



# (Bio)Mécanique en sciences du mouvement humain

ANF RDM 2021 Mécanique et vivant – Jeudi 20 Octobre 2021

# Sommaire

- Présentation du CIAMS et plateformes de recherche
- Thématique 1 : Ergonomie et validation d'un nouveau capteur embarqué
- Thématique 2 : Mesure de l'impédance du bras à l'aide d'un bras robotisé
- Thématique 3 : Exosquelette et étude du contrôle de la motricité

# Présentation de l'unité de recherche CIAMS





Complexité, Innovation,  
Activités Motrices et  
Sportives



**Mouvement Humain, Adaptation,  
et Performance Sportive**

(Resp.: B. Berret)

**N = 34 E-C (hors émérite)**

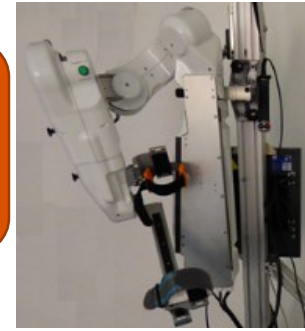
**Société, Cultures  
et Organisations sportives**

(Resp.: A. Bohuon & C. Hautbois)

**N = 11 E-C (hors émérite)**

+ 1 Ingénieur d'étude

Axe 1 : Facteurs humains,  
interaction  
humain/machine



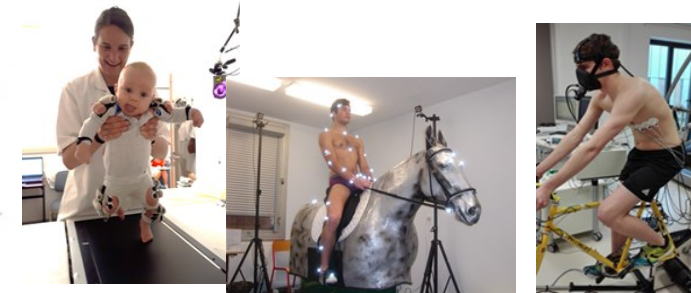
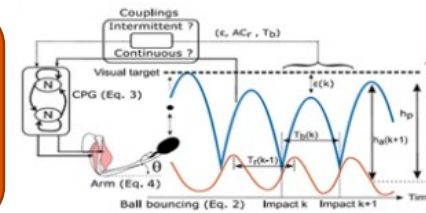
Evaluation ergonomie des postes de travail - Exosquelettes - Exergames et jeux sérieux - Interface cerveau-machine - Interactions avec humain virtuel

Mouvement Humain, Adaptation,  
et Performance Sportive

(Resp.: B. Berret)

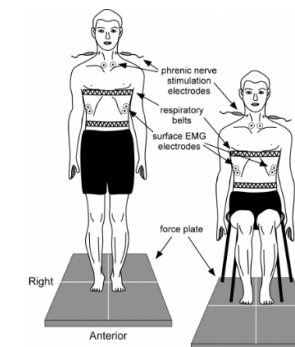
**N = 34 E-C (hors émérite)**

Axe 2 : Performance et  
motricité



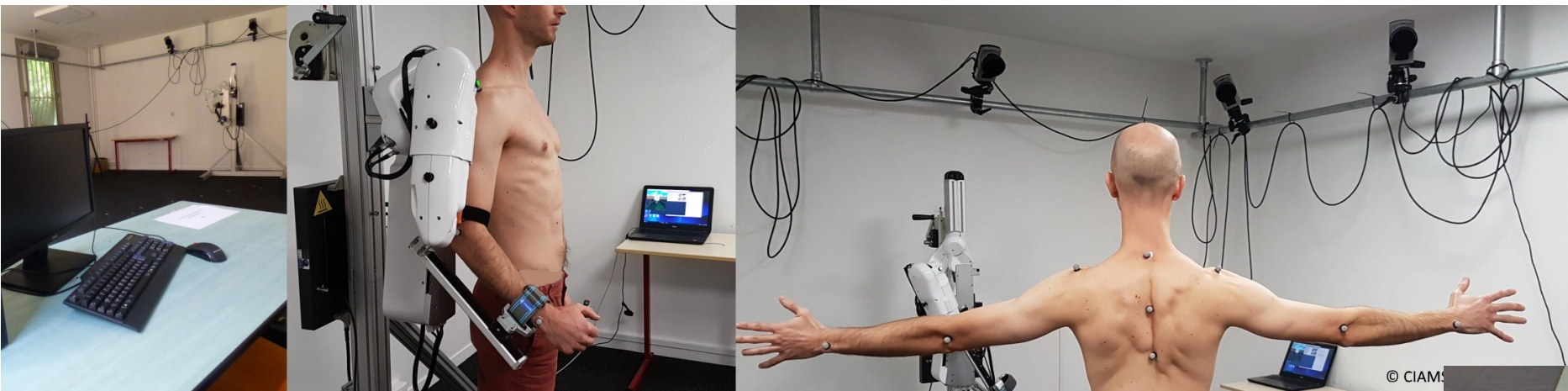
Posture et mouvement – Développement – Déterminants de la performance sportive

Axe 3 : Activité physique,  
sport, rééducation et  
santé



# Plateformes de recherche

Analyse biomécanique du mouvement humain et de l'interaction homme-machine



Nom	Modèle	Marque
17 Caméras	Oqus	Qualisys
1 Exosquelette 4 axes	ABLE	HAPTION
2 Plateformes de force		AMTI
IMU	Awinda	XSENS
EMG		Cometa, Delsys
Goniomètres		Biometrix

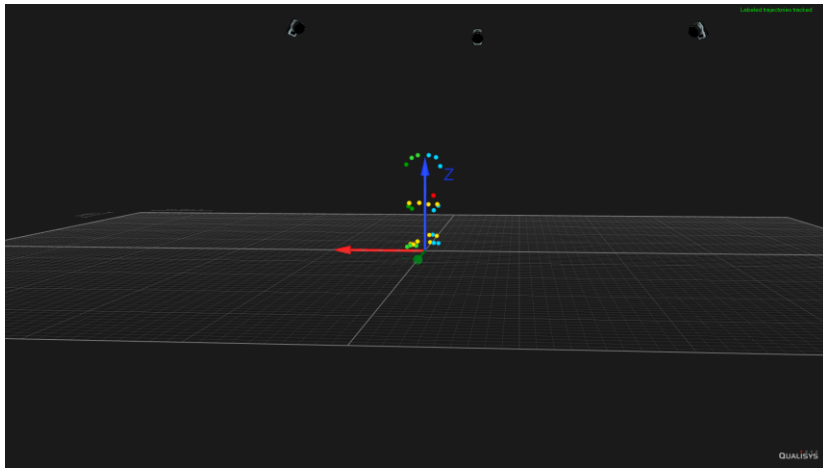


# Plateformes de recherche

Analyse biomécanique du mouvement humain et de l'interaction homme-machine

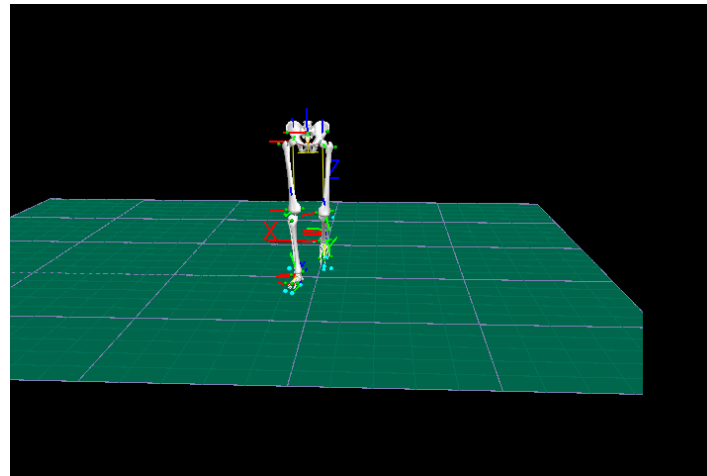


**Qualisys Track Manager (QTM)**  
User-friendly mocap software



Position 3D des marqueurs

Visual3D Professional™ (C-Motion)



Application d'un modèle anthropométrique  
Calcul des variables cinématique/dynamique  
S

OpenSim



Modélisation musculo-squelettique

# Mécanomyographie et ergonomie physique

## *Mécanomyographie vs. EMG*

Thèse de Matthieu Corr a (en cours, CIFRE)

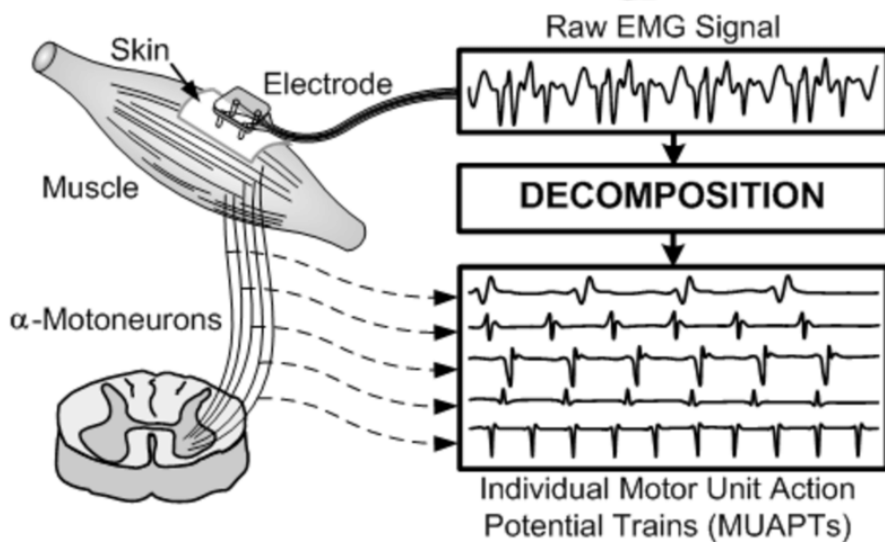
*Sous la direction de Isabelle Siegler, Nicolas Vignais et Maxime Progetti (MOTEN TECHNOLOGIES)*



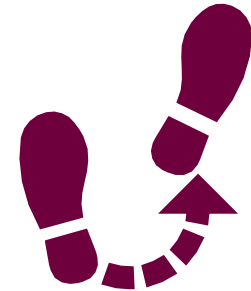


# La référence : l'électromyographie (EMG)

Mesure des courants électriques générés par le muscle pendant sa contraction représentant l'activation neuromusculaire



les limites :



# Présentation de Moten-Technologies



## Mesurez l'activité musculaire

MOTEN déploie une technologie innovante sur laquelle compter pour mesurer les efforts mobilisés pendant une activité habituelle. Couplées à celles du mouvement, les données recueillies orientent les décideurs dans la mise en place d'actions concrètes de prévention.

