

## Master 2 Sciences Cognitives

---

902 - Neurosciences et cmpt humain - EC Méthodes et outils pour le comportement humain  
Étude de la performance d'un exosquelette passif sur les TMS

---

**Auteurs :**

BIDOU Oscar  
MILON Jean-Baptiste  
SPIRY Thomas

**Encadrant :**

M.CASTERAN  
M.CLAUSEL  
S.IVALDI  
P.MAURICE

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
1.1	Formulation Mathématique du Problème . . . . .	4
1.1.1	Variables et Notations . . . . .	4
1.1.2	Relations Structurelles du Modèle . . . . .	4
1.2	Hypothèses à Tester . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Matériel</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Méthodologie</b>	<b>5</b>
3.1	Matériel . . . . .	5
3.2	Participants . . . . .	5
3.3	Designe Expérimental . . . . .	5
3.4	Variables étudiées du modèle . . . . .	6
3.4.1	Variable indépendantes <b>X</b> . . . . .	6
3.4.2	Variable dépendantes <b>Y</b> . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Résultats</b>	<b>6</b>
4.1	Modèle initial . . . . .	6
4.2	Modèle simplifié . . . . .	7
<b>5</b>	<b>Discussion</b>	<b>10</b>

## Table des figures

1	Modèle initial . . . . .	7
3	MES simplifié . . . . .	9
2	Graphe initial . . . . .	10
4	Graphe simplifié . . . . .	12

## Liste des tableaux

1	Statistiques du test du modèle . . . . .	7
2	Effet latent de l'exosquelette ( $\xi$ ) sur les différences de performance . . . . .	7
3	Estimations des régressions du modèle SEM . . . . .	8
4	Estimations des variances des variables . . . . .	9
5	Statistiques du test du modèle simplifié . . . . .	9
6	Estimation des charges factorielles des variables latentes . . . . .	9
7	Estimations des régressions du modèle SEM simplifié . . . . .	10
8	Estimations des variances des variables simplifiées . . . . .	11

## Résumé

In this study, we quantify how much the exoskeleton Laevo V2.5 impacts low back pain, as well as the perceived strain of a static task. In a procedure aimed at simulating the conditions of a surgeon, we use a SEM to identify which physical variables are more prone to affecting the task. Overall, we find only a slight increase in back strain with the exoskeleton, along with an increase in perceived physical load and overall effort. However, the significant inter-group variance gives us hope for future studies.

## 1 Introduction

De plus en plus régulièrement utilisés dans le monde du travail, que ce soit dans le milieu médical (MILLER, 1956), professionnel (MATHIEU BAGUET, 2023), ou dans la verrerie (BRUNO, 2024), les exosquelettes deviennent incontournables et semblent permettre d'assurer une meilleure productivité. L'assistance qu'ils apportent réduit la fatigue, l'effort et l'inconfort de leurs utilisateurs dans les tâches prolongées dans une position statique.

Il existe deux types d'exosquelette :

**- Exosquelette actif** Un exosquelette actif est équipé de moteurs, capteurs et souvent d'une alimentation électrique pour assister ou amplifier les mouvements. Par exemple, le ReWalk est un exosquelette motorisé conçu pour aider les personnes paraplégiques à marcher en détectant leurs intentions de mouvement. Un autre exemple est le Sarcos Guardian XO, un exosquelette industriel permettant de soulever des charges lourdes avec un effort réduit grâce à une assistance motorisée.

**- Exosquelette passif** Un exosquelette passif ne possède pas de moteurs ni d'électronique ; il fonctionne grâce à des ressorts, des élastiques ou des mécanismes mécaniques pour assister le mouvement. Par exemple, le Laevo V2.5 aide à soulager le dos des travailleurs en transférant la charge du haut du corps vers les jambes. Un autre exemple est le Noonee Chairless Chair, qui permet aux utilisateurs de s'asseoir n'importe où en bloquant une position semi-accroupie, réduisant ainsi la fatigue des jambes.

