



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

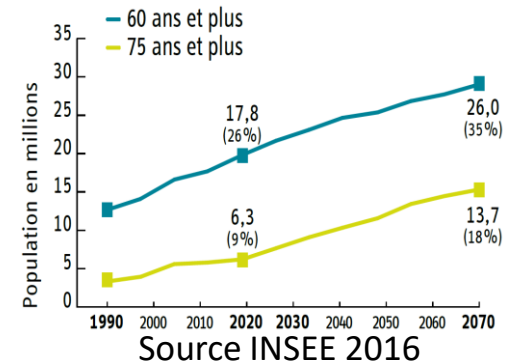
G. Conreur, T. Poulain, T. Nguyen, T. Bentaleb, P. Pudlo

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

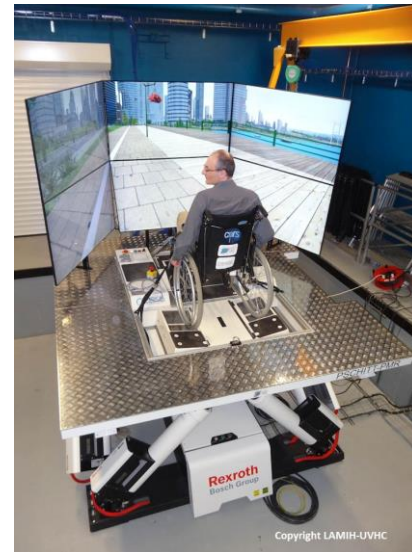


Mise en œuvre d'équipements scientifiques communs regroupés au sein de la **plateforme PSCHITT-PMR**

- **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

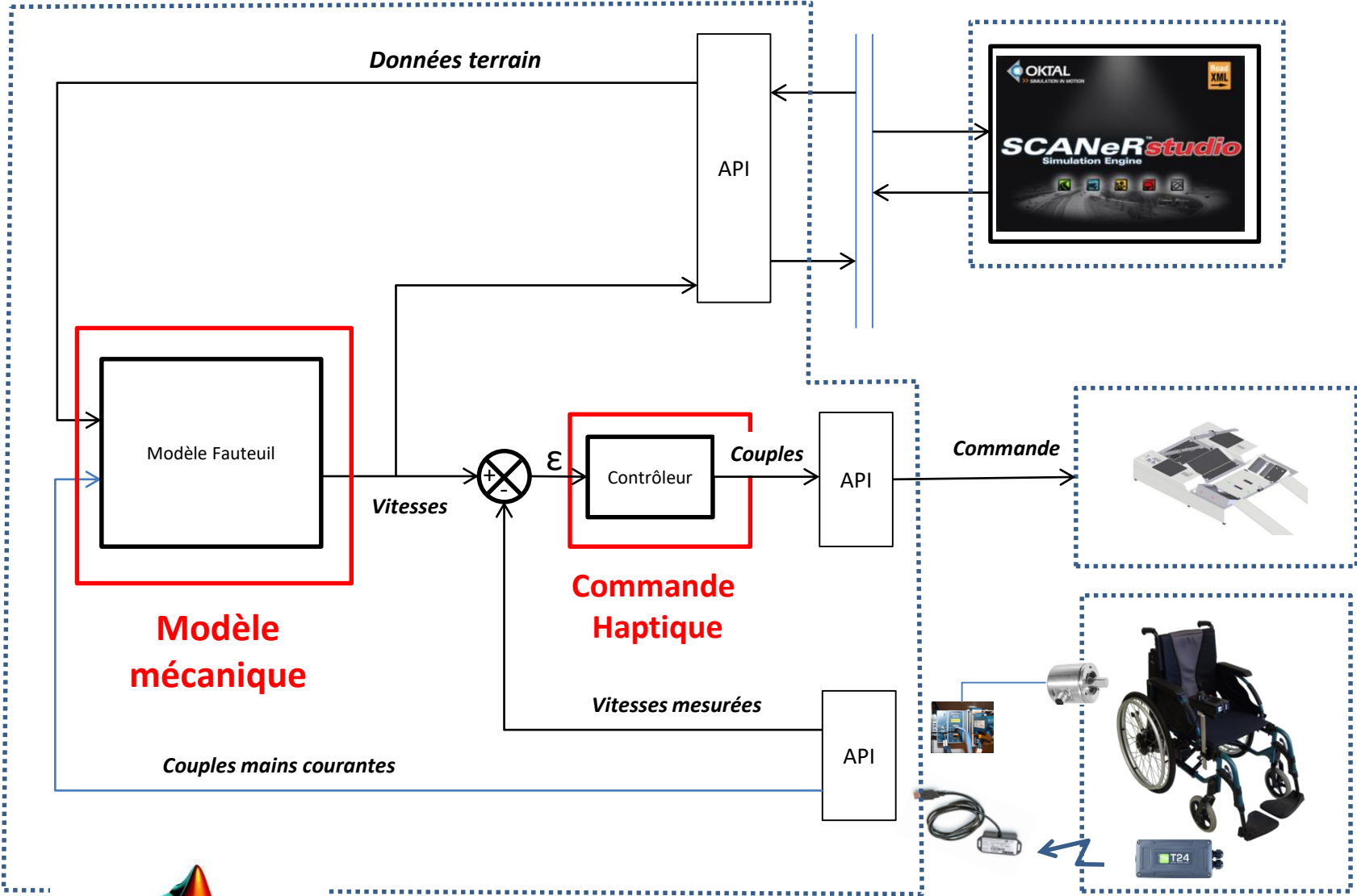
- Déplacement rectilignes et curvilignes (Avancer / reculer)
- Sol plan avec divers niveaux d'inclinaison (horizontal, pente, dévers)
- Sol avec différents revêtements (adhérence)
- Sol non plan / terrain accidentés
- Déplacement intérieur





Architecture de la plateforme

PSCHITT- PMR : Architecture générale

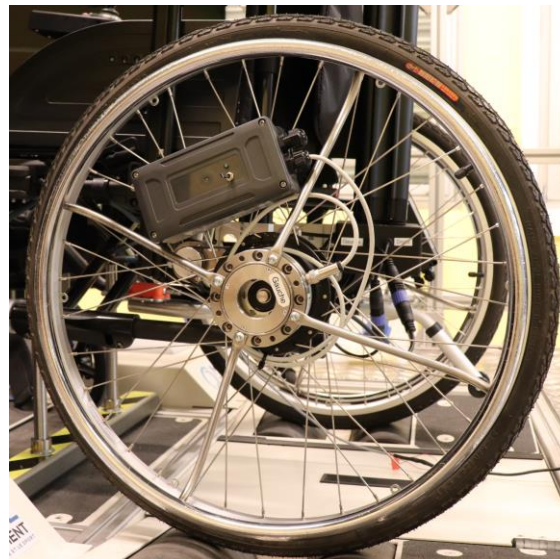
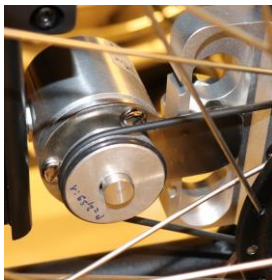




