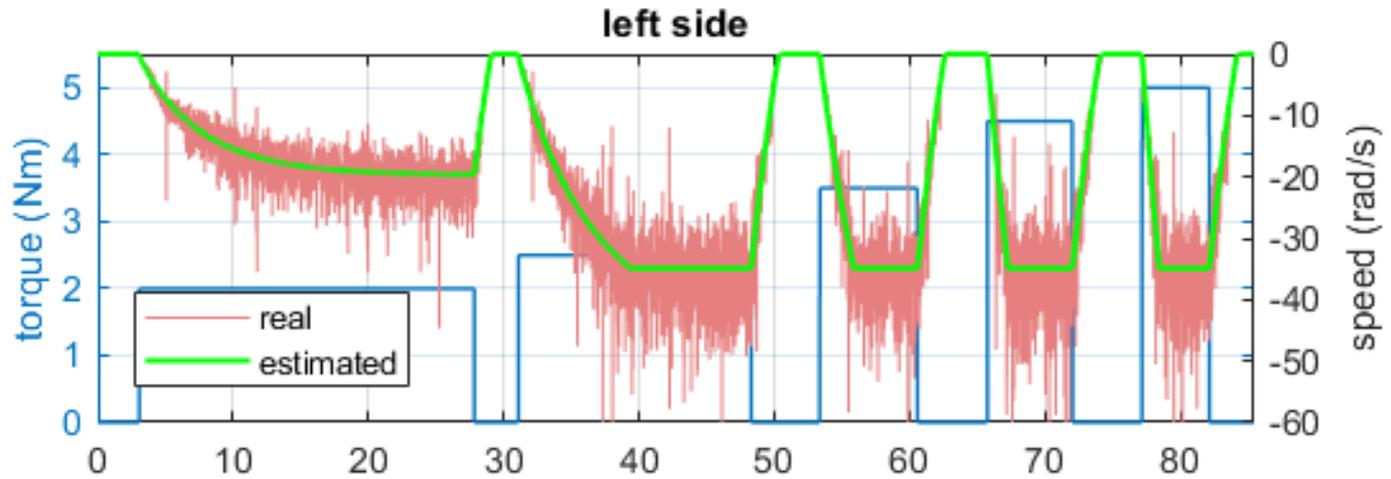
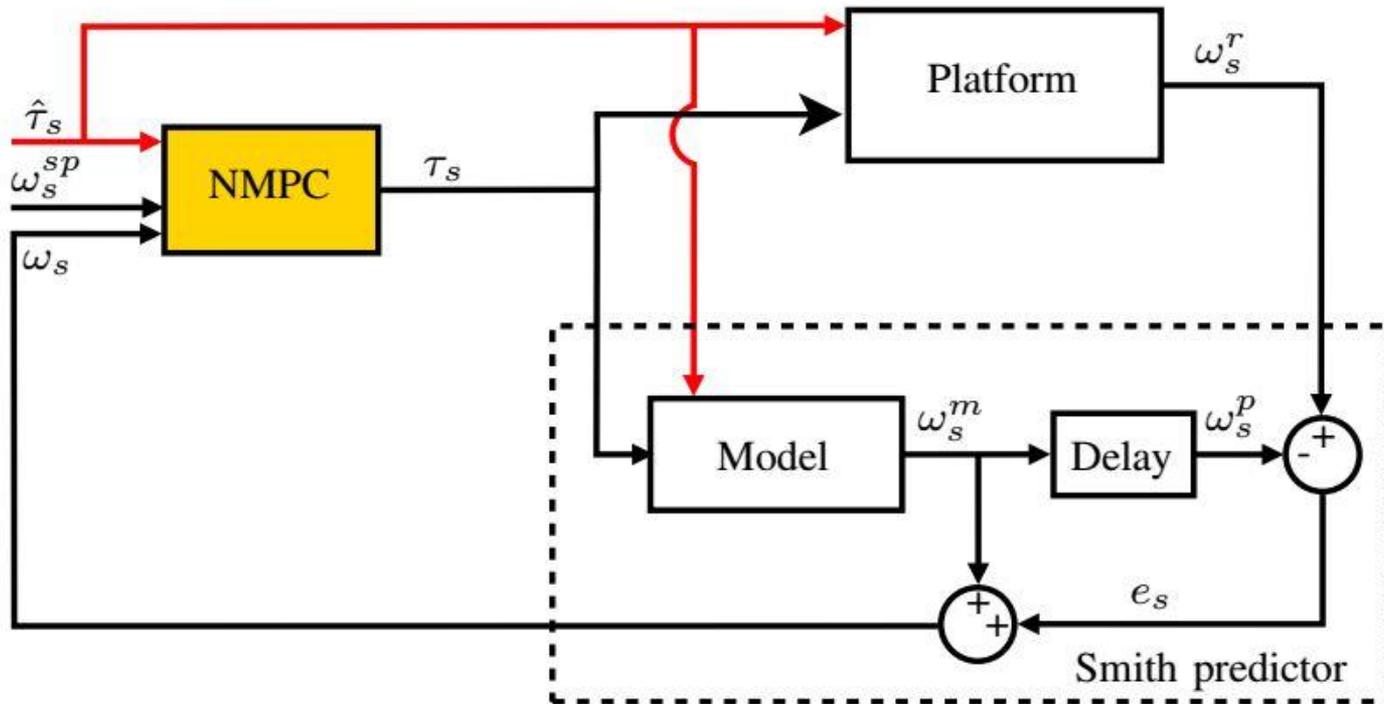




