

Journée Thématique  
GdR Stic Santé - Thème F  
GdR Robotique - Robotique Médicale  
Exosquelette et Contrôle Moteur  
13 Mars 2013

R. MOREAU<sup>†</sup>, S. MOUBARAK<sup>†</sup>, M.T. PHAM<sup>†</sup>, A.  
FARNE<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> Laboratoire Ampère - UMR CNRS 5005, INSA-LYON, Université de Lyon

<sup>‡</sup> Unité Espace & Action - U864 INSERM, 69676 Bron



# Objectifs

## Intérêt du projet

- ▶ Projet **pluridisciplinaire** entre l'Automatique et les Neurosciences (Laboratoire Ampère - UMR CNRS 5005 et Unité Espace & Action - U864 de l'INSERM)
- ▶ Proposer un nouvel outil pour l'exosquelette **transparent** à l'utilisateur
- ▶ Utiliser l'exosquelette pour des expériences **psychophysiques**

# Présentation de l'exosquelette



# Compensation de la gravité

$$\Gamma = A(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + Q(q) + F_s \text{sign}(\dot{q}) + F_v \dot{q}$$

avec :

- ▶  $\Gamma$  le torseur des efforts dans les liaisons ;
- ▶  $A$  la matrice d'inertie du robot ;
- ▶  $C$  la matrice des efforts centrifuges et de Coriolis ;
- ▶  $Q$  l'action de la gravité ;
- ▶  $F_s$  et  $F_v$  les frottements secs et visqueux ;
- ▶  $q$ ,  $\dot{q}$  et  $\ddot{q}$  la position, la vitesse et l'accélération des variables articulaires.

⇒ Il faut donc calculer  $Q(q)$  et l'appliquer aux articulations en temps réel pour compenser l'effet de la gravité.

# Compensation de la gravité

La compensation de la gravité nécessite :

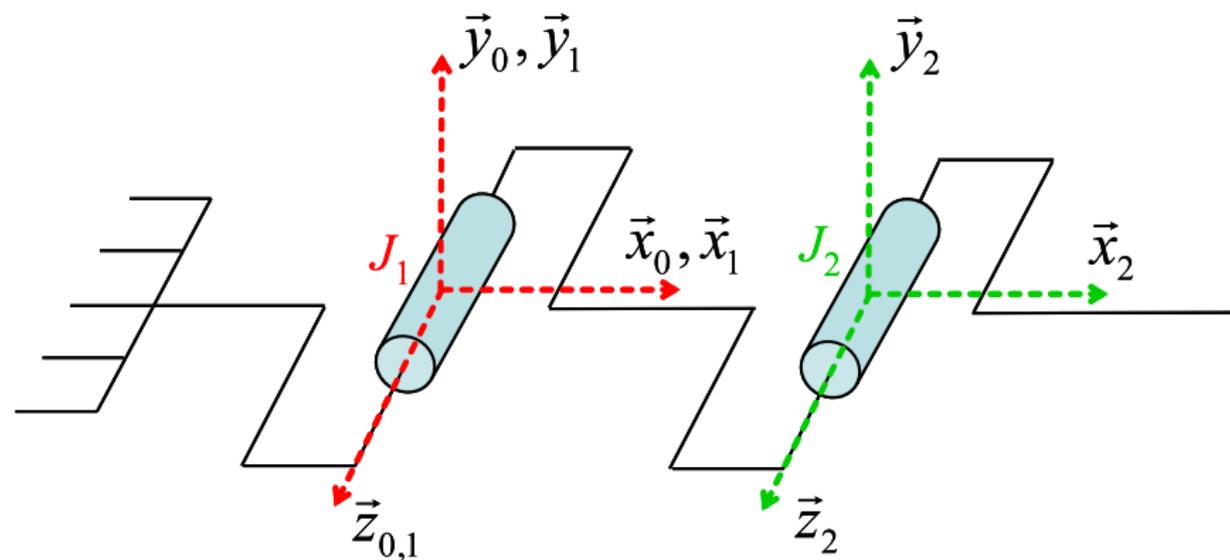
- ▶ soit un système passif (ressorts, poulies, *etc.*)
- ▶ soit une identification précise des paramètres dynamiques (inertie, position centre d'inertie, *etc.*)
- ▶ soit faire de nombreuses hypothèses simplificatrices.