Matériel

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

Codeurs



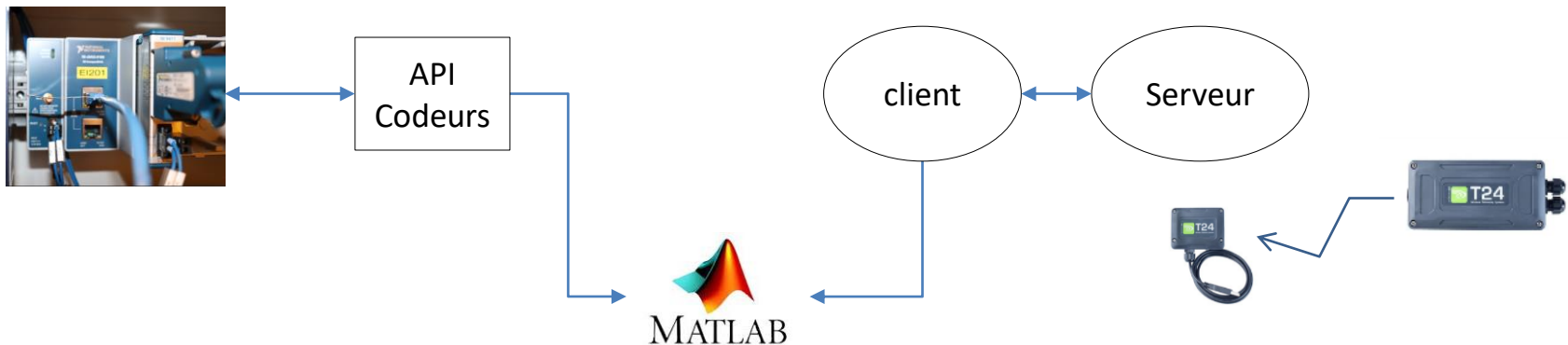
couplemètres





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





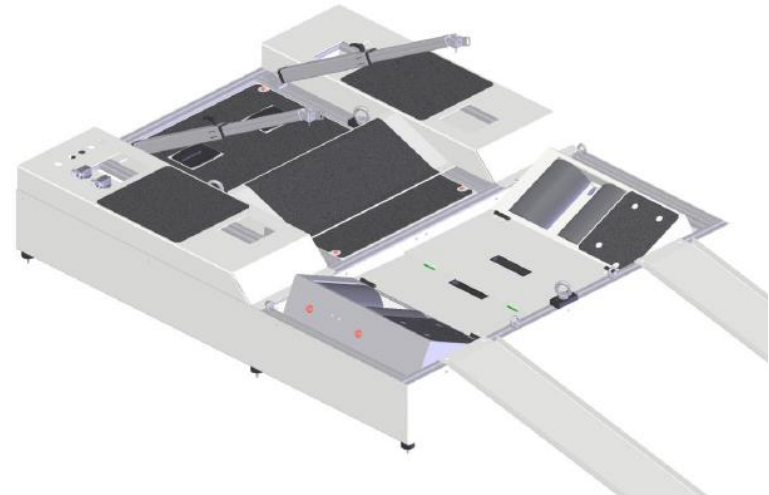
- Le Fauteuil pourra être utilisé hors plateforme pour :
 - La mise au point du modèle fauteuil
 - L'acquisition :
 - des couples aux mains courantes
 - des vitesses des roues arrière
 - des données issues de la centrale inertielle
 - Enregistrements sous Matlab



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



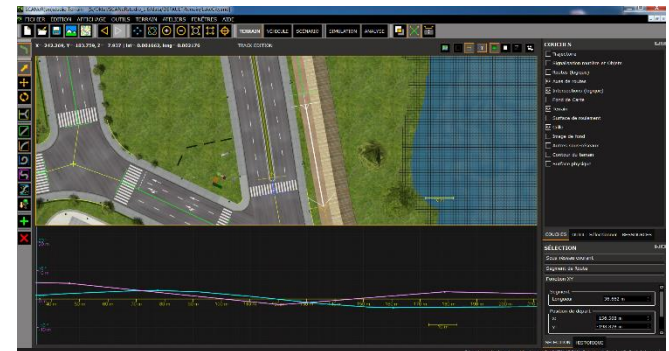


- 6 écrans embarqués, full HD.
- Champs visuel
 - Horizontal : 170 °
 - Vertical : 65 °





- 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

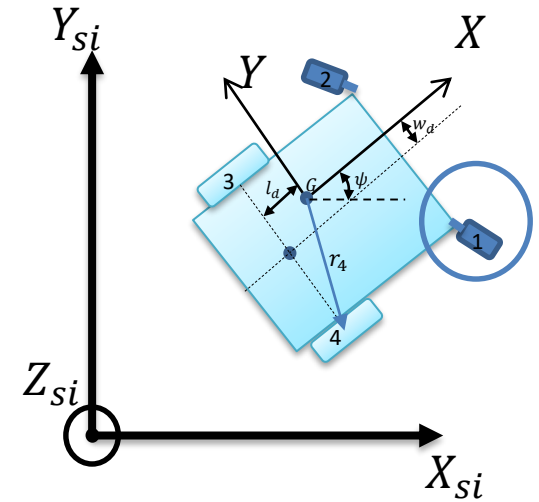


Modélisation dynamique du FRM

Modèle dynamique du FRM



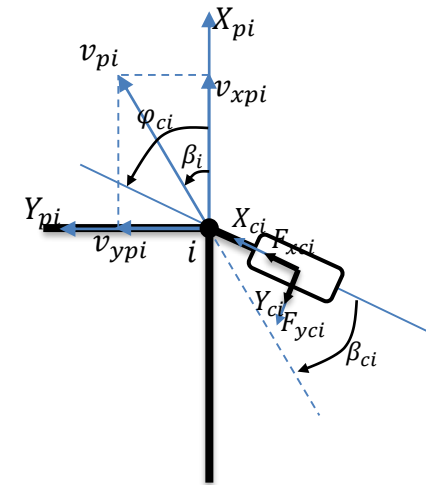
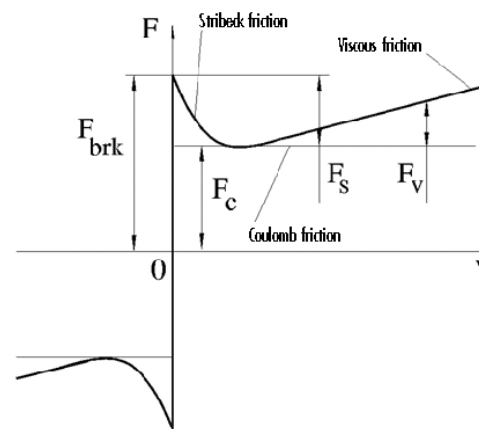
$$\left\{ \begin{array}{l} m\dot{v}_x = m\omega v_y + \sum_{i=3,4} F_{xi} + \sum_{i=1,2} F_{xpi} + F_{xP} \\ m\dot{v}_y = -m\omega v_x + \sum_{i=3,4} F_{yi} + \sum_{i=1,2} F_{ypi} + F_{yP} \\ I_z \ddot{\psi} = \sum_{i=3,4} \vec{F}_{xi} \times \vec{r}_i + \sum_{i=3,4} \vec{F}_{yi} \times \vec{r}_i - T_{turning.resistance}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