Lors de notre étude, nous allons uniquement étudier l'utilisation des exosquelettes passifs BSEs (Back Support Exoskeletons), notamment l'exosquelette Laevo V2.5, fréquemment étudié pour la réduction des troubles neuromusculaires (TSM), et plus précisément des douleurs du bas du dos HWANG, YERRIBOINA, ARI et J. H. KIM, 2021, MADINEI, S. KIM, SRINIVASAN et NUSSBAUM, 2021, SIEDL et MARA, 2021.

Cet exosquelette est conçu pour réduire la fatigue et les douleurs lombaires des travailleurs effectuant des tâches nécessitant des flexions répétées (un infirmier qui doit manipuler un patient à mobilité réduite, un ouvrier qui soulève des poids...). Contrairement aux exosquelettes motorisés, il utilise un système de ressorts et d'appuis ergonomiques pour redistribuer le poids du haut du corps vers les jambes, soulageant ainsi la colonne vertébrale. Il est particulièrement utilisé dans l'industrie, la logistique et l'agriculture. Il est facilement adaptable avec des systèmes de barres ajustables ( 4 tailles représentées par 4 couleurs différentes) et des sangles réglables selon le gabarit de chaque utilisateur.

Afin de l'étudier dans un cadre qui justifie son utilisation, nous avons mis en place une situation propice à l'inconfort et à un effort particulier des lombaires. Le participant se retrouve face à une table où il sera nécessaire de se pencher fortement en avant sans prendre appui sur celle-ci pour réaliser une tâche définie.

## 1.1 Formulation Mathématique du Problème

Nous cherchons à évaluer l'effet latent d'un **exosquelette** sur plusieurs métriques de performance avant et après son utilisation, tout en tenant compte de facteurs explicatifs.

### 1.1.1 Variables et Notations

Nous définissons :

- $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$  : Variables explicatives (ex. taille, genre, condition physique).
- $\mathbf{Y} = (Y_{1,\text{avec\_exosquelette}}, Y_{1,\text{sans\_exosquelette}}, \dots, Y_{m,\text{avec\_exosquelette}}, Y_{m,\text{sans\_exosquelette}})$  : Performances observées avec et sans l'exosquelette.
- $\Delta\mathbf{Y} = (\Delta Y_1, \Delta Y_2, \dots, \Delta Y_m)$  : Différences de performance ( $\Delta Y_i = Y_{i,\text{avec\_exosquelette}} - Y_{i,\text{sans\_exosquelette}}$ ).
- $\xi$  : Variable latente représentant l'effet global de l'exosquelette.
- $\varepsilon$  : Erreur aléatoire.
- $\beta_{0i}$  : Constante spécifique à chaque métrique  $\Delta Y_i$ .
- $(\beta_{j,1}, \dots, \beta_{j,n})$  : Coefficients d'influence des variables explicatives  $X_j$  sur  $\Delta Y_i$ .
- $\lambda_i$  : Coefficient mesurant l'effet de l'exosquelette sur  $\Delta Y_i$ .
- $\gamma_j$  : Effet des variables explicatives  $X_j$  sur l'effet latent  $\xi$ .
- $\zeta$  : Terme d'erreur associé à la variable latente  $\xi$ .

### 1.1.2 Relations Structurelles du Modèle

**Modélisation des Différences de Performance** Chaque différence de performance  $\Delta Y_i$  est influencée par les variables explicatives et l'effet latent de l'exosquelette :

$$\Delta Y_i = \beta_{0i} + \sum_{j=1}^n \beta_{ji} X_j + \lambda_i \xi + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, 8 \quad (1)$$

**Effet Latent de l'Exosquelette** L'effet global de l'exosquelette est modélisé comme une variable latente  $\xi$  influencée par les variables explicatives :

$$\xi = \gamma_0 + \sum_{j=1}^n \gamma_j X_j + \zeta \quad (2)$$

**Intégration de l'Expression de  $\xi$**  En remplaçant  $\xi$  dans l'équation précédente, nous obtenons :

$$\Delta Y_i = \beta_{0i} + \sum_{j=1}^n \beta_{ji} X_j + \lambda_i (\gamma_0 + \sum_{j=1}^n \gamma_j X_j + \zeta) + \varepsilon_i \quad (3)$$