Schéma général NMPC avec prédicteur de Smith





- Contrôleur NMPC avec prédicteur de Smith

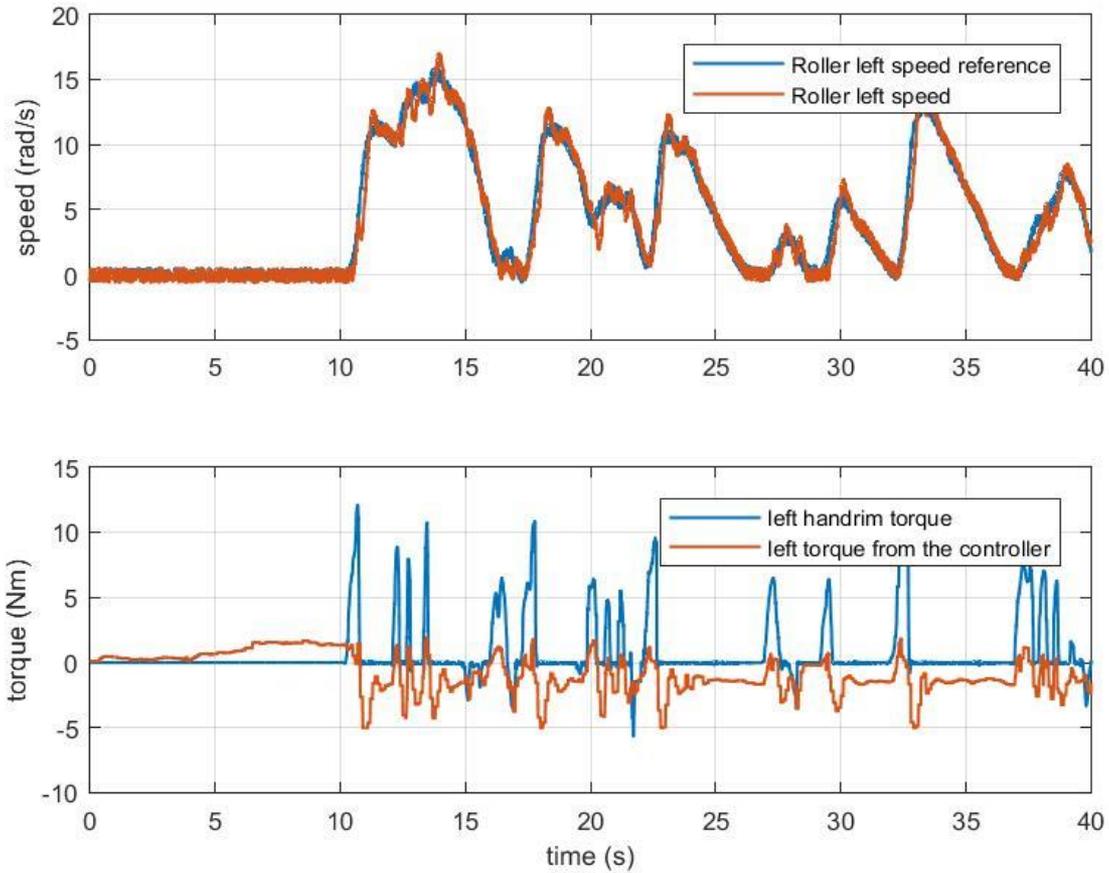
$$\min_{\tau(k|k), \dots, \tau(p-1+k|k)} = \left\{ \sum_{i=0}^{m-1} \left( \sum_{h=1}^2 |w^{\tau_h} \tau_h(k+i|k)|^2 + \sum_{h=1}^2 |w^{\Delta\tau_h} \Delta\tau_h(k+i|k)|^2 + \sum_{h=1}^2 |w^{\omega_h} [\omega_h(k+i+1|k) - \omega_h^{sp}]|^2 \right) \right\}$$