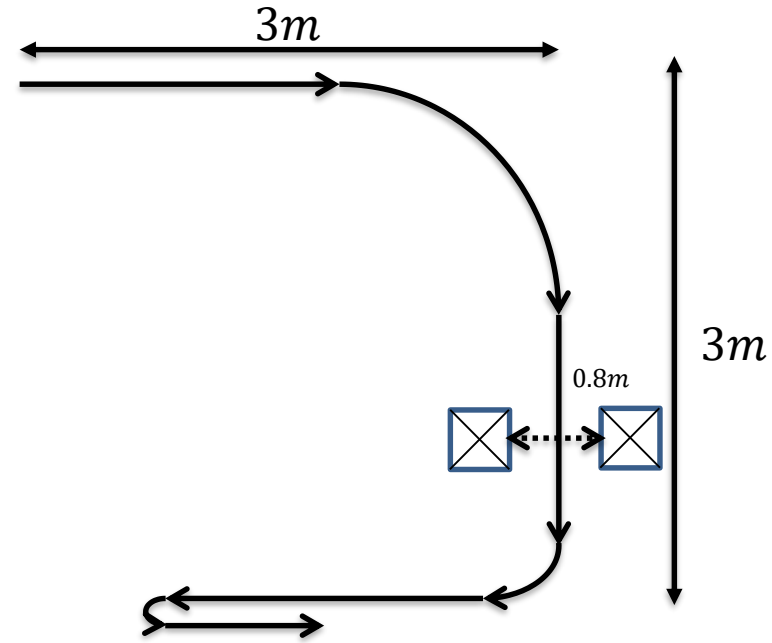
$$T_{turning.resistance} = f(\omega_i, \beta, \psi) \cdot T_{friction.turn}$$

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

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



Validation du model dynamique du FRM

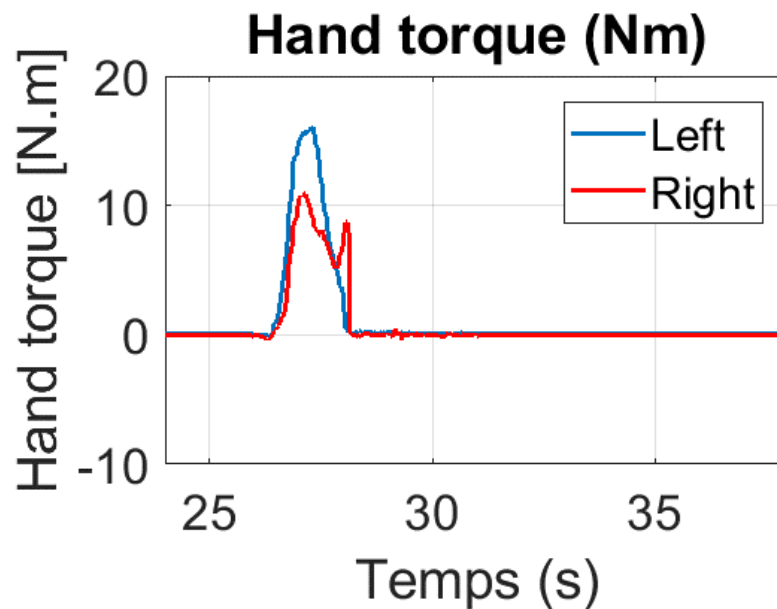
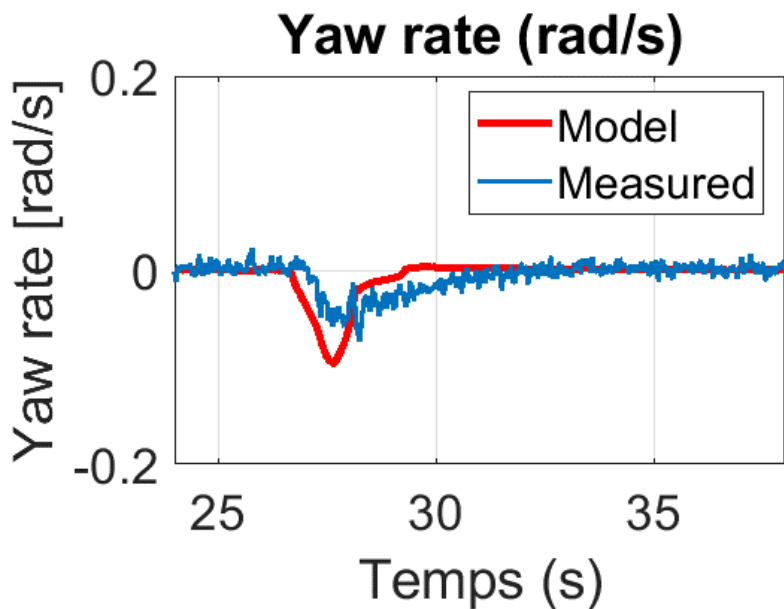
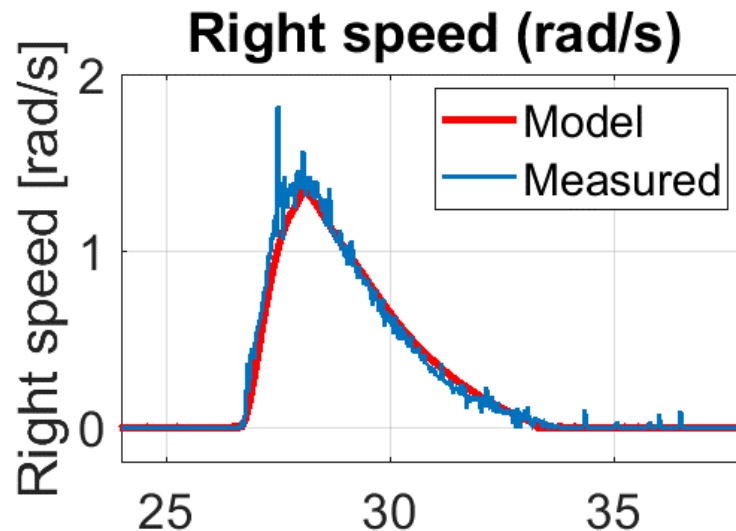
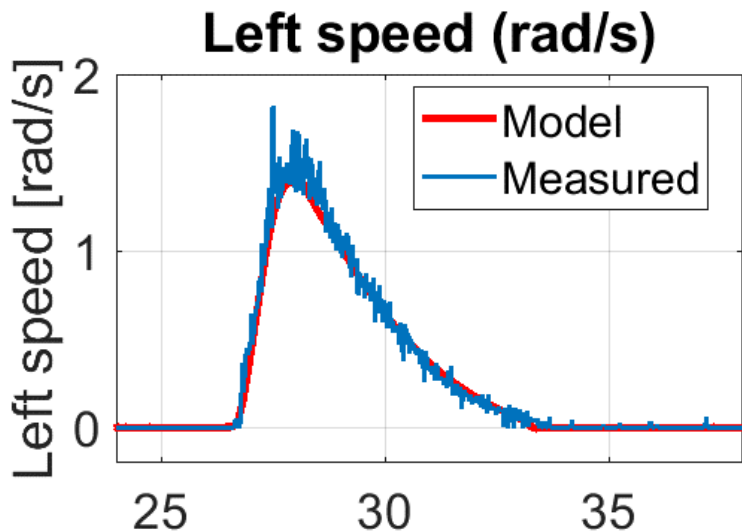