En développant :

$$\Delta Y_i = (\beta_{0i} + \lambda_i \gamma_0) + \sum_{j=1}^n (\beta_{ji} + \lambda_i \gamma_j) X_j + \lambda_i \zeta + \varepsilon_i \quad (4)$$

formule réduite :

$$\Delta Y_i = \theta_i + \sum_{j=1}^n \delta_{ji} X_j + \lambda_i \zeta + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, 8 \quad (5)$$

avec :

- $\theta_i = \beta_0 i + \lambda_i \gamma_0$  : biais ajusté
- $\delta_{ji} = \beta_{ji} + \lambda_i \gamma_j$  : effet total des variables explicatives

## 1.2 Hypothèses à Tester

Nous testons donc si la variable latente du modèle a un effet. Autrement dit, si l'exosquelette a un effet sur la différence des métriques mesurées.

Nous testerons aussi si les variables indépendantes impactent de façon significative la différence des variables dépendantes.

- $H_0 : \lambda_i = 0$  (l'exosquelette n'a pas d'effet sur  $\Delta Y_i$ ).
- $H_0 : \delta_{ji} = 0$  (les variables explicatives  $X_j$  n'influencent pas  $\Delta Y_i$ ).

## 2 Matériel

### 3 Méthodologie

#### 3.1 Matériel

- Un exosquelette Laevo V2.5 - Les barres ajustables Laevo V2.5 - Table de 80 centimètres, d'une largeur de 100 centimètres - Jeu de société "Docteur Maboul"

#### 3.2 Participants

Les participants sont des étudiants âgés de 22 à 25 ans, avec 25 femmes et 24 hommes. Trois participants n'ont pas préféré donner leur genre, portant le nombre total de participants à 50. Aucun de ces participants ne souffre de retard mental grave. Il n'y a pas eu de vérification des troubles musculo-squelettiques existants qui pourraient justifier une exclusion de leur participation.

#### 3.3 Design Expérimental

À l'arrivée du candidat, l'examinateur lui explique que les données recueillies seront anonymisées, puis lui présente le protocole et le déroulement de l'expérience.

L'expérience se déroule en deux phases :

- **Phase 1** : Après avoir expliqué le protocole, l'examinateur choisit aléatoirement si l'expérience se déroulera avec ou sans exosquelette lors du premier passage. Le candidat est ensuite équipé de l'exosquelette, qui est ajusté à sa taille à l'aide de barres de tailles différentes afin d'assurer son confort et l'efficacité du dispositif. La tâche demandée consiste à jouer au jeu **Docteur Maboul**. Ce jeu d'adresse met les joueurs au défi de retirer délicatement des pièces en plastique représentant des objets ou organes du corps d'un patient fictif, nommé "Sam", sans toucher les bords métalliques de chaque cavité. À l'aide d'une pince, le but est d'extraire ces éléments sans déclencher un buzzer ni allumer le nez rouge du patient, ce qui signale une maladresse. Le joueur qui retire le plus de pièces avec succès

remporte la partie. Ce jeu, qui allie concentration et dextérité, est idéal pour tester la précision des mouvements. Le participant sait qu'il est chronométré et que les examinateurs comptabiliseront chaque fois qu'il touche les rebords électrifiés du jeu ou qu'il bouge les pieds. Le jeu sera placé sur une table, dans le sens de la largeur, à environ un mètre du participant. Celui-ci peut se pencher en avant, mais il lui est interdit de s'appuyer contre la table, que ce soit avec ses mains, ses coudes ou toute autre partie de son corps. Il ne doit pas non plus décoller ses pieds du sol. Lorsque le participant commence à se pencher en avant, le chronomètre se déclenche. Il s'arrête lorsque le dernier morceau du faux patient est retiré. Si nécessaire, le participant est déséquipé.