Ne connaissant pas précisément le modèle dynamique du robot, une **méthode originale a été développée**<sup>[1]</sup>. Celle-ci repose sur le modèle géométrique du robot et peut s'appliquer à tous les robots en série.

[1] Moubarak S., Pham M.T., Moreau R, and Redarce T. Gravity Compensation of an Upper Extremity Exoskeleton, *IEEE EMBC International Conference*, pages 4489-4493, Buenos Aires, Argentina, Aug 31- Sept 04, 2010

# Compensation de la gravité

Exemple sur un robot simple



# Compensation de la gravité

## Principe

1. Soient  $g_{x_2}$  et  $g_{y_2}$  les projections du vecteur  $\vec{g}$  sur  $\vec{x}_2$  et  $\vec{y}_2$  ;
2. Les couples  $\Gamma_{x_2}$  et  $\Gamma_{y_2}$  à appliquer à l'articulation 2 doivent être les opposés de  $g_{x_2}$  et  $g_{y_2}$  respectivement ;
3. Il existe une relation proportionnelle entre ces valeurs ;
4. Si une expression de  $\Gamma_{x_2}$  est connue pour une position particulière, il est possible de connaître  $\Gamma_{x_2}$  quelle que soit la position par simple projection.
5. De même pour  $\Gamma_{y_2}$

# Compensation de la gravité

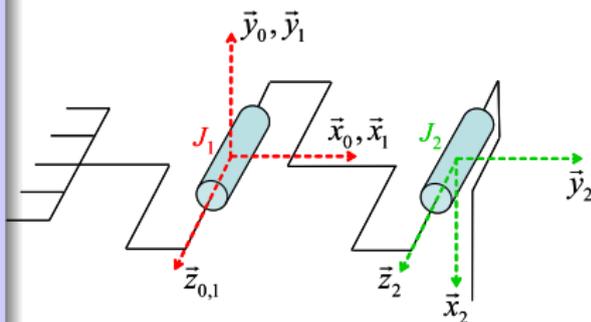
## Estimation de $\Gamma_{x_2}$

1. Soit  $C_1$  le couple mesuré sur l'articulation 2
2. Pour cette position, on connaît la valeur de  $g_{x_2}$  :

$$g_{x_2} = \|\vec{g}\|$$

3. et ainsi, on peut connaître  $\Gamma_{x_2}$  :

$$\Gamma_{x_2} = -C_1 \frac{g_{x_2}}{\|\vec{g}\|}$$



# Compensation de la gravité

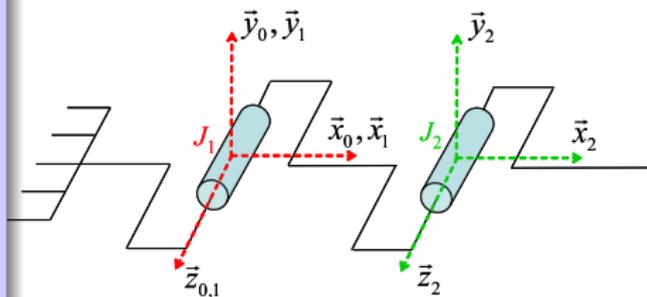
## Estimation de $\Gamma_{y_2}$

1. Soit  $C_2$  le couple mesuré sur l'articulation 2
2. Pour cette position, on connaît la valeur de  $g_{y_2}$  :

$$g_{y_2} = -\|\vec{g}\|$$

3. et ainsi, on peut connaître  $\Gamma_{y_2}$  :

$$\Gamma_{y_2} = -C_2 \frac{g_{y_2}}{-\|\vec{g}\|} = C_2 \frac{g_{y_2}}{\|\vec{g}\|}$$