Experiment setup

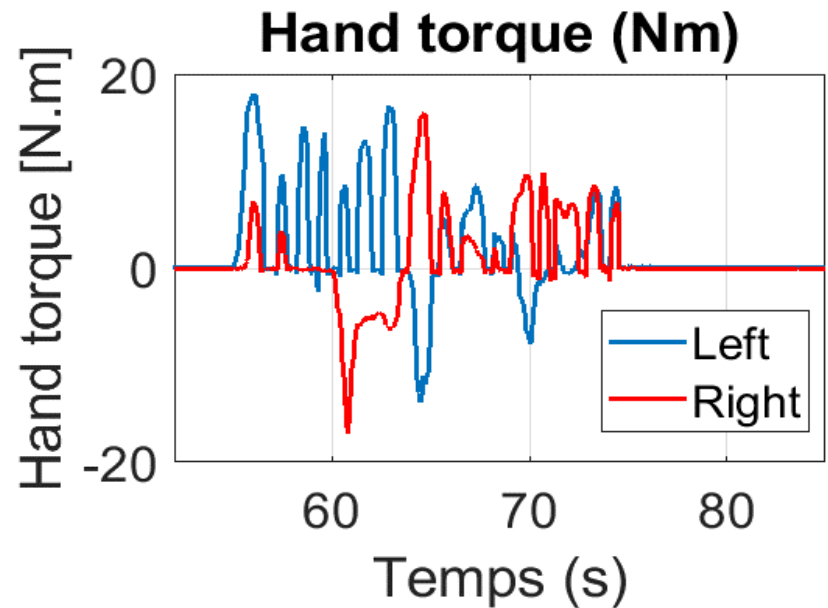
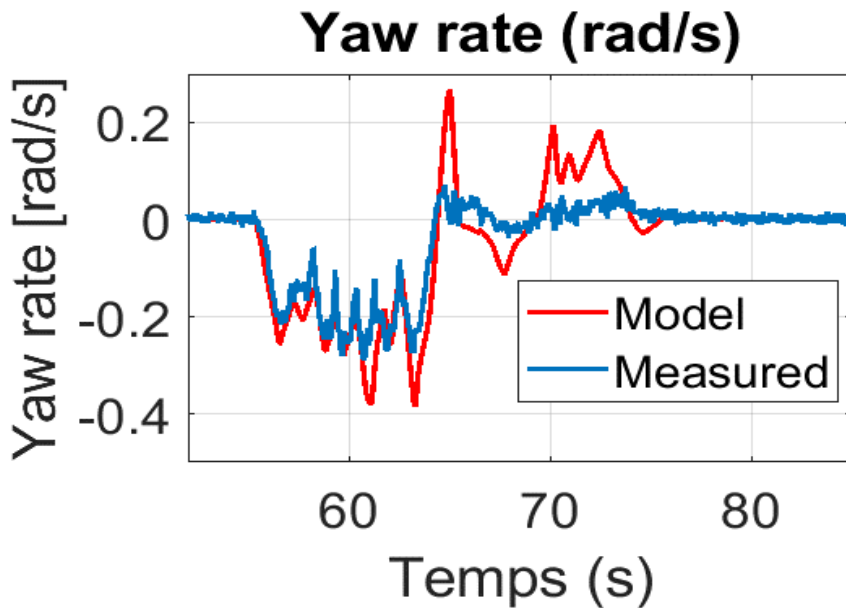
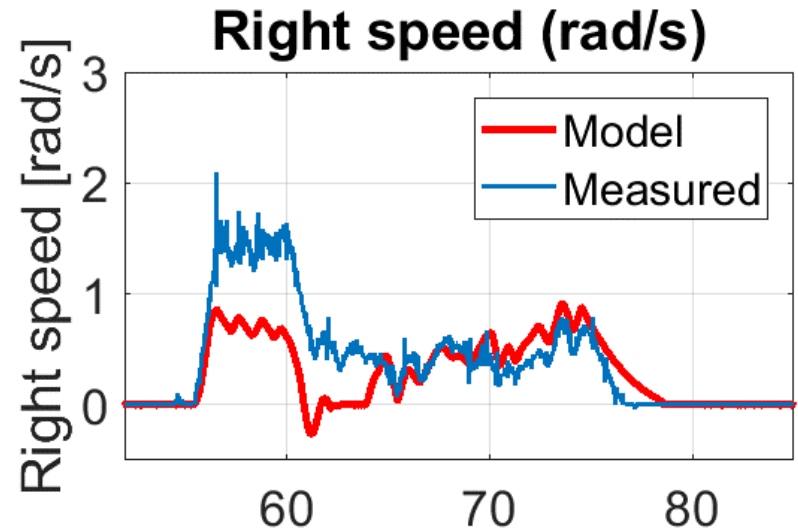
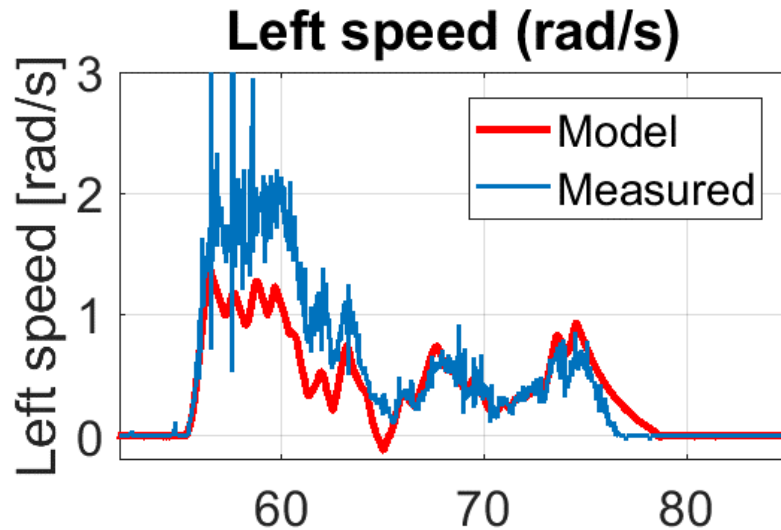
Mesures