- **Phase 2 :** Le participant auto-déclare son ressenti physique et psychologique de l'expérience à l'aide d'une échelle Borg (pour le physique) et NASA-TLX (pour le psychologique).

### 3.4 Variables étudiées du modèle

#### 3.4.1 Variable indépendantes X

- Genre : Homme (M), femme (F), non renseigné (-)
- Taille : En centimètre
- Condition 1 : Un booléan pour savoir si on commence avec l'exosquelette (1) ou sans (0). Cette variable nous permettra de juger si l'ordre de passage est déterminant dans les résultats.

#### 3.4.2 Variable dépendantes Y

- Temps de l'expérience : En secondes
- Nombre de contact avec les bords électrifiés : entier naturel
- Nombre de déplacement des pieds : entier naturel
- Nombre ajustement pieds : entier naturel
- BORG (Jambes, bras, dos) : un indicateur utilisé pour mesurer la pénibilité du travail en ergonomie, il est noté entre 0 et 10.
- TLX Nasa : Est un indicateur pour mesurer plusieurs variables. On retrouve la charge mentale (à quel point la tâche a été pénible mentalement), la charge physique (à quel point la tâche a été pénible physiquement), la charge temporelle (à quel point l'expérience a semblée longue), la performance (à quel point on se sentait efficace), l'effort (à quel point l'action a été difficile) et la frustration du candidat via un questionnaire durant la phase 3.

## 4 Résultats

### 4.1 Modèle initial

Initialement, le modèle d'équation structurelle (MES) est construit tel que décrit sur la figure 1. Une connexion est créée entre chaque variable dépendante et chaque variable indépendante, avec en plus la variable latente  $\xi$ . Enfin, une connexion est ajoutée entre le Genre et la Taille. Le test du  $\chi^2$  a permis de déterminer la significativité du modèle avec une  $p\_value$  de 0.00 (table 1). L'effet de l'exosquelette est significatif uniquement sur la différence de la durée (table 2). Aucune autre métrique n'a une significativité suffisamment importante ( $p\_value$  supérieure à 0.05). La variable indépendante Condition.1 est celle avec le coefficient de régression le plus

```

better_model <- '
# Relations entre variables explicatives et différences
Taille ~ Genre
Diff_Duree ~ Taille + Genre + Condition.1
Diff_Contacts ~ Taille + Genre + Condition.1
Diff_Dep_Pieds ~ Taille + Genre + Condition.1
Diff_Charge_Physique ~ Taille + Genre + condition.1
Diff_Charge_Temporelle ~ Taille + Genre + Condition.1
Diff_Performance ~ Taille + Genre + Condition.1
Diff_Effort ~ Taille + Genre + Condition.1
Diff_Frustration ~ Taille + Genre + Condition.1
Diff_Bras ~ Taille + Genre + Condition.1
Diff_Dos ~ Taille + Genre + Condition.1
Diff_Jambes ~ Taille + Genre + Condition.1

# Effet latent de l'exosquelette sur toutes les différences de performance
Exo_effet =~ Diff_Duree + Diff_Contacts + Diff_Dep_Pieds +
Diff_Charge_Physique + Diff_Charge_Temporelle +
Diff_Performance + Diff_Effort + Diff_Frustration + Diff_Bras + Diff_Jambes + Diff_Dos
'

```

FIGURE 1 – Modèle initial

significatif sur les variables mesurées. En effet, pour les variables Différence de l'échelle Borg pour les bras, Différence de la frustration, Différence du nombre de contacts, Différence du nombre de placements de pieds, Différence de l'effort perçu ainsi que Différence de la durée, il y a un coefficient positif avec une p\_value de 0.001 ou proche (table 3). Tous les coefficients de Condition.1 sont strictement positifs. Enfin, la variance est significative pour toutes les variables dépendantes et indépendantes, excepté pour la Différence de la charge physique perçue (table 4). La figure 2 représente le modèle dans sa totalité.