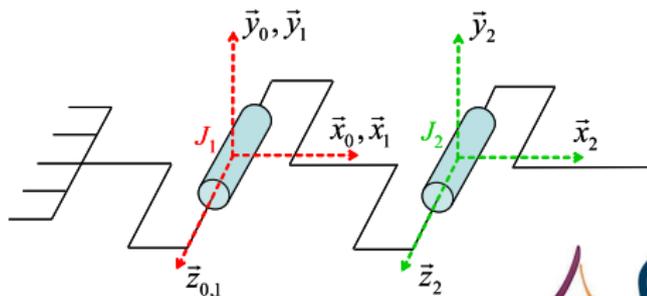
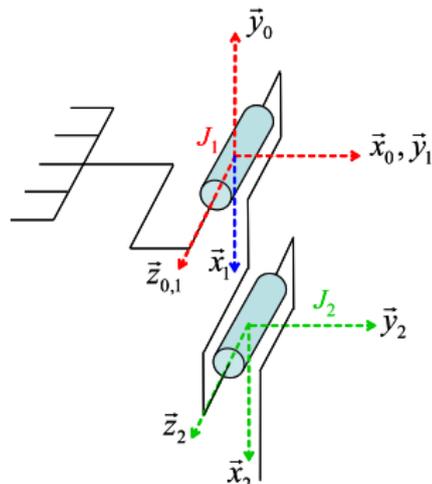


# Compensation de la gravité

## Estimation de $\Gamma_{x_1}$ et de $\Gamma_{y_1}$

1. Soit  $C_3$  (respectivement  $C_4$ ) le couple mesuré sur l'articulation 1 quand  $\vec{x}_1$  est vertical descendant (respectivement  $\vec{y}_1$  vertical ascendant)
2. On peut déterminer  $\Gamma_{x_1}$  et  $\Gamma_{y_1}$  :

$$\begin{cases} \Gamma_{x_1} = \left( -C_3 + C_1(1 - \cos(q_2)) - C_2 \sin(q_2) \right) \frac{g_{x_1}}{\|\vec{g}\|} \\ \Gamma_{y_1} = \left( C_4 - C_2(1 - \cos(q_2)) - C_1 \sin(q_2) \right) \frac{g_{y_1}}{\|\vec{g}\|} \end{cases}$$

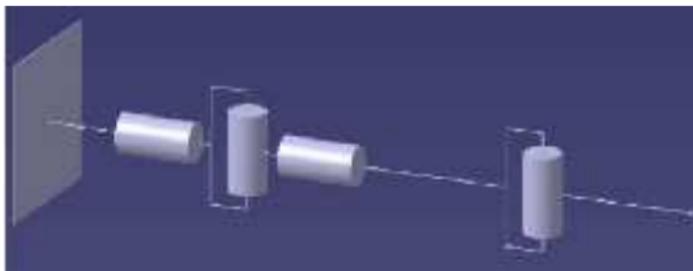


# Compensation de la gravité

**La complexité de cette méthode augmente avec le nombre d'articulations du robot.** Cependant elle peut être généralisée dans les cas suivants :

- ▶ Toutes les articulations sont des rotoïdes ;
- ▶ La première articulation liée à la base est soit horizontal soit vertical ;
- ▶ Deux articulations consécutives sont soit parallèles soit orthogonales ;
- ▶ L'articulation  $J_i$  peut être placée horizontalement et l'espace de travail du robot permet de placer les axes  $\vec{x}_i$  et  $\vec{y}_i$  verticalement.

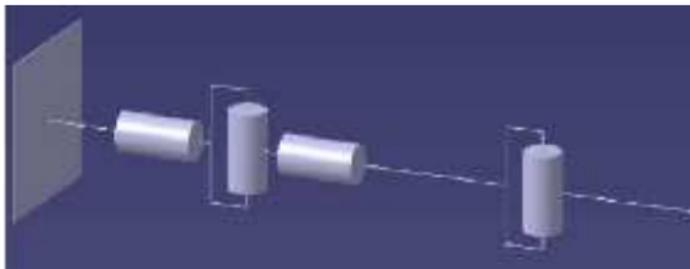
# Compensation de la gravité



## Application à l'exosquelette

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma_4 = - \left( \frac{g_{x4}}{\|\vec{g}\|} C_1 + \frac{g_{y4}}{\|\vec{g}\|} C_2 \right) \\ \Gamma_3 = - \left( \frac{g_{x3}}{\|\vec{g}\|} C_3 + \frac{g_{y3}}{\|\vec{g}\|} (C_4 - C_2 + C_2 \cos(q_4) + C_1 \sin(q_4)) \right) \\ \Gamma_2 = - \left( \frac{g_{x2}}{\|\vec{g}\|} (C_5 + C_1(\cos(q_4) - 1) - C_2 \sin(q_4)) + \frac{g_{y2}}{\|\vec{g}\|} (C_6 - C_4 + C_3 \sin(q_3)) \right. \\ \quad \left. + (C_4 - C_2) \cos(q_3) + C_2 \cos(q_4) \cos(q_3) + C_1 \sin(q_4) \cos(q_3)) \right) \end{array} \right.$$