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

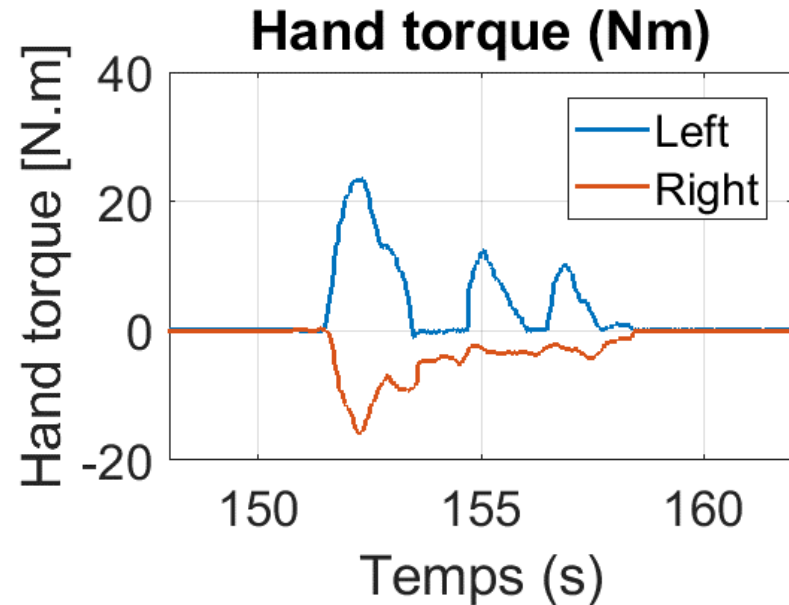
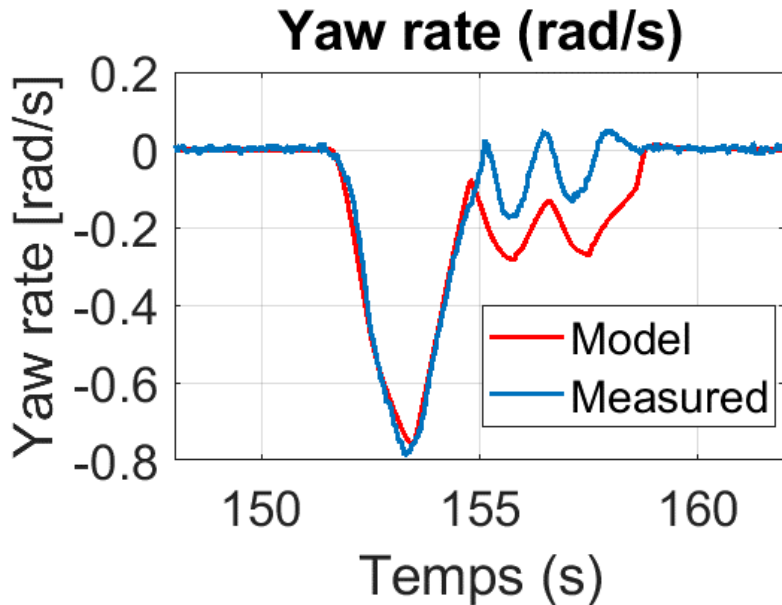
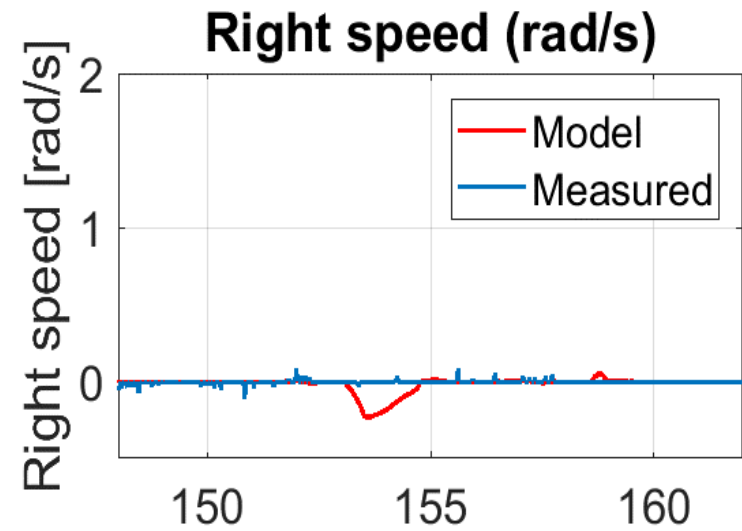
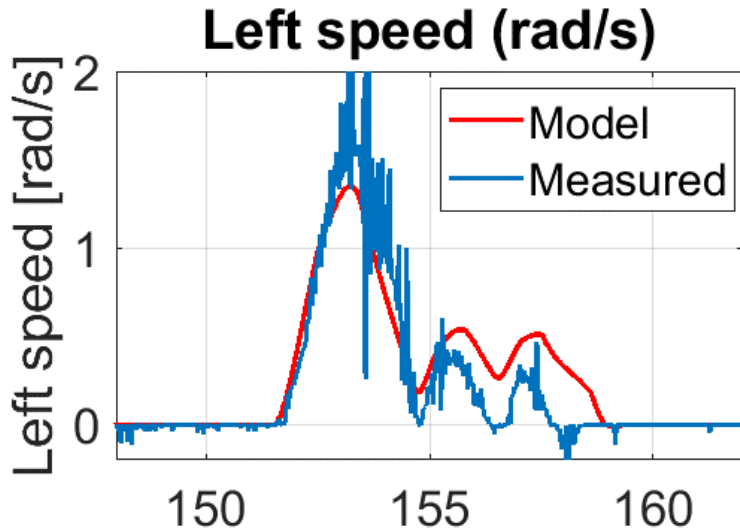
Cas 1 – Test en ligne droite