TABLE 1 – Statistiques du test du modèle

Statistique	Valeur
Test statistique ( $\chi^2$ )	117.757
Degrés de liberté (df)	45
p-value	0.000

TABLE 2 – Effet latent de l'exosquelette ( $\xi$ ) sur les différences de performance

Variable	Estimation	Erreur std	z-value	p-value
Diff_Duree	1.000	-	-	-
Diff_Contacts	0.545	0.420	1.299	0.194
Diff_Dep_Pieds	0.117	0.090	1.290	0.197
Diff_Charge_Physique	0.366	0.223	1.641	0.101
Diff_Charge_Temporelle	-0.067	0.065	-1.017	0.309
Diff_Performance	0.084	0.077	1.090	0.276
Diff_Effort	0.195	0.124	1.571	0.116
Diff_Frustration	0.045	0.085	0.536	0.592
Diff_Bras	0.039	0.028	1.394	0.163
Diff_Jambes	0.107	0.075	1.428	0.153
Diff_Dos	0.120	0.075	1.593	0.111

## 4.2 Modèle simplifié

Une fois les connexions non significatives retirées du modèle, nous obtenons une définition de l'équation dans la figure 3. Non seulement le modèle ne perd pas en significativité, mais il gagne également en simplicité et en explicabilité. La variable latente n'est significative que sur les variables Différence de la charge physique perçue, Différence d'effort perçu et Différence Borg dos

TABLE 3 – Estimations des régressions du modèle SEM

Variable dépendante	Prédicteur	Estimation	Erreur std	p-value
Taille	Genre	13.763	1.668	<0.001
Diff_Duree	Taille	0.875	0.843	0.300
	Genre	-25.197	15.209	0.098
	Condition.1	50.681	9.817	<0.001
Diff_Contacts	Taille	0.298	0.389	0.445
	Genre	-8.618	7.021	0.220
	Condition.1	17.469	4.532	<0.001
Diff_Dep_Pieds	Taille	0.097	0.085	0.254
	Genre	-0.405	1.527	0.791
	Condition.1	3.663	0.986	<0.001
Diff_Charge_Physique	Taille	0.074	0.086	0.387
	Genre	-3.023	1.542	0.050
	Condition.1	1.612	0.996	0.105
Diff_Charge_Temporelle	Taille	0.019	0.074	0.800
	Genre	-0.299	1.330	0.822
	Condition.1	0.762	0.859	0.375
Diff_Performance	Taille	-0.013	0.083	0.878
	Genre	3.084	1.500	0.040
	Condition.1	1.202	0.968	0.214
Diff_Effort	Taille	-0.085	0.076	0.263
	Genre	-0.109	1.369	0.937
	Condition.1	3.318	0.884	<0.001
Diff_Frustration	Taille	0.034	0.112	0.762
	Genre	-0.437	2.014	0.828
	Condition.1	4.267	1.300	0.001
Diff_Bras	Taille	-0.013	0.023	0.588
	Genre	0.175	0.421	0.678
	Condition.1	0.711	0.272	0.009
Diff_Dos	Taille	0.057	0.043	0.185
	Genre	-0.764	0.777	0.325
	Condition.1	0.412	0.501	0.412
Diff_Jambes	Taille	-0.044	0.060	0.460
	Genre	-1.527	1.084	0.159
	Condition.1	-0.108	0.700	0.877

(table 5). L'impact de Condition.1 n'est plus significatif sur la Différence de la charge physique perçue (table 7). La variance reste totalement significative sur toutes les variables, excepté la Différence de la charge physique perçue (table 8). La figure 4 permet une visualisation complète du modèle simplifié.