# Compensation de la gravité



## Application à l'exosquelette

$$\Gamma_1 = \begin{pmatrix} \frac{g_{x1}}{\|g\|} \begin{pmatrix} C_7 - C_3(\cos(q_3) - 1) \\ -(C_4 - C_2)\sin(q_3) \\ -C_2 \cos(q_4)\sin(q_3) \\ -C_1 \sin(q_4)\sin(q_3) \end{pmatrix} \\ + \frac{g_{y1}}{\|g\|} \begin{pmatrix} C_8 - C_6 + (C_6 - C_4)\cos(q_2) \\ +(C_5 - C_1)\sin(q_2) \\ +(C_4 - C_2)\cos(q_3)\cos(q_2) \\ +(C_3 \sin(q_3)\cos(q_2) \\ -C_1 \cos(q_4)\sin(q_2) \\ +C_1 \sin(q_4)\cos(q_3)\cos(q_2) \\ -C_2 \sin(q_2)\sin(q_4) \\ +C_2 \cos(q_2)\cos(q_3)\cos(q_4) \end{pmatrix} \end{pmatrix}$$

# Compensation de la gravité

## Application à l'exosquelette

Avec

- ▶  $C_1$  le couple mesuré sur  $J_4$  pour  $q = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$
- ▶  $C_2$  le couple mesuré sur  $J_4$  pour  $q = \left[0 \ -\frac{\pi}{2} \ 0 \ 0\right]^T$
- ▶  $C_3$  le couple mesuré sur  $J_3$  pour  $q = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$
- ▶  $C_4$  le couple mesuré sur  $J_3$  pour  $q = \left[0 \ 0 \ -\frac{\pi}{2} \ 0\right]^T$
- ▶  $C_5$  le couple mesuré sur  $J_2$  pour  $q = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$
- ▶  $C_6$  le couple mesuré sur  $J_2$  pour  $q = \left[0 \ -\frac{\pi}{2} \ 0 \ 0\right]^T$
- ▶  $C_7$  le couple mesuré sur  $J_1$  pour  $q = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$
- ▶  $C_8$  le couple mesuré sur  $J_1$  pour  $q = \left[-\frac{\pi}{2} \ 0 \ 0 \ 0\right]^T$

# Compensation de la gravité

- ▶ Validation par rapport à la théorie :

$$Q_j(q) = - \sum_{k=j}^n m_k \tilde{g}^T \frac{\partial T_0^k}{\partial q_j} \vec{r}_k^k$$

- ▶ Validation en simulation à partir d'un modèle de l'exosquelette avec des paramètres de masses fictifs
- ▶ Validation expérimentale à partir d'observations

Possibilité de compenser le poids du bras de l'utilisateur pour simuler l'absence de gravité

# Résultats expérimentaux

Application à l'étude de la **perception du mouvement humain** en partenariat avec "Espace & Action" - U864 de l'INSERM.

## Protocole Expérimental

1. Enregistrement de gestes de saisies d'objets
2. Les trajectoires sont ensuite rejouées
3. Le sujet doit déterminer le but des trajectoires (saisie de tel objet situé dans telle position) et s'il s'agit de ses propres gestes ou pas.