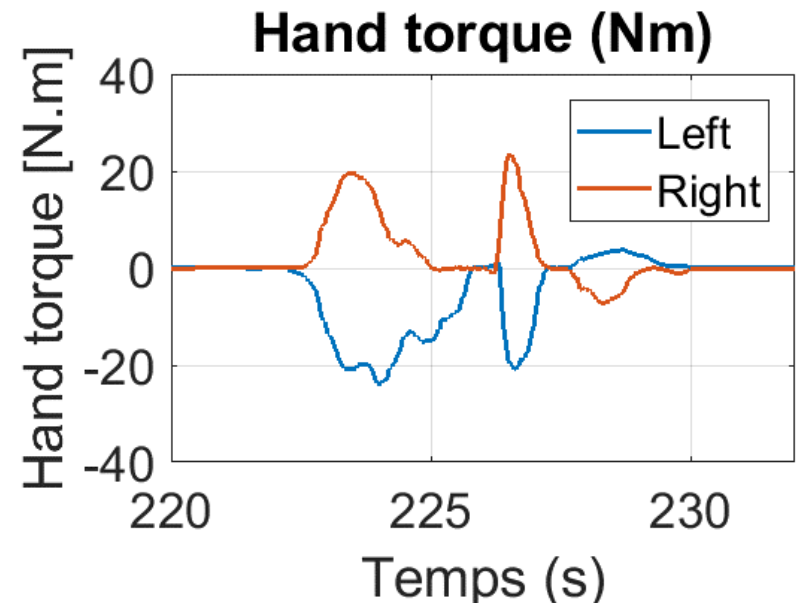
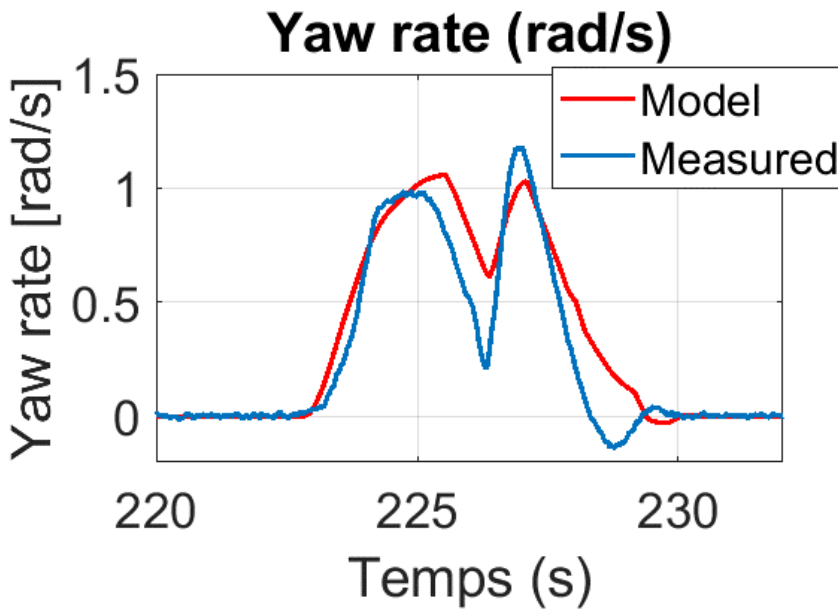
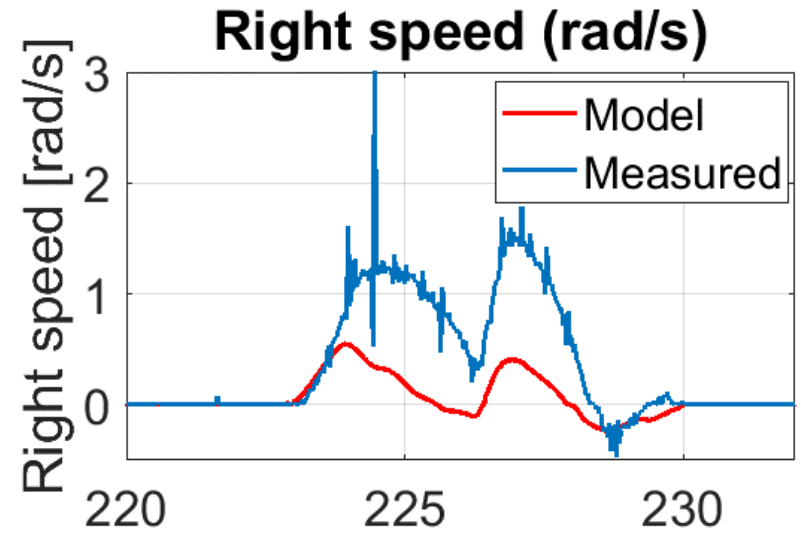
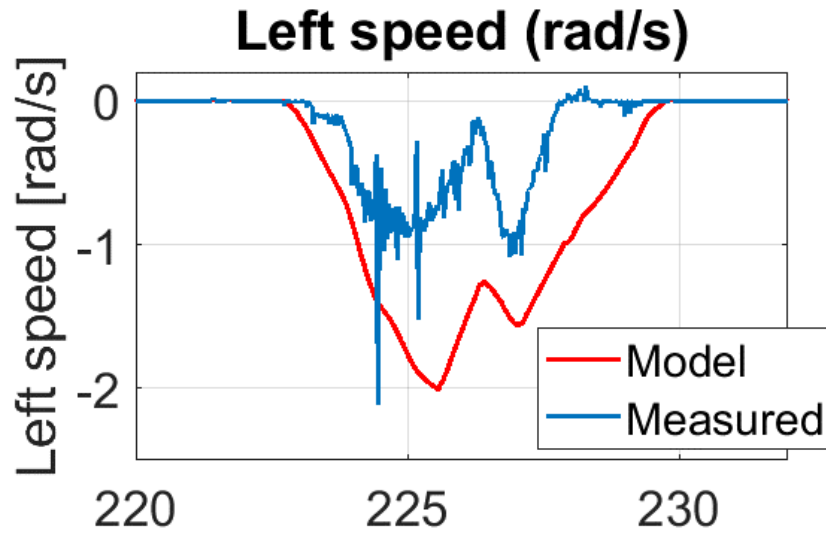
Cas 2 – Test en tournant légèrement



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

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

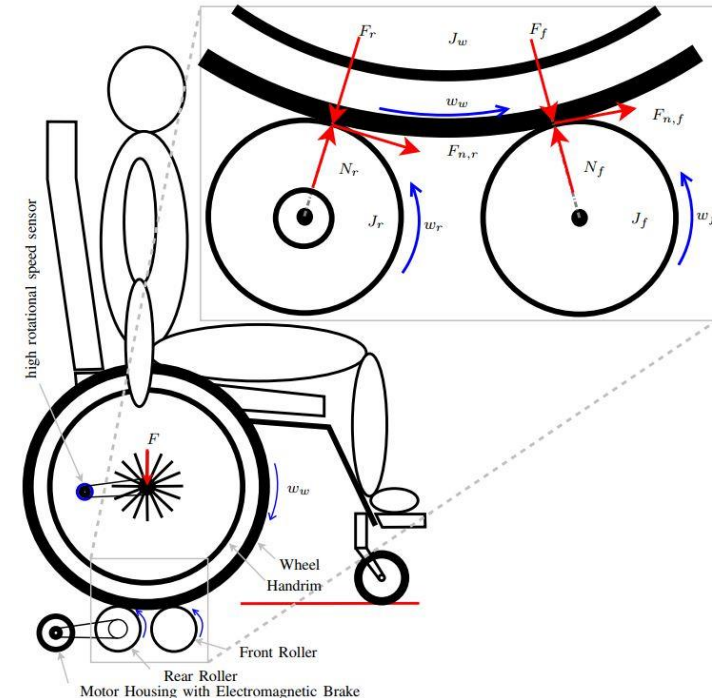
- Le modèle proposé pour le terme de friction

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

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 |
| γ_1 | 3.5879 | 3.7303 |
| γ_2 | 2.0771 | 1.9868 |
| γ_3 | 1.6712 | 185.9736 |
| γ_4 | 0.0060 | 0.0065 |
| γ_5 | 0.0167 | 0.0137 |
| γ_6 | 3.2581e-04 | 0.0022 |