# Une technologie issue de la prospection sismique pétrolière

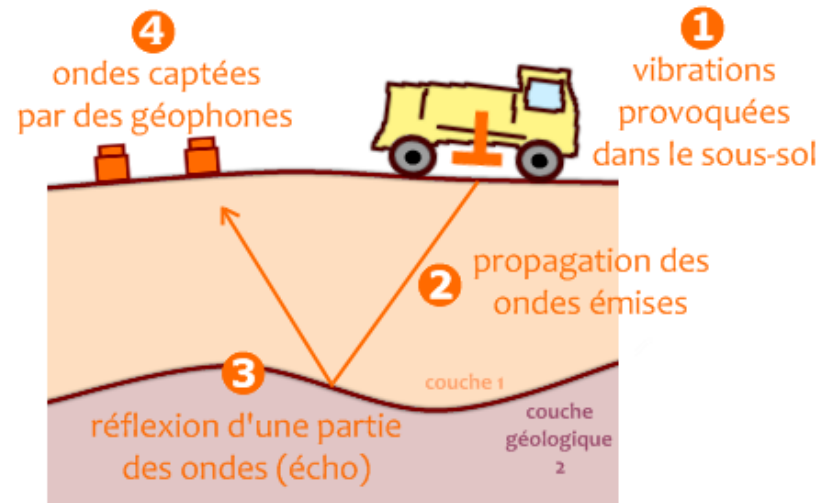
# Schlumberger



## Prospection sismique

## Cartographie sous-sol

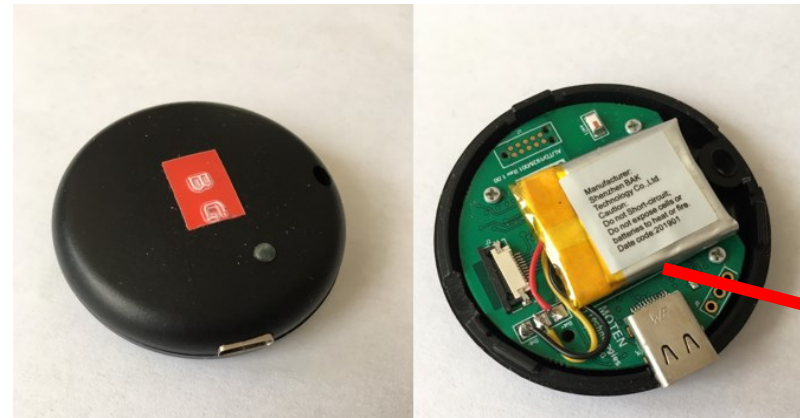
## Accéléromètre de haute résolution



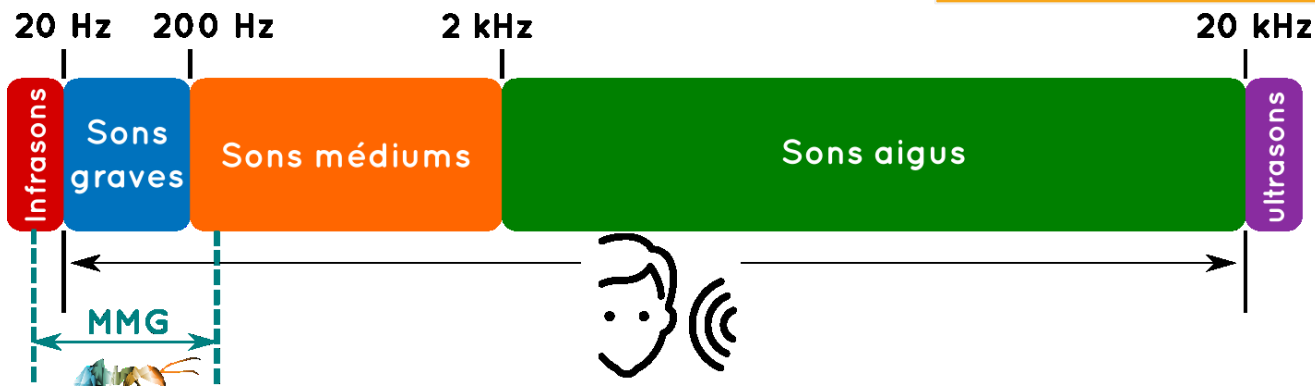
# Un capteur à l'écoute des muscles

Peut-il « remplacer » l'utilisation des EMG pour étudier l'activité musculaire ?

La Mécanomyographie (MMG) se définit comme la mesure des oscillations latérales basses fréquences des fibres musculaires squelettiques actives.




Accéléromètre sismique  
Centrale inertielle (mouvement)



Comparer la mesure MMG avec la mesure EMG.

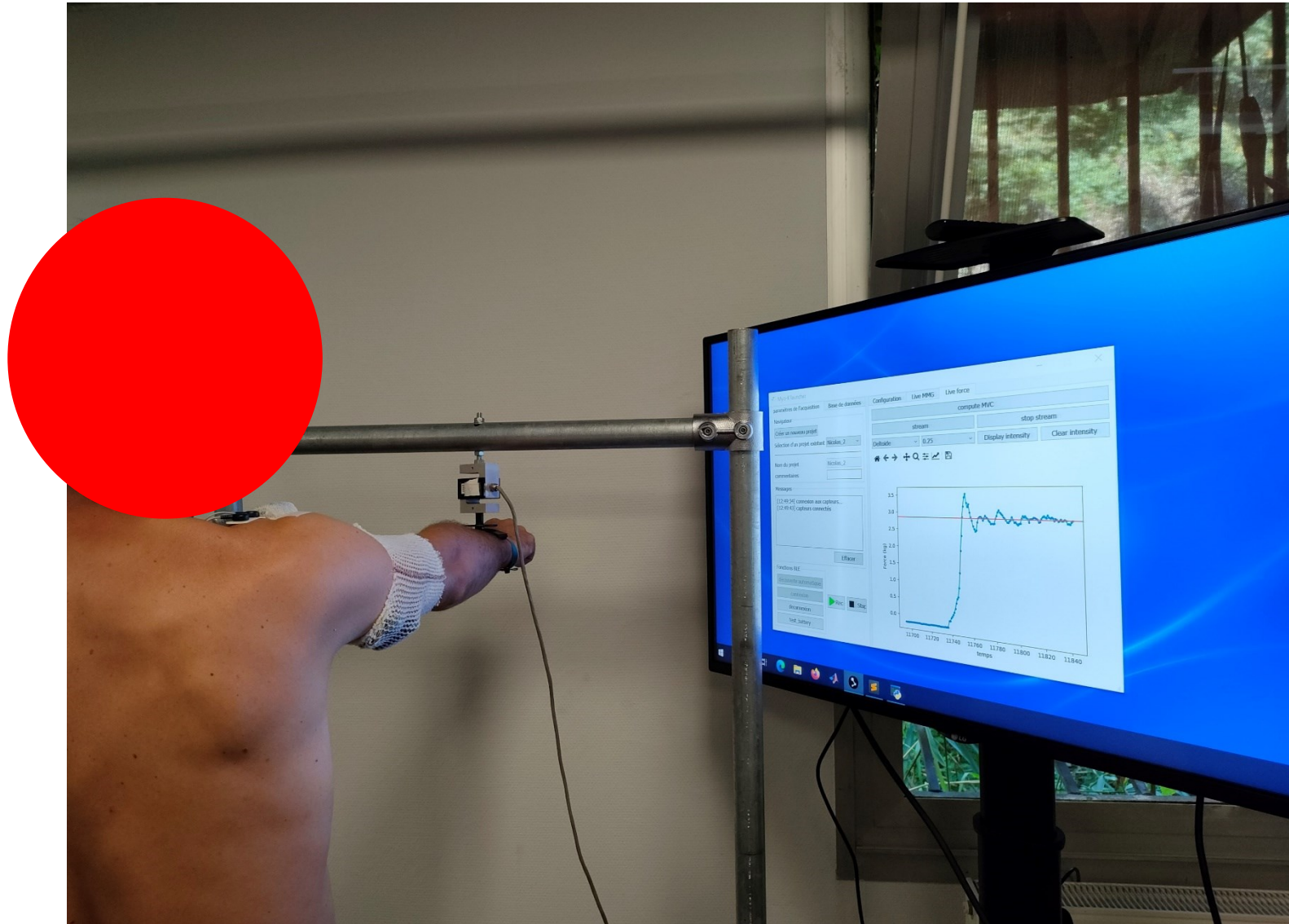


Etudier la fatigue musculaire au regard des deux mesures.