TABLE 4 – Estimations des variances des variables

Variable	Variance	Erreur std	z-value	p-value
Diff_Duree	1065.205	219.777	4.847	<0.001
Diff_Contacts	220.898	45.806	4.822	<0.001
Diff_Dep_Pieds	10.476	2.171	4.825	<0.001
Diff_Charge_Physique	1.903	1.722	1.105	0.269
Diff_Charge_Temporelle	8.382	1.721	4.870	<0.001
Diff_Performance	10.555	2.171	4.863	<0.001
Diff_Effort	6.441	1.439	4.475	<0.001
Diff_Frustration	19.805	4.047	4.893	<0.001
Diff_Bras	0.761	0.159	4.782	<0.001
Diff_Jambes	4.941	1.038	4.759	<0.001
Diff_Dos	1.922	0.444	4.327	<0.001
Taille	33.333	6.804	4.899	<0.001
Exo_effet	73.146	87.978	0.831	0.406

```

better_model <- '
# Relations entre variables explicatives et différences
Taille ~ Genre
Diff_Duree ~ Taille + Genre + Condition.1
Diff_Contacts ~ Taille + Genre + Condition.1
Diff_Dep_Pieds ~ Taille + Genre + Condition.1
Diff_Charge_Physique ~ Taille + Genre + Condition.1
Diff_Charge_Temporelle ~ Taille + Genre + Condition.1
Diff_Performance ~ Taille + Genre + Condition.1
Diff_Effort ~ Taille + Genre + condition.1
Diff_Frustration ~ Taille + Genre + Condition.1
Diff_Bras ~ Taille + Genre + Condition.1
Diff_Dos ~ Taille + Genre + Condition.1
Diff_Jambes ~ Taille + Genre + Condition.1

# Effet latent de lexosquelette sur toutes les différences de performance
Exo_effet ~ Diff_Duree + Diff_Contacts + Diff_Dep_Pieds +
Diff_Charge_Physique + Diff_Charge_Temporelle +
Diff_Performance + Diff_Effort + Diff_Frustration + Diff_Bras + Diff_Jambes + diff_Dos
'

```

FIGURE 3 – MES simplifié

TABLE 5 – Statistiques du test du modèle simplifié

Statistique	Valeur
Test statistique ( $\chi^2$ )	150.801
Degrés de liberté (df)	71
p-value	0.000

TABLE 6 – Estimation des charges factorielles des variables latentes

Variable Latente	Estimation	Erreur std	z-value	p-value
Diff_Duree	1.000	-	-	-
Diff_Contacts	0.520	0.367	1.417	0.156
Diff_Dep_Pieds	0.099	0.075	1.322	0.186
Diff_Charge_Physique	0.353	0.195	1.808	0.071
Diff_Charge_Temporelle	-0.047	0.053	-0.880	0.379
Diff_Performance	0.088	0.070	1.257	0.209
Diff_Effort	0.177	0.104	1.708	0.088
Diff_Frustration	0.041	0.074	0.548	0.583
Diff_Bras	0.040	0.026	1.548	0.122
Diff_Jambes	0.096	0.065	1.482	0.138
Diff_Dos	0.112	0.064	1.752	0.080