- Intégration du modèle dynamique non linéaire du système et des contraintes :

$$\begin{aligned} \omega_h^{\min} &\leq \omega_h(k+i+1|k) \leq \omega_h^{\max} \\ \tau_h^{\min} &\leq \tau_h(k+i|k) \leq \tau_h^{\max} \\ \Delta\tau_h^{\min} &\leq \Delta\tau_h(k+i|k) \leq \Delta\tau_h^{\max} \\ \Delta\tau_h(k+j|k) &= 0 \end{aligned}$$

for  $h = 1, 2; i = 0, \dots, m-1; j = p, \dots, m-1$ .

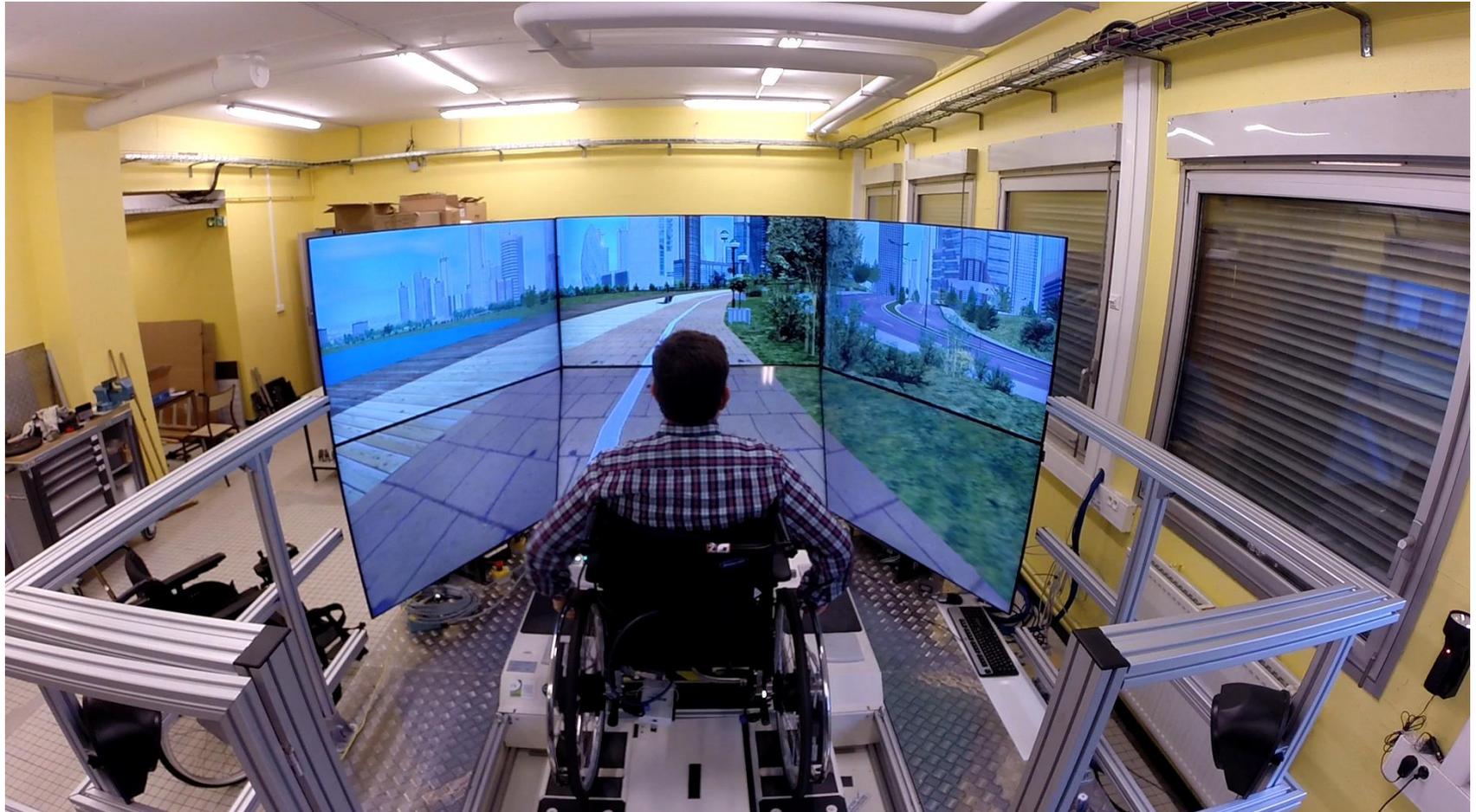
# Contrôle de l'ergomètre : Validation



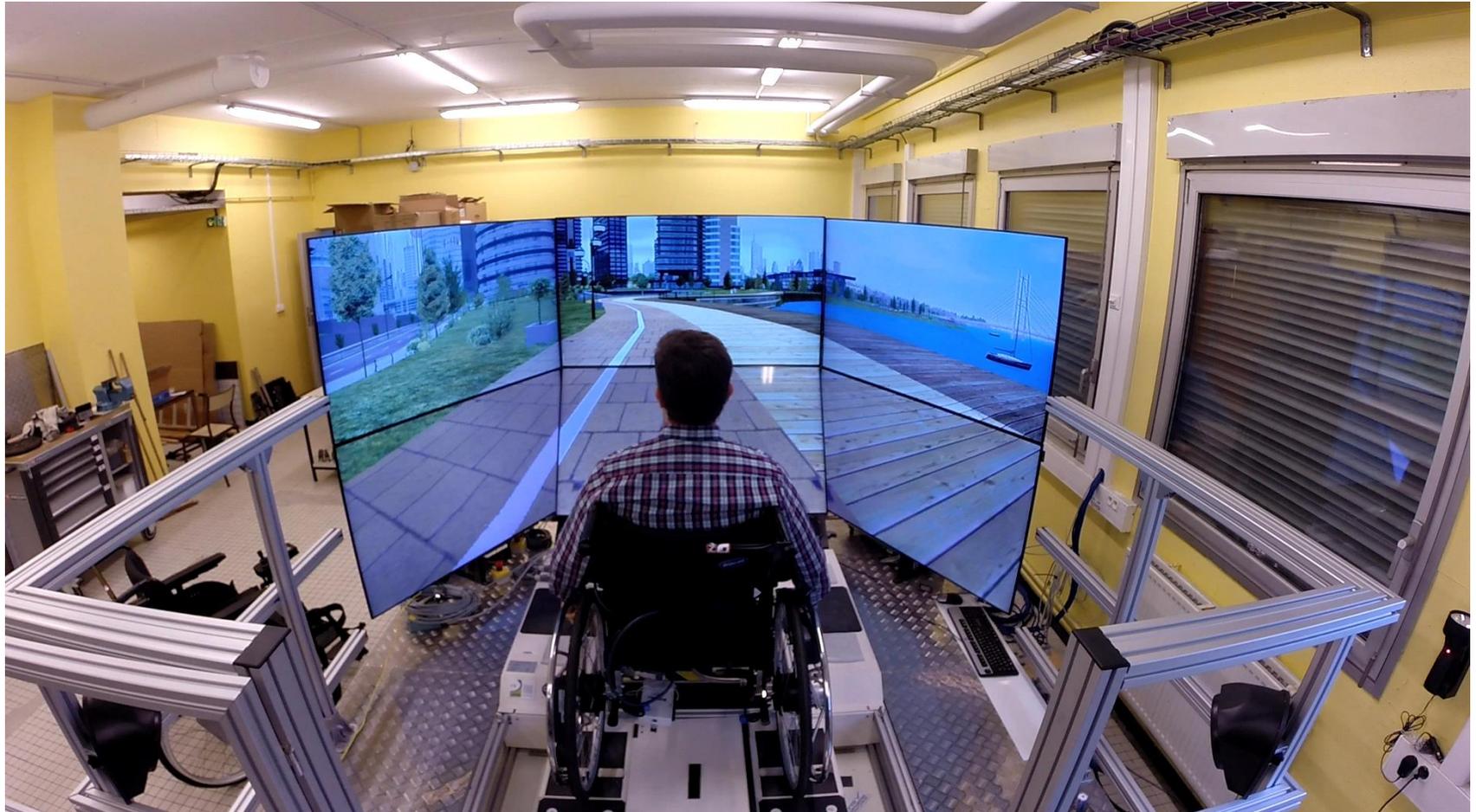


# *Démonstrations*

# Illustration : Simulateur FRM



# Illustration : Simulateur FRM



# Illustration : Simulateur FRM



# Illustration : Simulateur FRM



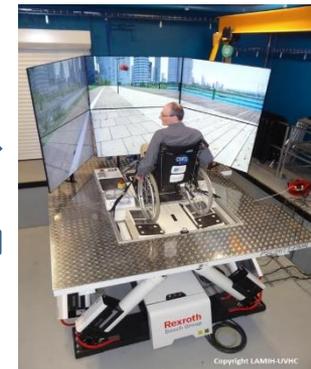
# Illustration : Simulateur FRE



# Stratégie de valorisation



- **Répondre à des demandes d'évaluation de la qualité des fauteuils roulants**
  - FRM, FRM assisté, FRE, (fabricants français : Ottobock, Dupont Médical AutoNomad...)
- **Simulation de l'environnement réel avant la réalisation des tests sur site réel**
  - Evaluation des trajets pour des architectes ou les collectivités locales
  - Piste d'essais sur le campus de l'UVHC
- **Recueil des données sur la performance de conduite des PMR pour les exploiter dans d'autres applications**
  - (ADAS, Véhicule Autonome...)
  - Co-simulation SHERPA  $\leftrightarrow$  PSCHITT-PMR



**FIN**



***Merci pour votre attention***



- Modélisation du comportement dynamique du FRM
  - Utilisé comme modèle référence pour la génération des profils de vitesses
  - Problème d'identifiabilité (travail en cours)
- Modélisation du banc à rouleaux en interaction avec le FRM
  - Utilisé pour le développement des lois de commande
  - Problème du retard
- Développement d'un contrôleur permettant le suivi des vitesses de références
  - MPC + prédicteur de Smith

## Travaux futurs :

- Identification et validation du modèle référence
- Test avec le mouvement dynamique (base mobile)