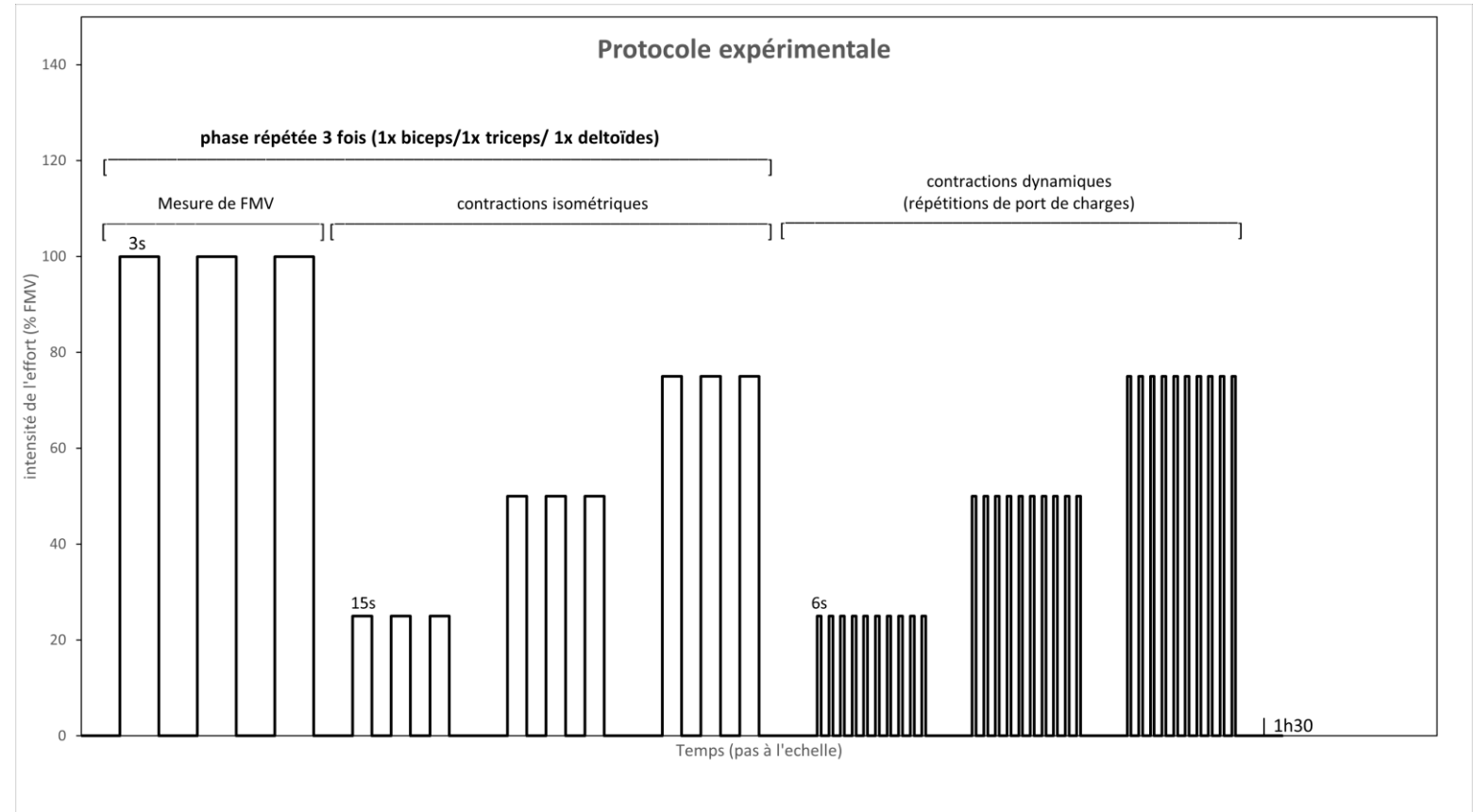
Proposer des outils concrets de détection et de prédiction de la fatigue musculaire.

# Poste expérimental



# Protocole expérimental

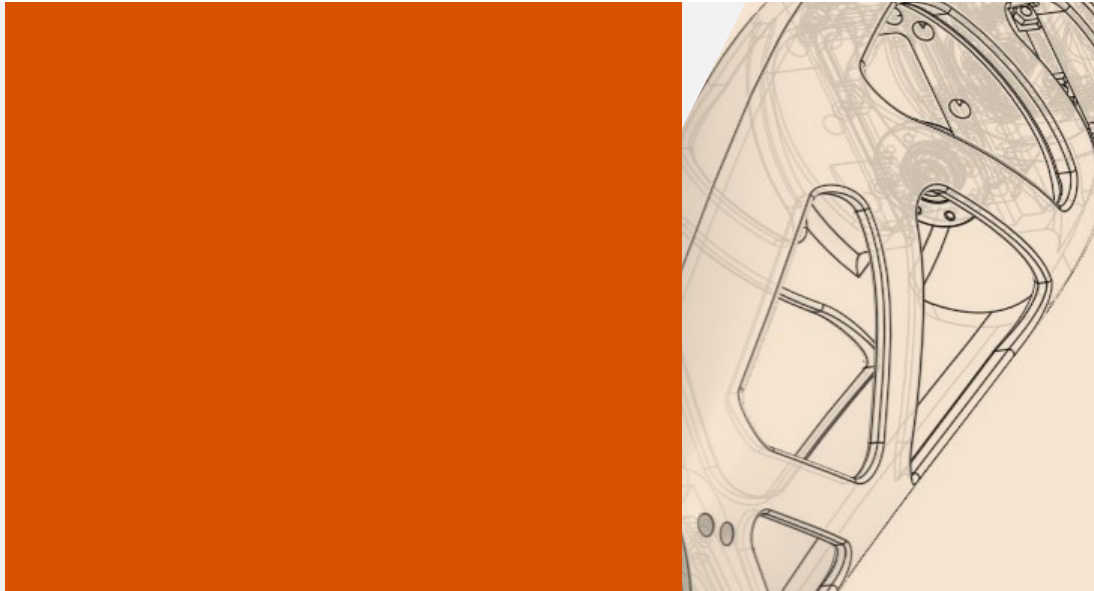
- Muscles et intensités sélectionnés de façon randomisée.
- Feed-back visuel de la force en temps réel pendant les contractions isométrique sous-maximales.
- Contractions dynamiques sont cadencées et la technique est imposée.



# Etude de l'impédance du bras pendant l'exécution d'un mouvement cyclique et frappe de balle



# COMMANDE BIO-INSPIREE DE ROBOT POUR DES TACHES RYTHMIQUES EN INTERACTION AVEC L'ENVIRONNEMENT



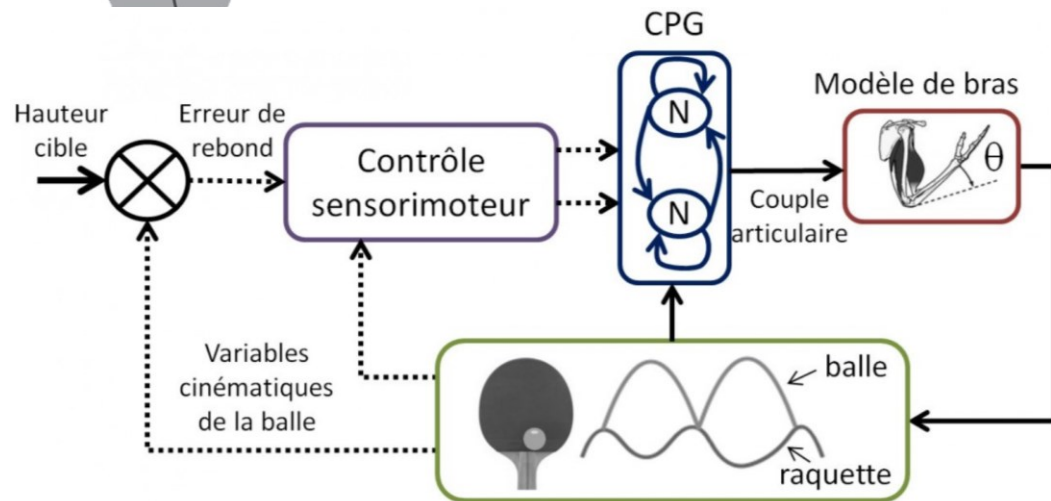
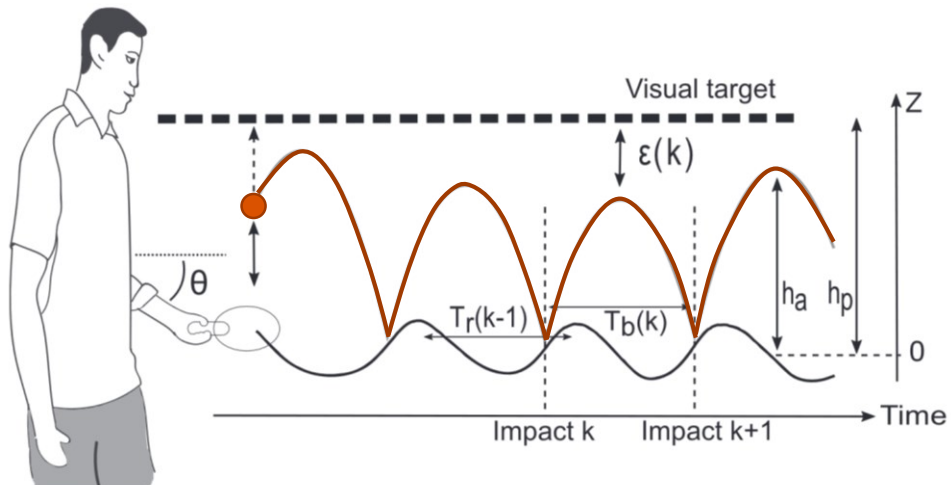
Thèse de Vincent FORTINEAU

Encadrement

Maria MAKAROV (L2S)  
Pedro RODRIGUEZ-AYERBE (L2S)  
Isabelle SIEGLER (CIAMS)



# Mouvements rythmiques bio-inspirés



- Thèse, AVRIN (2017)
  - « *Central Pattern Generator* » (CPG)
  - Tâche de jonglerie
  - Contrôle visuel
- Expériences, SIEGLER (2013)
  - Environnement virtuel

- Oscillateur neuronal de Matsuoka (CPG)
  - Génération de signaux rythmiques non linéaires
  - Asservissement par position et vitesse de la balle

# Interactions physiques avec l'environnement



- Balle pesante (masse négligée précédemment)
- Réaction du bras / raquette
- Commande bio-inspirée pour robot



Comment se comporte le membre supérieur lors d'une interaction physique avec un environnement ?