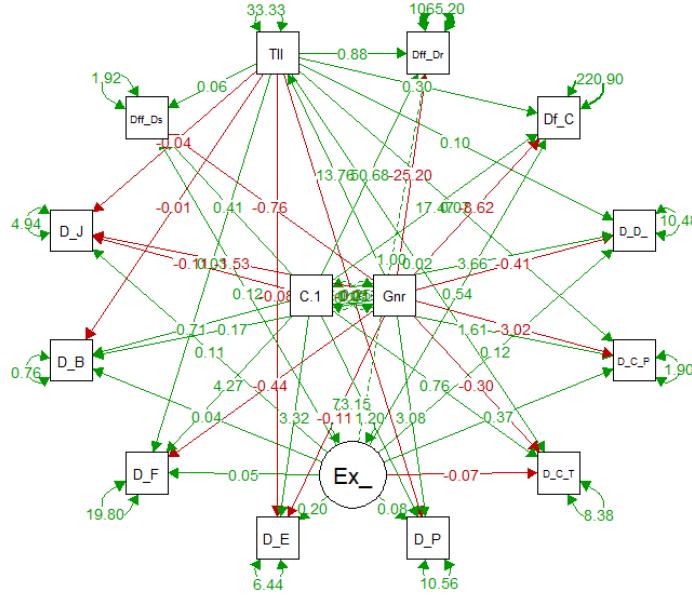


FIGURE 2 – Graphe initial

TABLE 7 – Estimations des régressions du modèle SEM simplifié

Variable dépendante	Prédicteur	Estimation	Erreur std	p-value
Taille	Genre	13.763	1.668	<0.001
Diff_Duree	Condition.1	46.445	9.706	<0.001
Diff_Contacts	Condition.1	15.262	4.377	<0.001
Diff_Dep_Pieds	Condition.1	3.540	0.967	<0.001
Diff_Charge_Physique	Genre	-0.978	0.701	0.163
Diff_Performance	Genre	3.265	0.958	0.001
Diff_Effort	Condition.1	2.251	0.787	0.004
Diff_Frustration	Condition.1	4.162	1.287	0.001
Diff_Bras	Condition.1	0.558	0.257	0.030

## 5 Discussion

Il semblerait que l'effet de l'exosquelette ne soit présent uniquement sur la Différence du Borg Dos et la Charge physique perçue, avec des coefficients respectifs de 0.112 et 0.353. Bien que faible, l'exosquelette semble augmenter la charge physique du dos tout en augmentant la difficulté physique globale perçue et l'effort perçus. De plus, la Différence de la charge physique perçue est uniquement expliquée par le facteur latent. La Différence du Borg Dos est également expliquée par la variance  $\varepsilon$ , autrement dit, d'autres facteurs externes à notre modèle l'impactent. Ces résultats peuvent s'expliquer par l'augmentation de l'angle lors de la flexion du tronc et des épaules lors du port du Leavo V2.5 comme remarqué par HWANG, YERRIBOINA, ARI et J. H. KIM, 2021.

TABLE 8 – Estimations des variances des variables simplifiées

Variable	Variance	Erreur std	z-value	p-value
Diff_Duree	1120.552	230.965	4.852	<0.001
Diff_Contacts	227.254	47.015	4.834	<0.001
Diff_Dep_Pieds	11.124	2.293	4.852	<0.001
Diff_Charge_Physique	1.477	1.854	0.796	0.426
Diff_Charge_Temporelle	8.676	1.775	4.887	<0.001
Diff_Performance	10.715	2.204	4.861	<0.001
Diff_Effort	7.126	1.559	4.572	<0.001
Diff_Frustration	19.850	4.055	4.895	<0.001
Diff_Bras	0.847	0.177	4.785	<0.001
Diff_Jambes	6.174	1.282	4.815	<0.001
Diff_Dos	2.001	0.458	4.368	<0.001
Taille	33.333	6.804	4.899	<0.001
Exo_effet	90.958	99.323	0.916	0.360

L'effet le plus impactant parmi nos variables reste la condition de l'ordre de passage avec des coefficients de 46.44 pour la Différence de durée, 15.2 pour la Différence du nombre de contacts, 3.5 pour la Différence du nombre de déplacements de pieds, 2.25 pour la Différence de l'effort perçu et 4.16 pour la Différence de la frustration.

Tous ces coefficients positifs reflètent une diminution globale des performances et une augmentation de la difficulté de la tâche .La raison principale de cet effet est très probablement le manque d'entraînement à la tâche ainsi que l'environnement qui ne se prêtait pas aux passations.

Le manque de significativité de la variable latente ainsi que les faibles coefficients de régression, sont en cohérence avec l'extrême variabilité intersujet relevée par l'étude de **vigne\_2024**, qui rapportait jusqu'à près de 50% de retours négatifs sur l'usage d'exosquelettes. De même, l'importance de la variance entre les participants est similaire aux travaux de BRUNO, 2024, où les deux participants avaient des réponses complètement différentes.