# Résultats expérimentaux

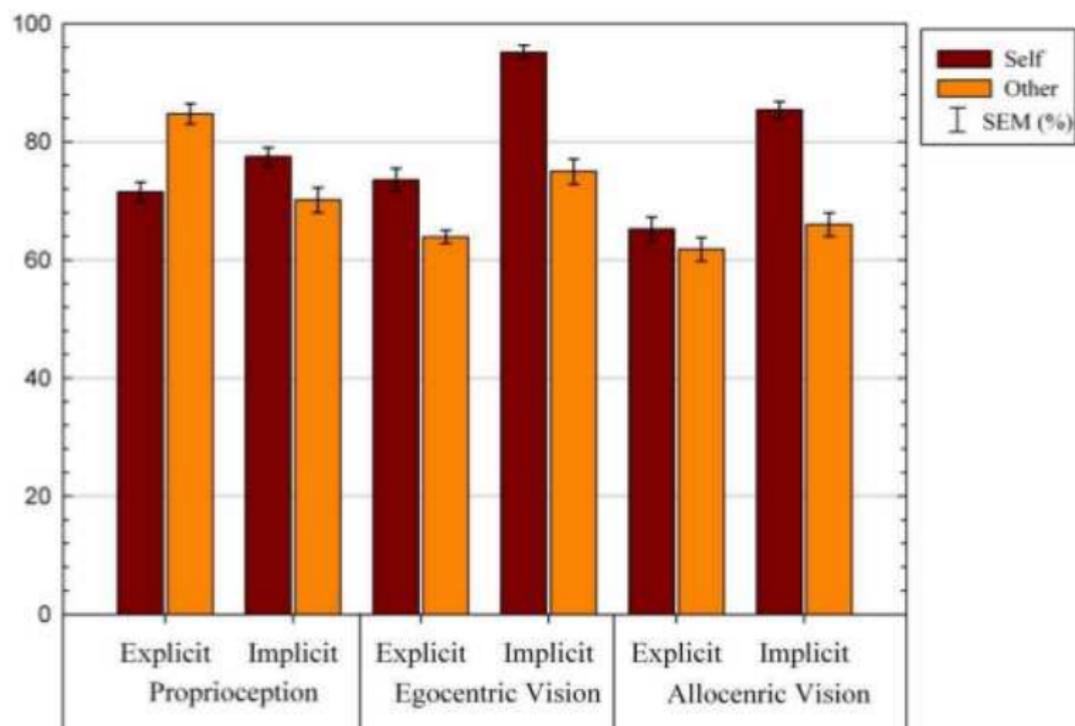
## Protocole Expérimental

- ▶ 3 conditions expérimentales :
  - ▶ Vision allo centrée
  - ▶ Vision ego centrée
  - ▶ Proprioception et les yeux bandés
- ▶ 3 objectifs :
  - ▶ Déterminer la nature de l'objet
  - ▶ Déterminer la position de l'objet
  - ▶ Différencier ses propres gestes de ceux d'autrui
- ▶ 3 groupes de 4 personnes de morphologie similaire réalisent 24 saisies d'objets.

# Résultats expérimentaux

	Soi/Autruï			Position Objet		
	Proprio-ception	Vision egocentrée	Vision allocentrée	Proprio-ception	Vision egocentrée	Vision allocentrée
Total (\24)	<b>18.8</b> (1.66)	<b>16.5</b> (1.62)	<b>15.3</b> (2.38)	<b>17.8</b> (2.3)	<b>20.4</b> (1.78)	<b>18.2</b> (1.9)
Soi (\12)	<b>8.6</b> (1.38)	<b>8.8</b> (1.64)	<b>7.8</b> (1.7)	<b>9.3</b> (1.3)	<b>11.4</b> (1)	<b>10.3</b> (1.14)
Autruï (\12)	<b>10.2</b> (1.47)	<b>7.7</b> (0.89)	<b>7.4</b> (1.67)	<b>8.4</b> (1.78)	<b>9</b> (1.76)	<b>7.9</b> (1.68)