## Définitions de l'impédance

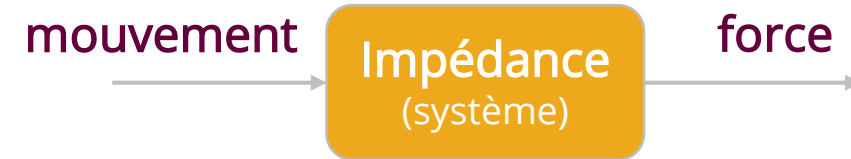
Capacité à résister à un mouvement

Éléments caractéristiques :

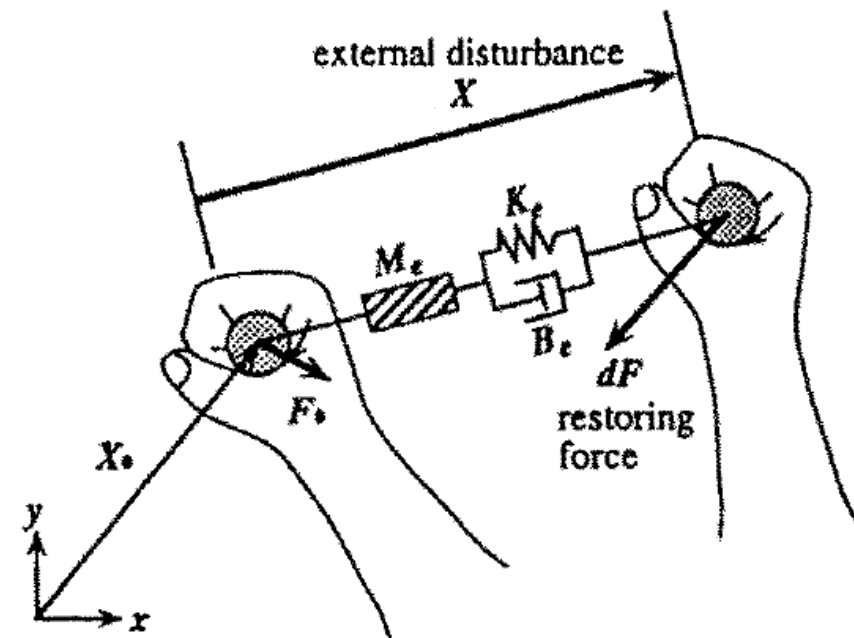
- Raideur ( $K_e$ )
- Amortissement ( $B_e$ )
- Inertie ( $I$  ou  $M_e$ )

$$F(t) = I(t)\ddot{x}(t) + B(t)\dot{x}(t) + K(t)x(t)$$

Equation de l'impédance, modèle KBI linéarisé pour de petits déplacements autour d'un point d'équilibre

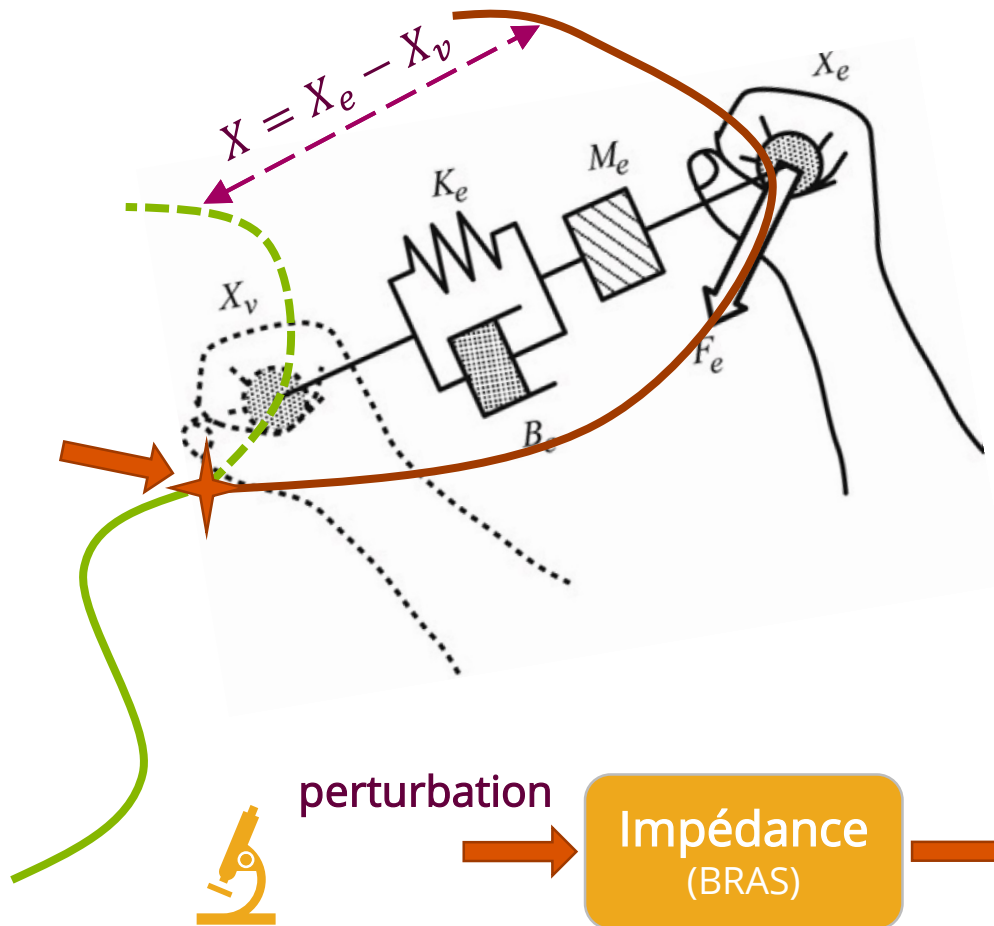


Systèmes physiques, Hogan (1985)



Tsuji (1997)

## Méthodes d'estimation de l'impédance



- Comportement en impédance
  - Propriétés viscoélastiques
  - Réflexes (>25ms, < 100ms)
  - **Actions volontaires** (> 100ms)



- Trajectoire non perturbée
- Faibles perturbations (< 5N)
- Fatigue, ...

## Variation des paramètres d'impédance

- Environnement
- Utilisateur
- Expérience
  - Apprentissage, Burdet & al (2001)
  - Expertise, Erden & Billard (2015)
- Tâche (Isométrique, Cyclique...)
- Durant la tâche
  - Préparation impact, Tsuji & Tanaka (2008)
- ...

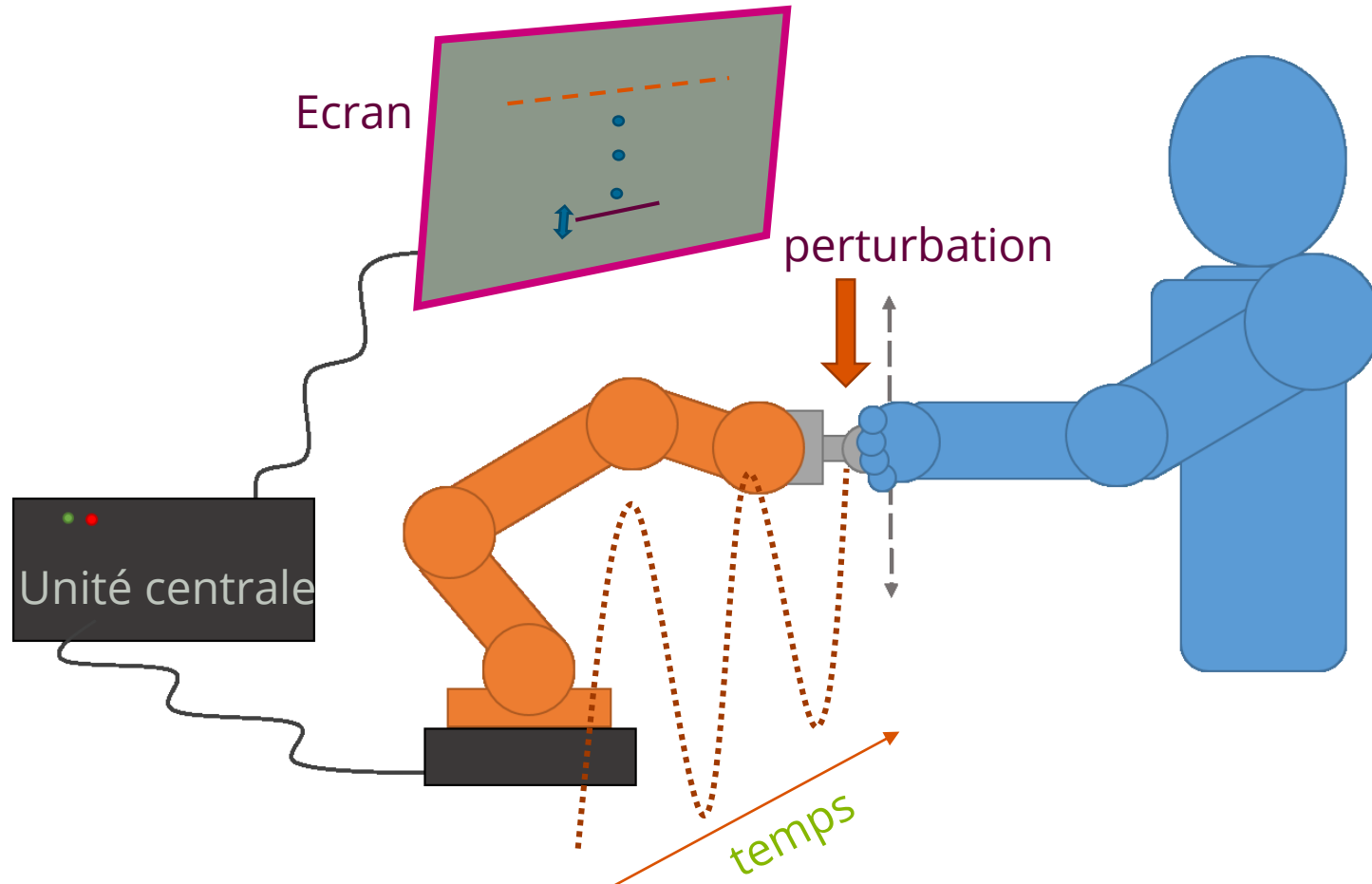


Observe-t-on des variations des paramètres d'impédance au cours de la frappe cyclique ?



Quels avantages procurent ces variations ?