Nos deux hypothèses sont donc validées : 1. Il y a un effet global de l'exosquelette (bien que négatif). 2. Les variables indépendantes sont un facteur important dans les résultats de l'étude. Dans de futures études, il serait pertinent de s'assurer que tous les participants prennent un temps pour s'habituer à la tâche, mais aussi au port de l'exosquelette. De plus, il faudrait aussi trouver une autre tâche à effectuer sur une durée définie. Les bénéfices principaux, ainsi que les faiblesses principales du port d'exosquelette, se révèlent davantage sur les tâches prolongées. L'aspect compétitif causé par la mesure du temps de l'expérience induit un biais non désiré sur le comportement de certains participants. En effet, pour certains, le but résidait plus dans la performance de la tâche (tous les participants n'ont pas la même définition de celle-ci) que dans la réduction de la pénibilité. Ainsi, certains participants s'efforçaient de résoudre au plus vite le problème sans plus de considération pour le reste de l'expérience.

## Références

- BRUNO, Stefano (2024). « Test d'un « dispositif à ressort d'assistance pour les membres supérieurs (exosquelette) » dans la prévention des TMS du membre supérieur dans l'industrie du verre ». In : *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement* 85 (2024) 102574 Th9-P268.

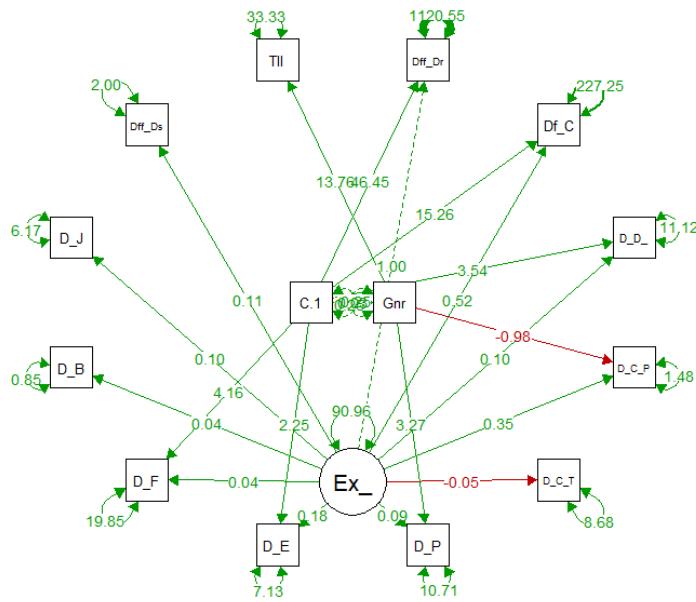


FIGURE 4 – Graphe simplifié

- HWANG, Jaejin, Venkata Naveen Kumar YERRIBOINA, Hemateja ARI et Jeong Ho KIM (2021). « Effects of passive back-support exoskeletons on physical demands and usability during patient transfer tasks ». In : *Applied Ergonomics* 93, p. 103373. DOI : 10.1016/j.apergo.2021.103373. URL : <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021.103373>.
- MADINEI, Saman, Sunwook KIM, Divya SRINIVASAN et Maury A. NUSSBAUM (2021). « Effects of back-support exoskeleton use on trunk neuromuscular control during repetitive lifting : A dynamical systems analysis ». In : *Journal of Biomechanics*. DOI : 10.1016/j.jbiomech.2021.110XX.
- MATHIEU BAGUET, Yann Strauss (2023). « Les critères d'acceptabilité d'un exosquelette chez les professionnels de santé sujets aux troubles musculosquelettiques ». In : *Résumés des Journées francophones de kinésithérapie 2023* A136 – ABSTRACT No JFK23-400.
- MILLER, George A. (1956). « The magical number seven, plus or minus two : Some limits on our capacity for processing information. » In : *Psychological Review* 63.2, p. 81-97.
- SIEDL, Sandra M. et Martina MARA (2021). « Exoskeleton acceptance and its relationship to self-efficacy enhancement, perceived usefulness, and physical relief : A field study among logistics workers ». In :