Contrôle de l'ergomètre : Validation

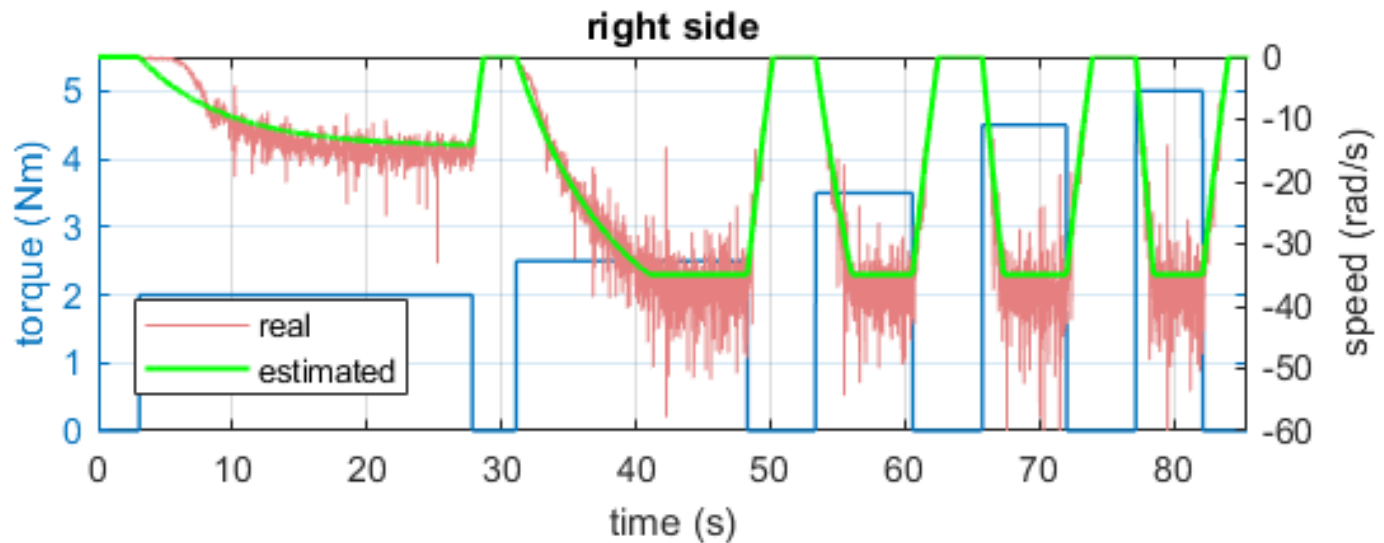
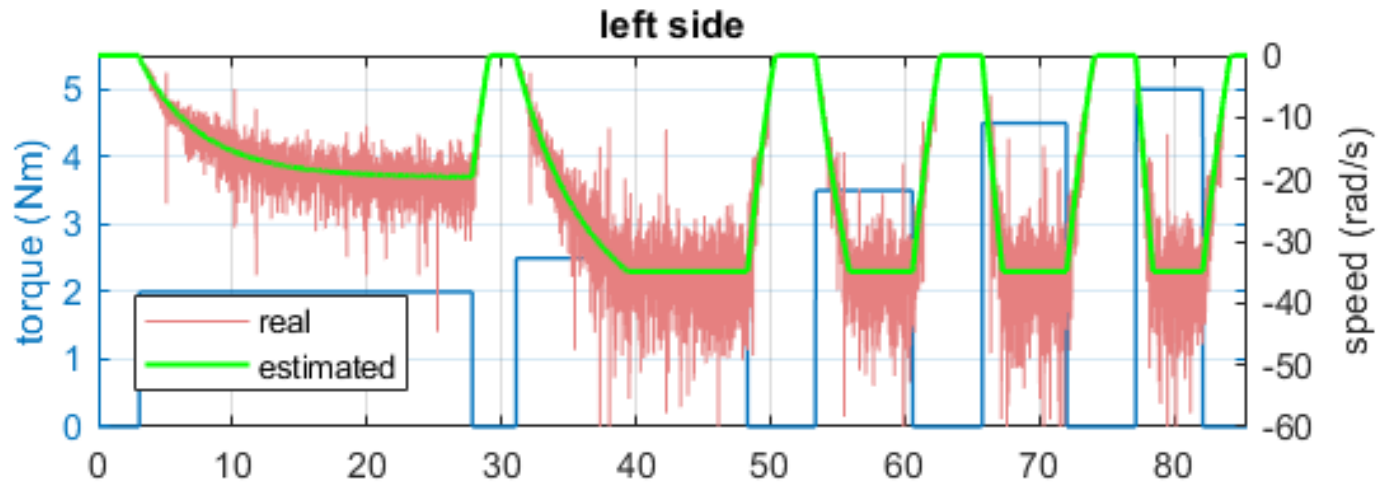
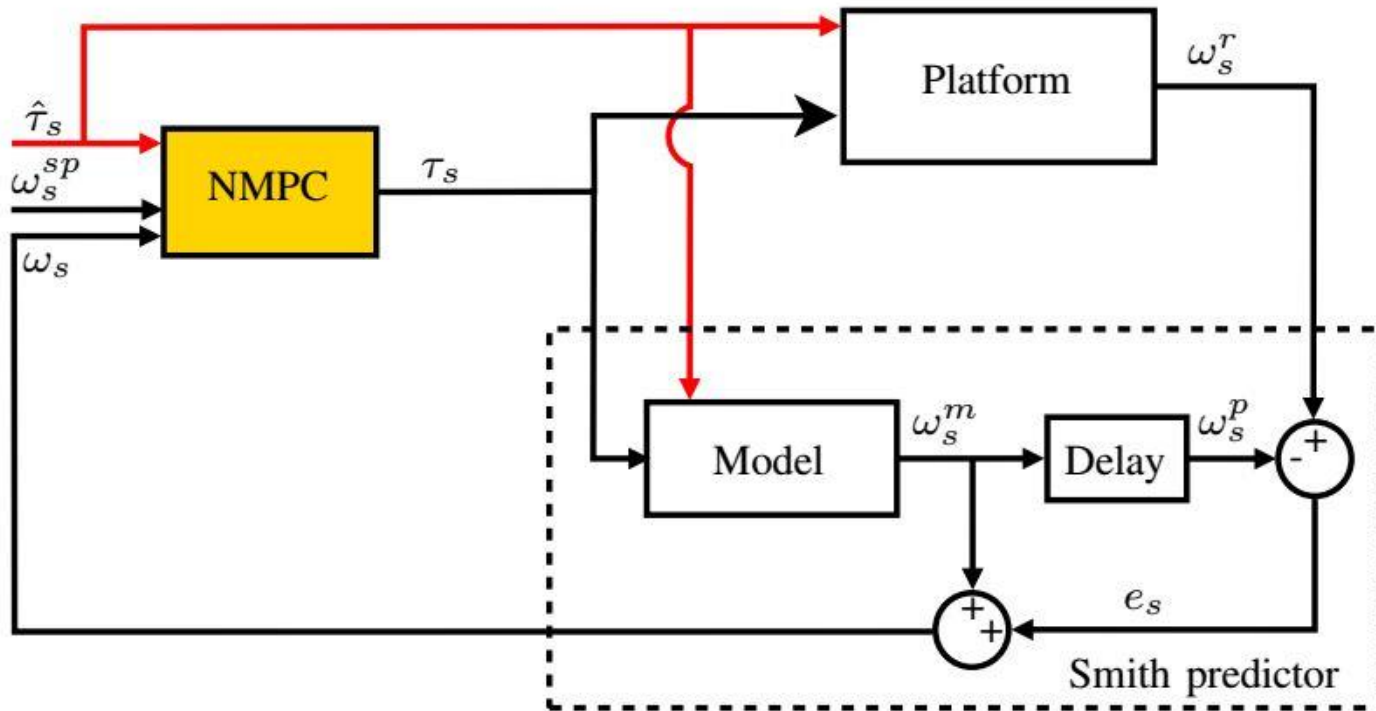