# Méthodologie expérimentale

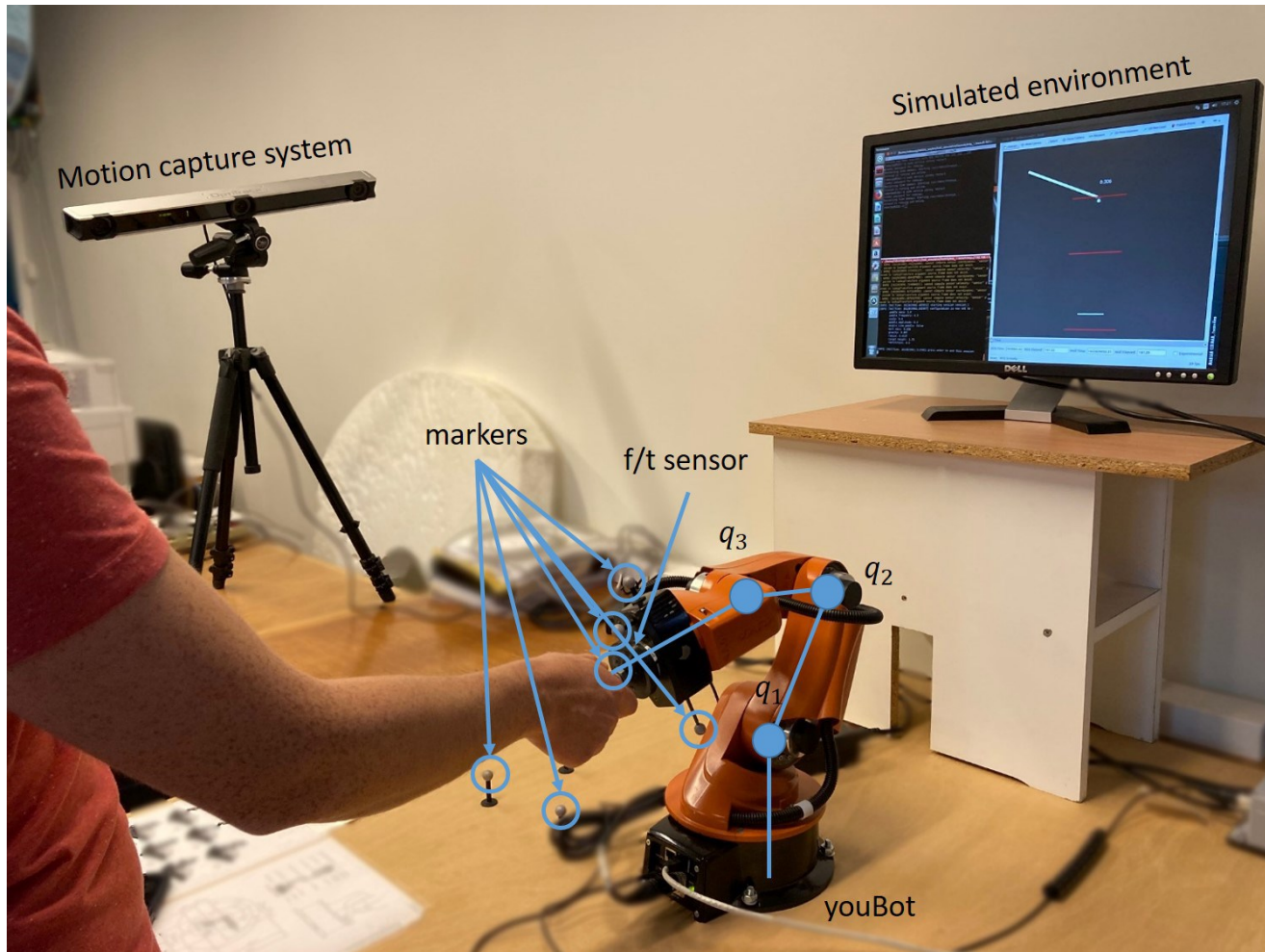


Robot  
« transparent »

Perturbations  
en force (5N)

Tâche guidée :  
- 3 articulations  
actionnées

# Méthodologie expérimentale



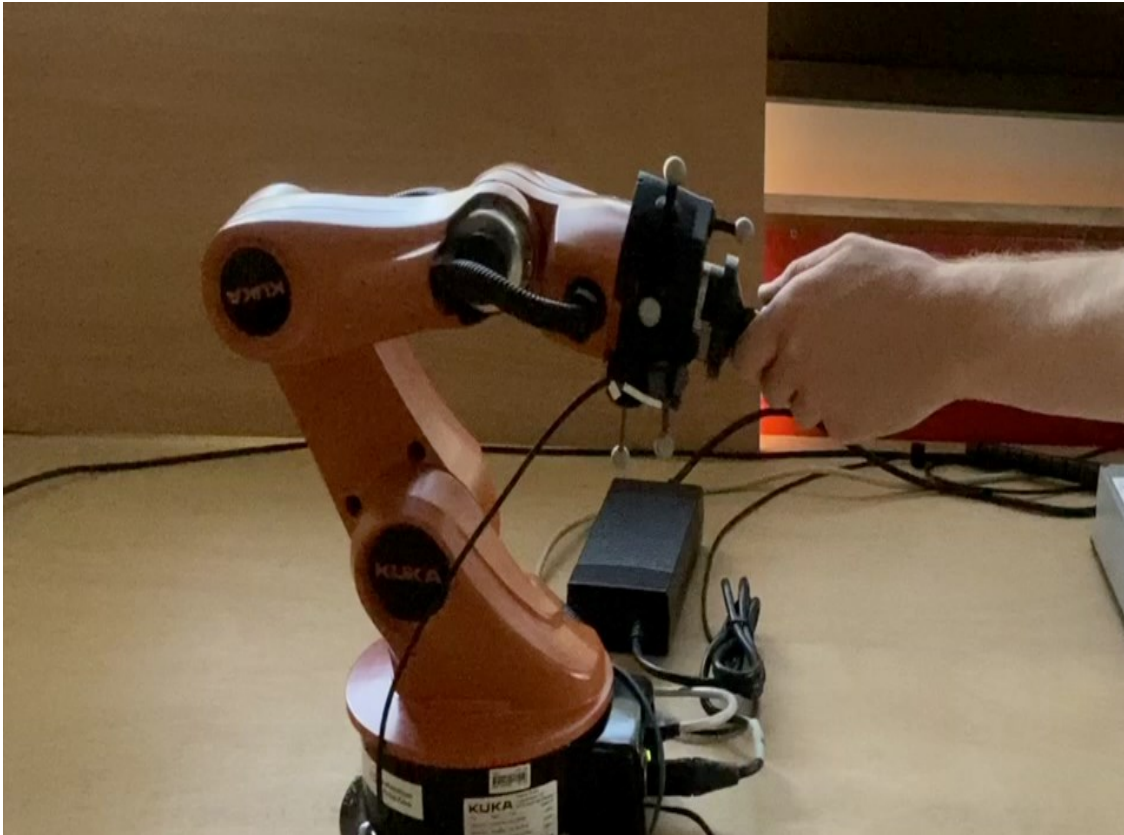
Robot  
« transparent »

Perturbations  
en force (5N)

Tâche guidée :  
- 3 articulations  
actionnées



# Méthodologie expérimentale

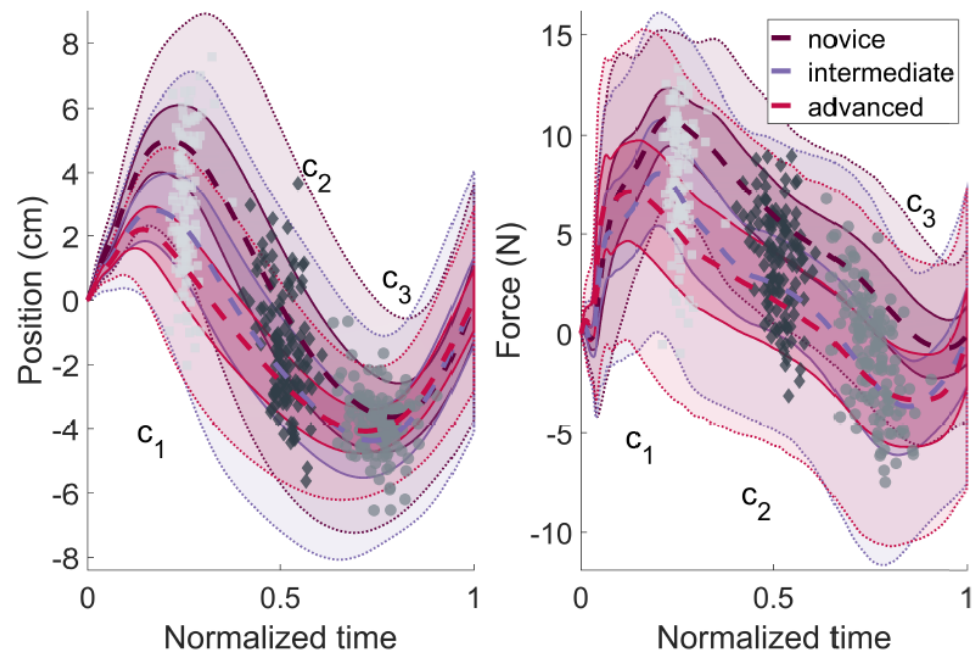


Robot  
« transparent »

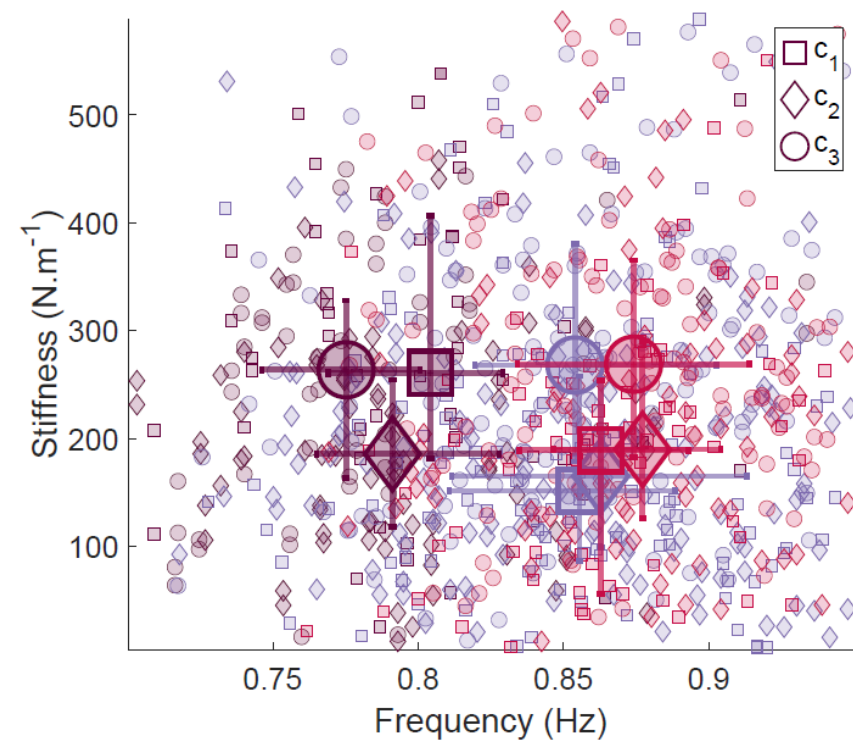
Perturbations  
en force (5N)

Tâche guidée :  
- 3 articulations  
actionnées

# Résultats préliminaires



Average and standard, position and force cycles for a participant of each expertise



Estimated stiffness against cycle frequency, colours indicate the expertise, and marker shapes the phase. The bars and bigger markers indicate the quartiles.