# Résultats expérimentaux



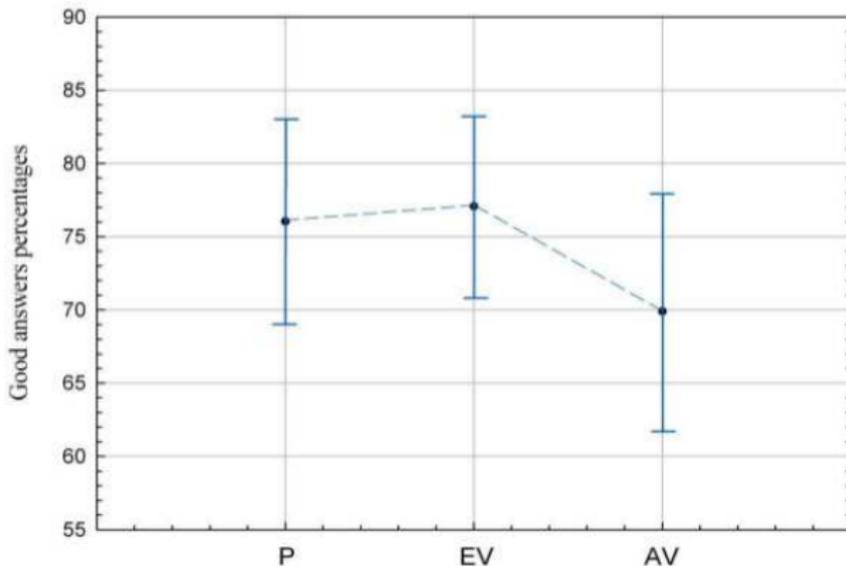
## Etude statistique - ANOVA tests

Etude de 3 effets :

- ▶ Modalité (Proprioception, Vision egocentrée, Vision allocentrée)
- ▶ Type de tâche (Explicite, Implicite)
- ▶ Propriétés (Soi, Autrui)

# Résultats expérimentaux

## Modalité



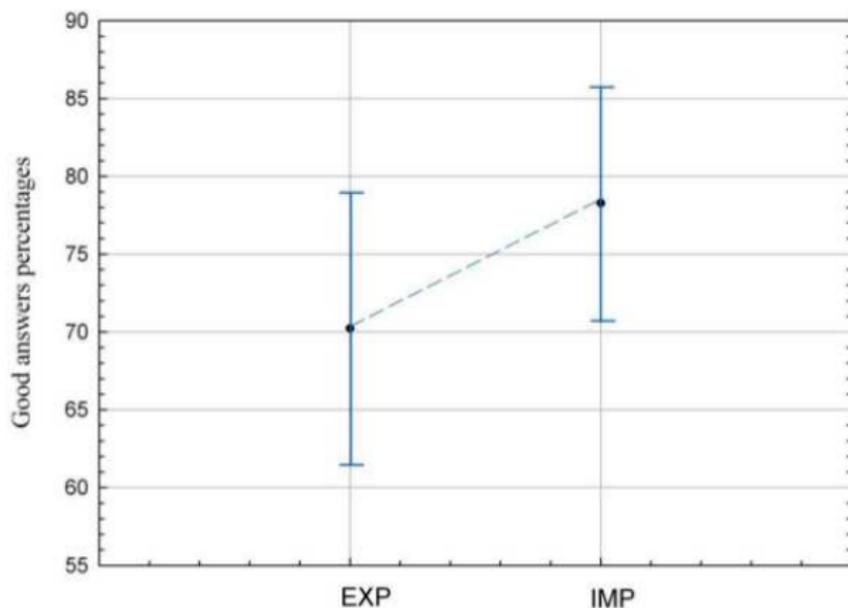
Pas de différence significative entre les modalités P et EV