Schéma général NMPC avec prédicteur de Smith





- Contrôleur NMPC avec prédicteur de Smith

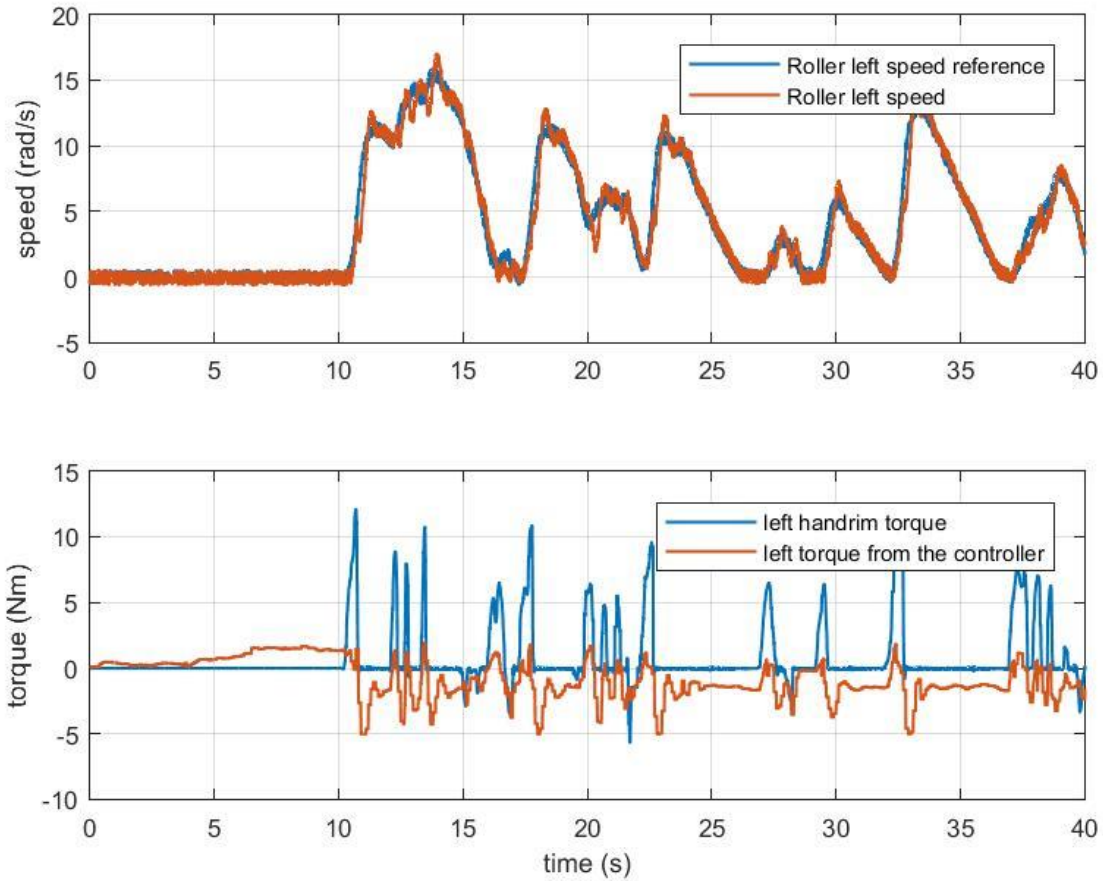
$$\min_{\tau(k|k), \dots, \tau(p-1+k|k)} = \left\{ \sum_{i=0}^{m-1} \left(\sum_{h=1}^2 |w^{\tau_h} \tau_h(k+i|k)|^2 + \sum_{h=1}^2 |w^{\Delta\tau_h} \Delta\tau_h(k+i|k)|^2 + \sum_{h=1}^2 |w^{\omega_h} [\omega_h(k+i+1|k) - \omega_h^{sp}]|^2 \right) \right\}$$

- 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



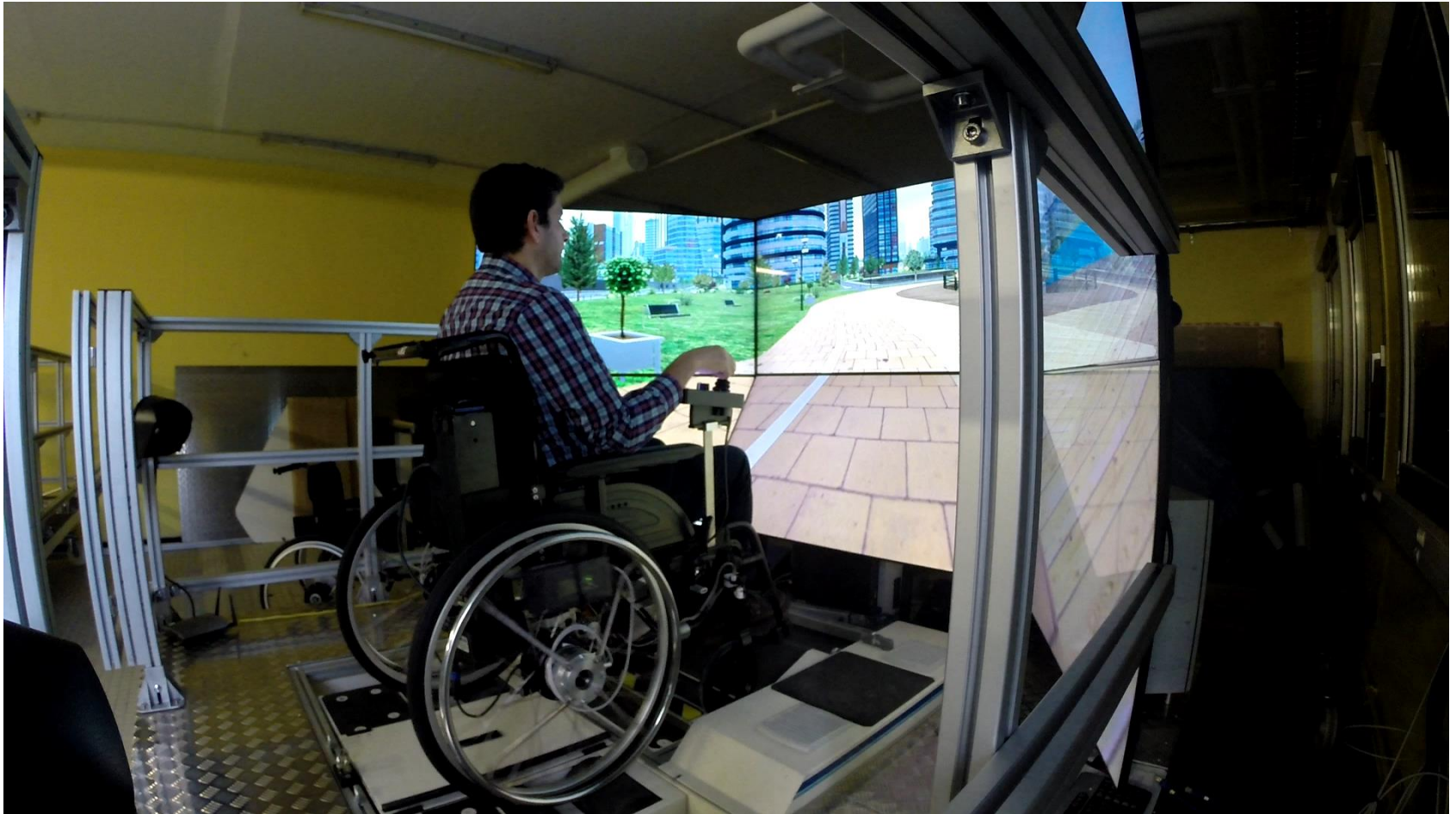
Illustration : Simulateur FRM



Illustration : Simulateur FRM



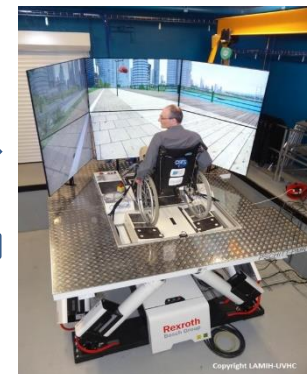
Illustration : Simulateur FRE



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)