# Exosquelettes : outils pour étudier la motricité humaine

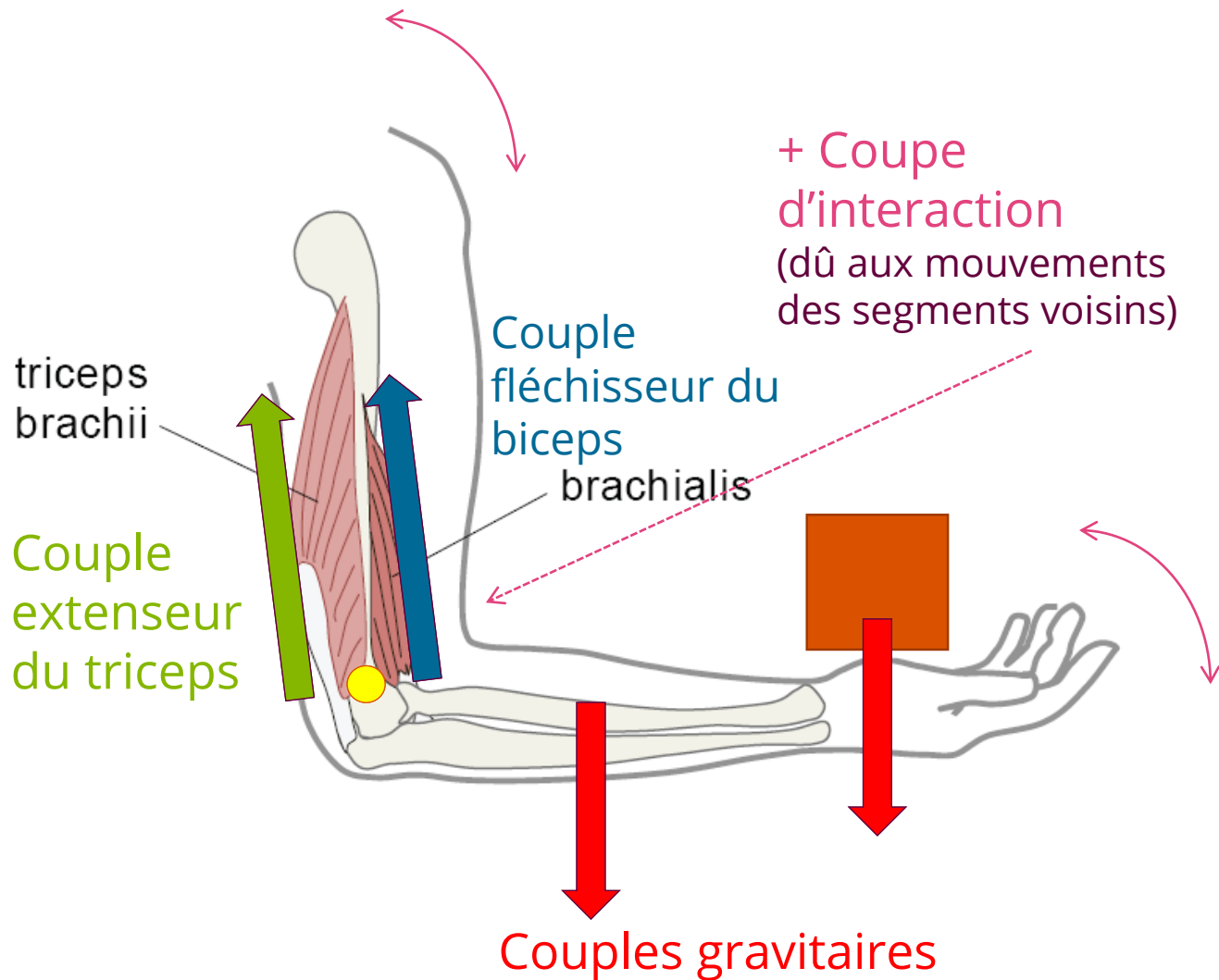
Thèse de Simon Bastide (Juin 2021)

*Adaptation du mouvement humain à de nouvelles dynamiques gravito-inertielles induites par l'interaction avec un exosquelette de membre supérieur actionné*

Sous la direction de Bastien Berret et Nicolas Vignais  
Collaboration avec le CEA-LIST



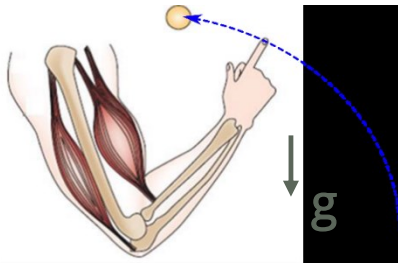
# Production du mouvement humain



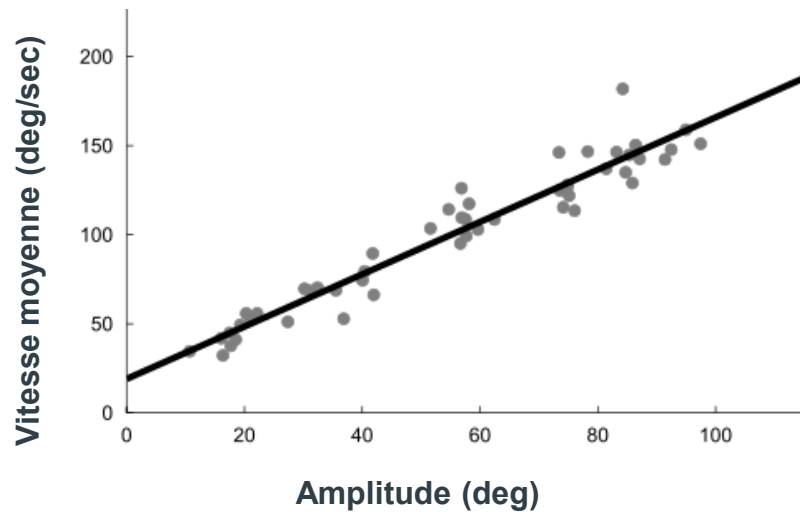
- Complexité de la *dynamique* des système poly-articulés
- Multiplicité des organes sensoriels
- Redondance des degrés de liberté

Comment est-ce que le cerveau « gère » cette complexité ?

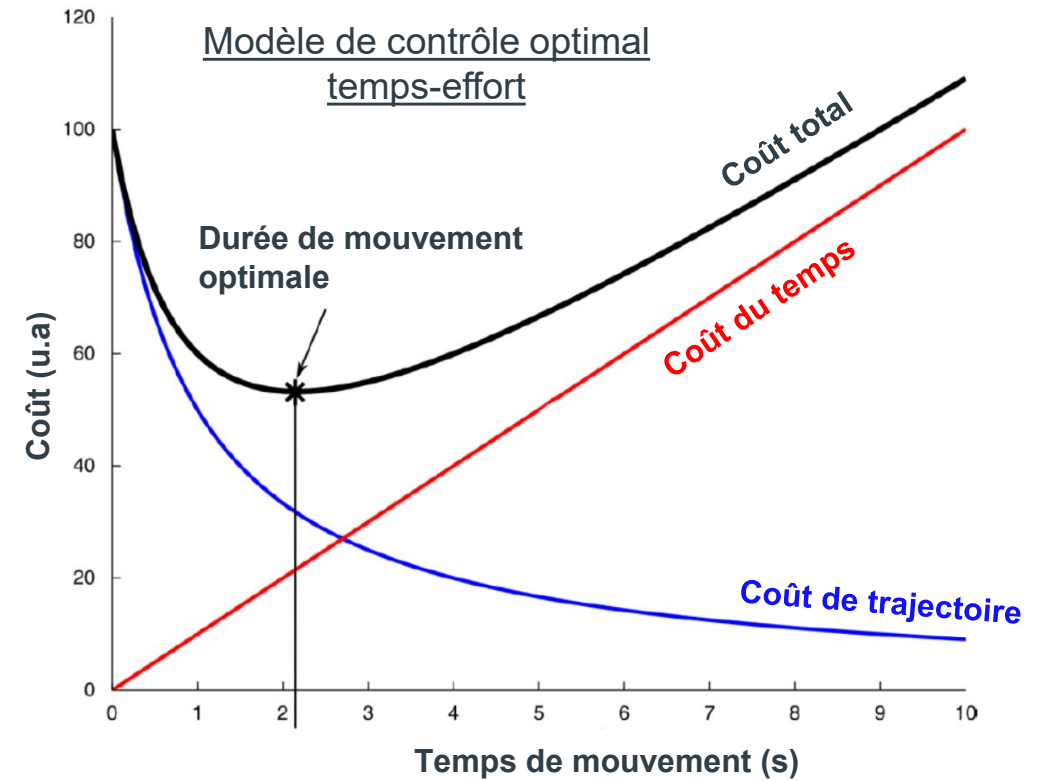
# Lois du contrôle moteur humain



## Relation Vitesse Amplitude



Berret, Castanier, Bastide, Deroche, 2018  
In : Scientific reports



Choi et al. 2014  
Berret et al. 2016

# Exosquelettes

Prévention, réhabilitation, assistance

## Troubles Musculo-Squelettiques (TMS)

1<sup>e</sup> maladie professionnelle reconnue en France (INRS, 2015)