*Ampère*



# Résultats expérimentaux

## Type de tâches

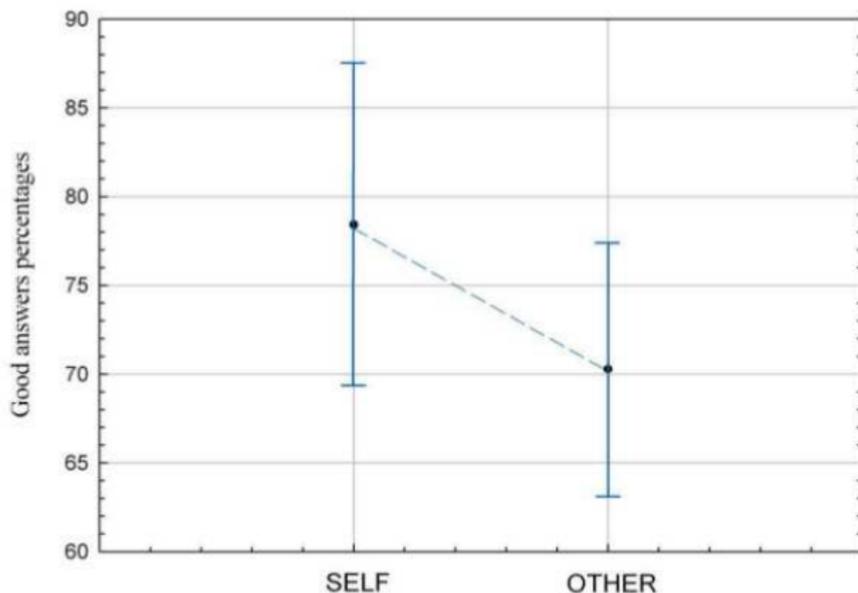


Meilleurs résultats sur les tâches implicites que explicites



# Résultats expérimentaux

## Propriété

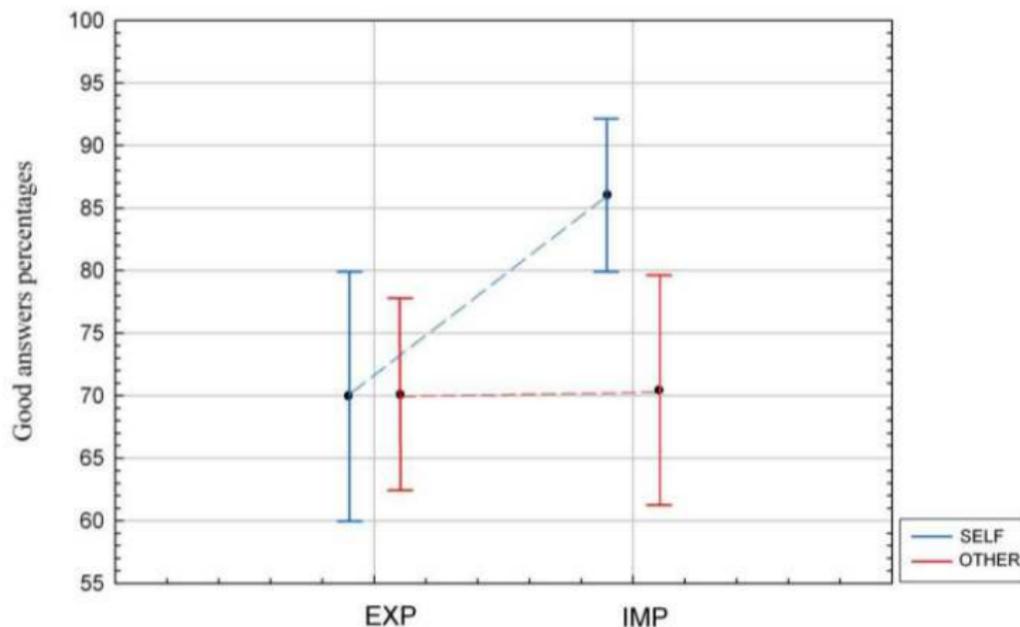


Meilleurs résultats lorsqu'il s'agit de nos propres mouvements



# Résultats expérimentaux

## Etude des interactions - Type de tâche vs Propriété



Meilleurs résultats pour la tâche implicite pour nos gestes

# Résultats expérimentaux

## Interprétations

- ▶ Reconnaissance Soi/autrui
  - ▶ Il est plus facile d'identifier ses propres mouvements dans les conditions de proprioception ou de vision ego centrée ;
  - ▶ Il est plus facile de reconnaître des mouvements qui ne sont pas les nôtres en proprioception.
- ▶ Reconnaissance de la position des objets
  - ▶ D'une manière générale de meilleurs résultats sont obtenus sauf lorsqu'il s'agit des gestes d'autrui en proprioception ;
  - ▶ Lorsqu'il s'agit de ses propres gestes, de meilleurs résultats sont obtenus en vision (quelle qu'elle soit mais surtout en ego centrée) ;
  - ▶ Les meilleurs résultats sont obtenus lorsqu'il s'agit de leurs propres gestes.

# Conclusions et Perspectives

## Bilan

- ▶ Travail en collaboration avec l'INSERM ;
- ▶ application originale pour un exosquelette ;
- ▶ généralisation d'une méthode originale pour la compensation de gravité pour robot série ;
- ▶ Lancement d'une nouvelle campagne de mesure sur la reconnaissance soi/autrui.

Merci de votre attention