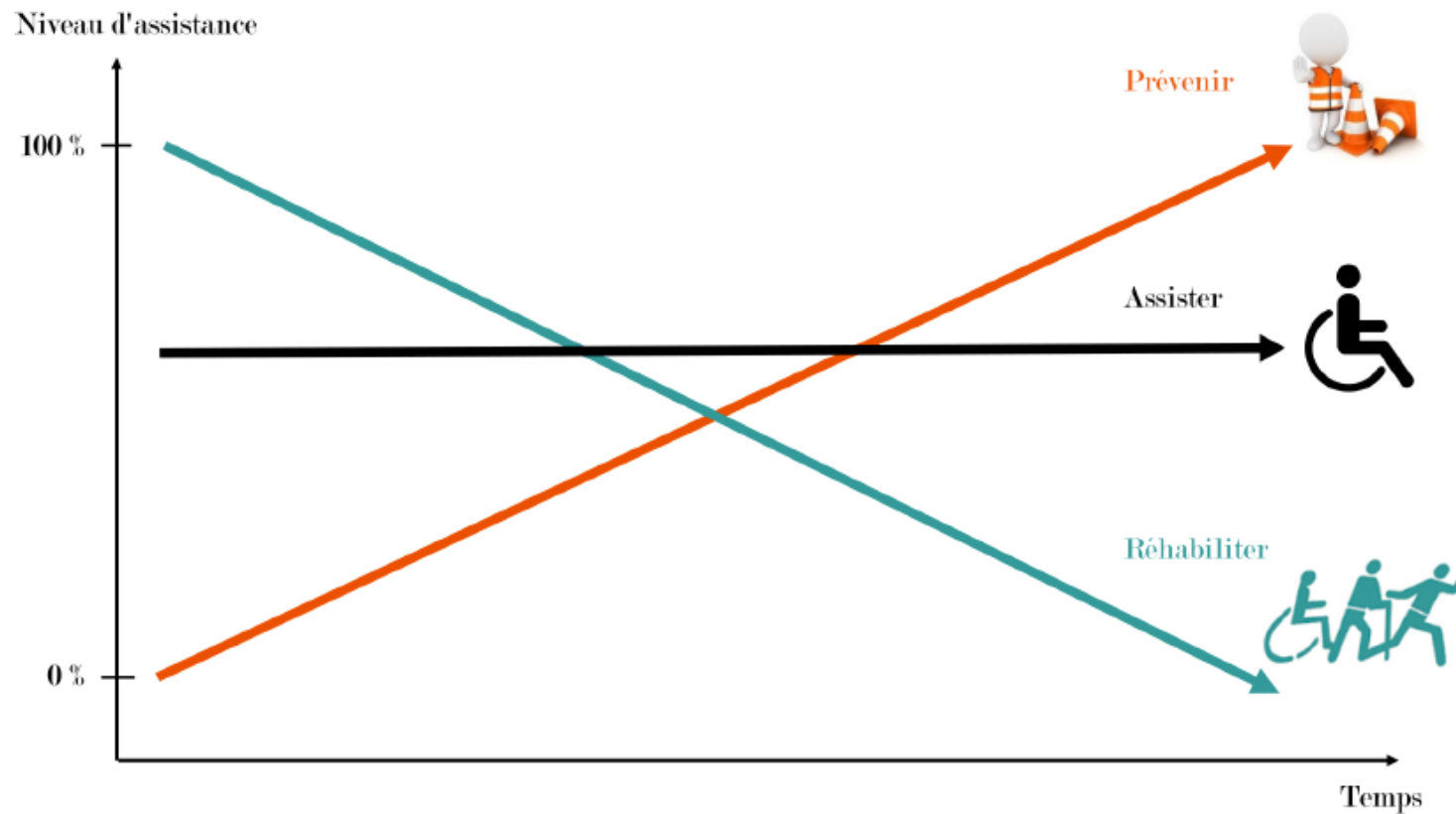


## Accidents vasculaires cérébraux (AVC)

1<sup>e</sup> cause de handicap moteur chez l'adulte (INSERM, 2013)



## Evolution du niveau d'assistance en fonction du temps, selon les applications



Actuellement : Pas de consensus sur la présence de bénéfices à l'usage d'un exo-squelette.

Modes :

Transparent

Antigravitaire

Pas de modification  
de la motricité des  
utilisateurs



Efforts  
d'interaction  
nuls

Compensation du  
poids du bras de  
l'utilisateur



Efforts liés à la  
gravité  
annulés

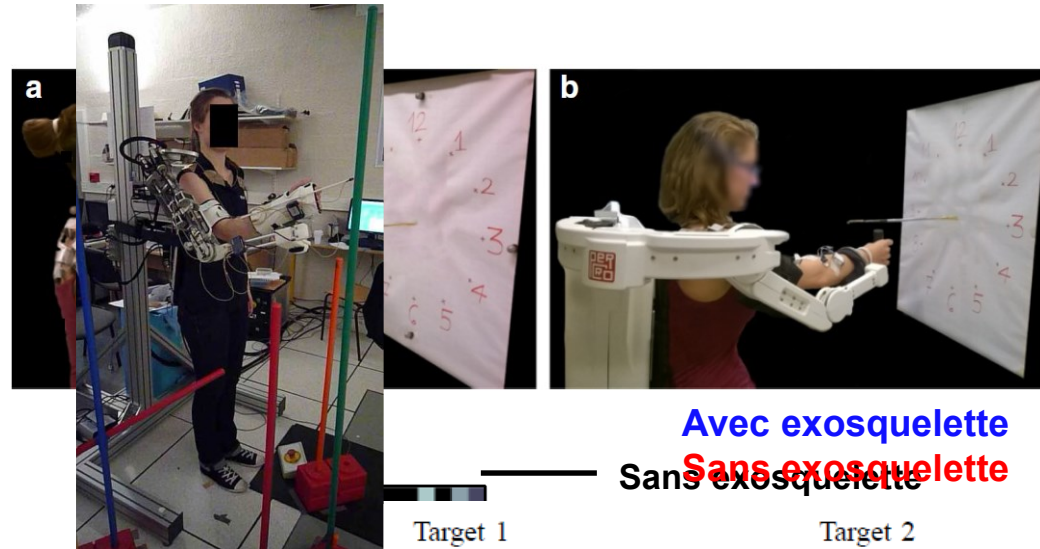


Transparent

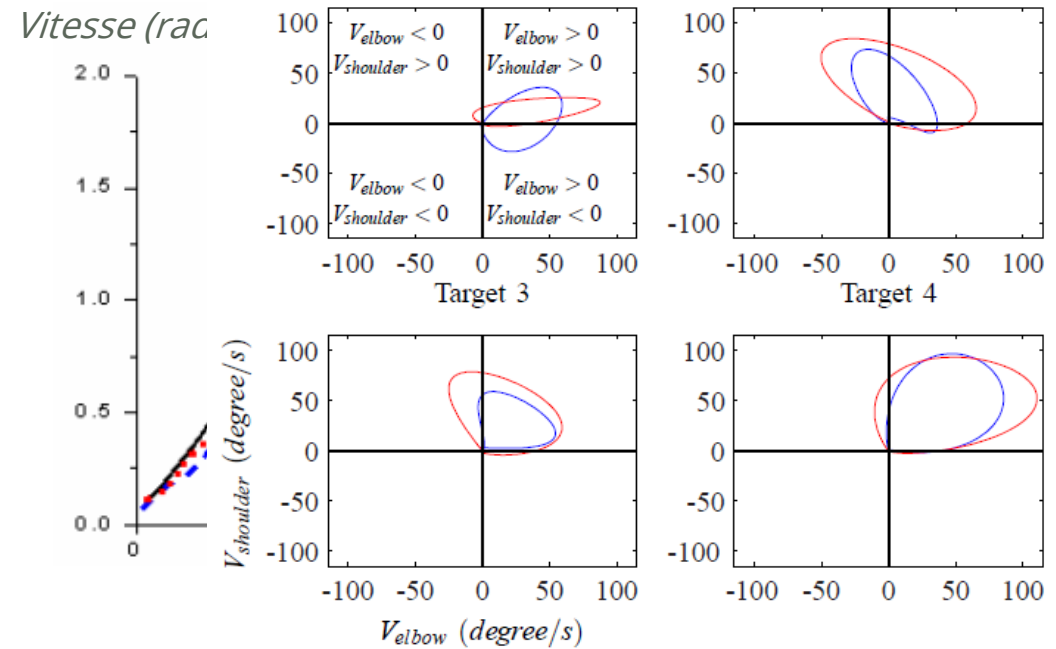


## Modification de la motricité

- *Coordination musculaire*  
*Pirondini et al. 2016*
- *Cinématique de l'effecteur terminal*  
*Jarrassé et al. 2008*
- *Coordination articulaire*  
*Jarrassé et al. 2010*



Avec exosquelette  
Sans exosquelette



Transparent



Modification de la motricité

- *Coordination musculaire*  
*Pirondini et al. 2016*
- *Cinématique de l'effecteur terminal*  
*Jarrassé et al. 2008*
- *Coordination articulaire*  
*Jarrassé et al. 2010*



Difficultés méthodologiques  
Nombreux degrés de liberté (ddl)

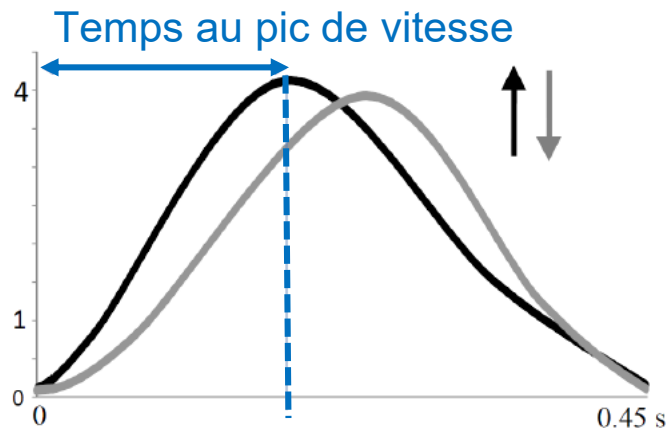
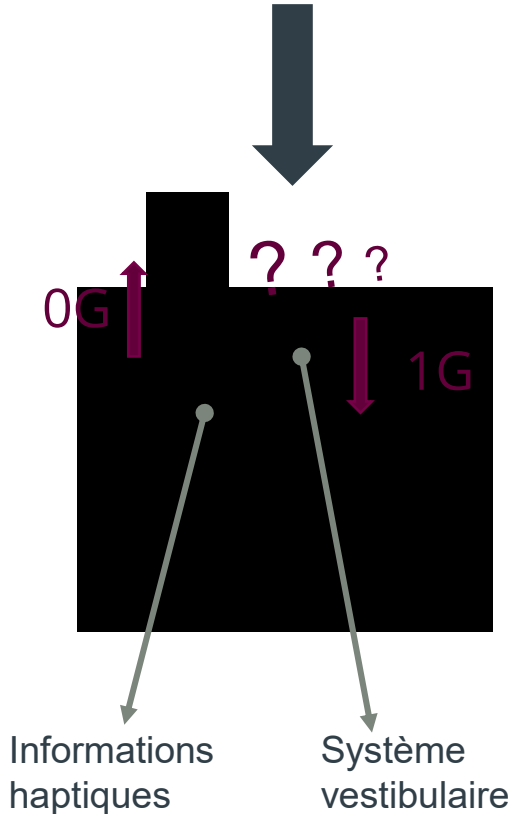
Le plus transparent possible

Forces d'interaction non nulles

- Estimation des paramètres
- Hyperstatisme
- **Inertie** (*Colgate et al. 1989, Geffard et al. 2000b*)

Evaluer → Comprendre → Améliorer

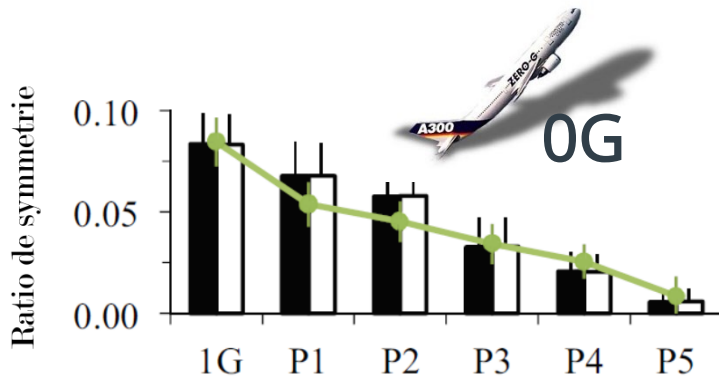
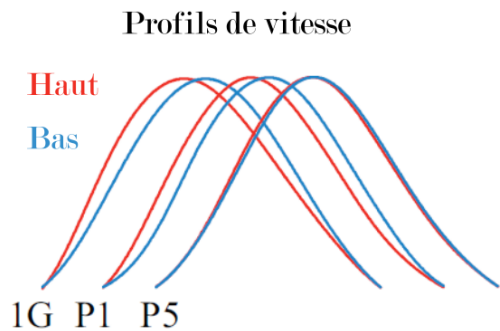
# Antigravitaire



## Asymétries directionnelles des profils de vitesse

*Papaxanthis et al. 1998b*  
*Berret et al. 2008*  
*Gaveau et al. 2021*

## Utilisation optimale de la gravité dans le contrôle des mouvements



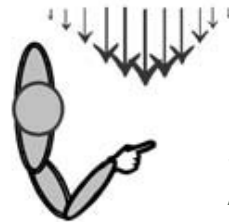
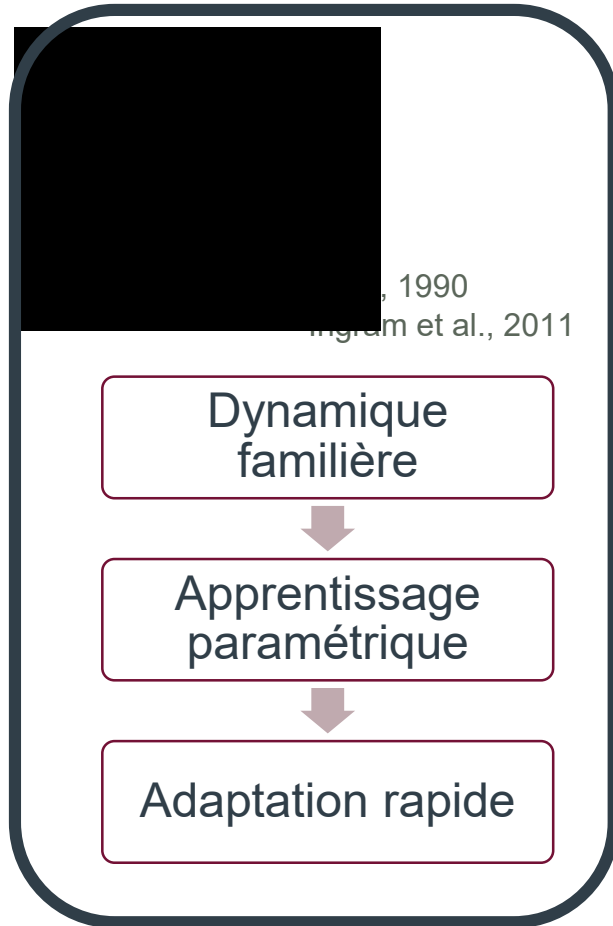
*Gaveau et al. 2016*

## Rôle des informations haptiques et vestibulaires ?

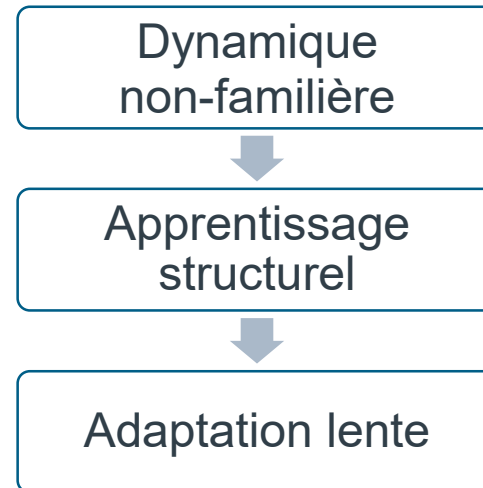
Dynamiques gravito-inertielles induites par l'exosquelette (transparent et antigravitaire)



Adaptation rapide vers des comportements efficaces



Shadmehr et al., 1994  
Arce et al., 2009  
Mistry et al., 2013



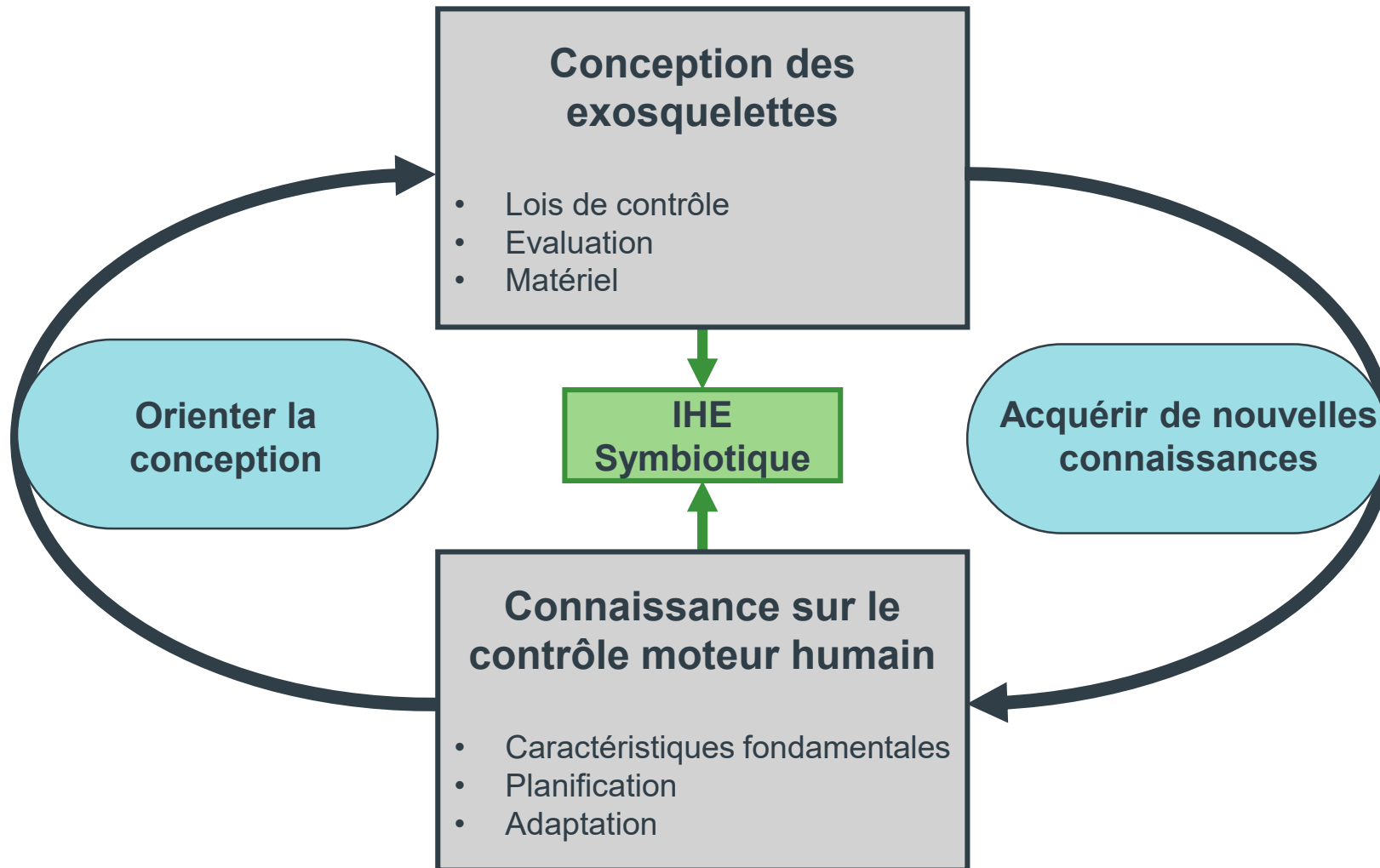
Contrôle dissocié des couples inertiels et gravitaires

Bock 1990  
Zatsiorsky et al. 2005  
Kurtzer et al. 2005



Adaptation sur la base des informations haptiques

Lackner et al. 2005, Bringoux et al. 2012  
Gaveau et al. 2016, Gaveau et al. 2021



**Merci de votre attention !**