

Effets des niveaux d'assistance et de résistance d'un exosquelette robotisé sur les patrons et les exigences musculaires aux membres inférieurs lors de la marche au sol

PROBLÉMATIQUE

Les exosquelettes robotisés de marche au sol (EXORM) sont des technologies émergentes en réadaptation¹. Ils produisent une assistance ou une résistance motorisée aux hanches et aux genoux lors de la marche². Étonnamment, les effets d'un EXORM sur l'activité musculaire aux membres inférieurs (MI's) lors de la marche au sol demeurent méconnus.

OBJECTIF

Évaluer les effets des niveaux d'assistance et de résistance d'un EXORM sur les patrons et les exigences musculaires aux MI's lors de la marche au sol.

HYPOTHÈSES

1. Patrons musculaires préservés aux MI's avec l'EXORM.
2. Exigences musculaires aux MI's ↓ ou ↑ par l'assistance ou la résistance de l'EXORM, comparativement à sans EXORM.

MÉTHODE

Participants

- 20 adultes en santé
- Sexe = 11 ♂, 9 ♀
- Âge = 30,6 ± 12,5 ans
- Taille = 1,71 ± 0,1 m
- Masse = 73,4 ± 13,9 kg

Entraînements (Fig.1)

- Avec l'EXORM *EKSO GT™*
- 4 séances de 45 minutes
- Réparties sur 2 semaines
- Habitude aux différents modes

Évaluation de 4 conditions

- CTL sans EXORM
- Passif avec EXORM
- Assisté avec EXORM
- Résisté avec EXORM

Enregistrement (Table 1)

- 8 muscles clés au MI droit
- Capteurs EMG sans fil
- Système *DELSYS TRIGNO™*

Traitement

- Inspection et filtrage
- Enveloppes linéaires
- Normalisation/temps
- Normalisation/amplitude
- 5 cycles consécutifs
- Normalisation par muscle pour comparaisons

Analyses

- Caractéristiques des participants
- Indicateurs d'entraînement
- Corrélations de Pearson (r_{mean})
- ANOVA à 1 facteur
- Comparaisons post hoc
- Ajustement Bonferroni
- Différences relatives (%)
- Seuil fixé à $p \leq 0,05$
- SPSS® (version 25.0.)

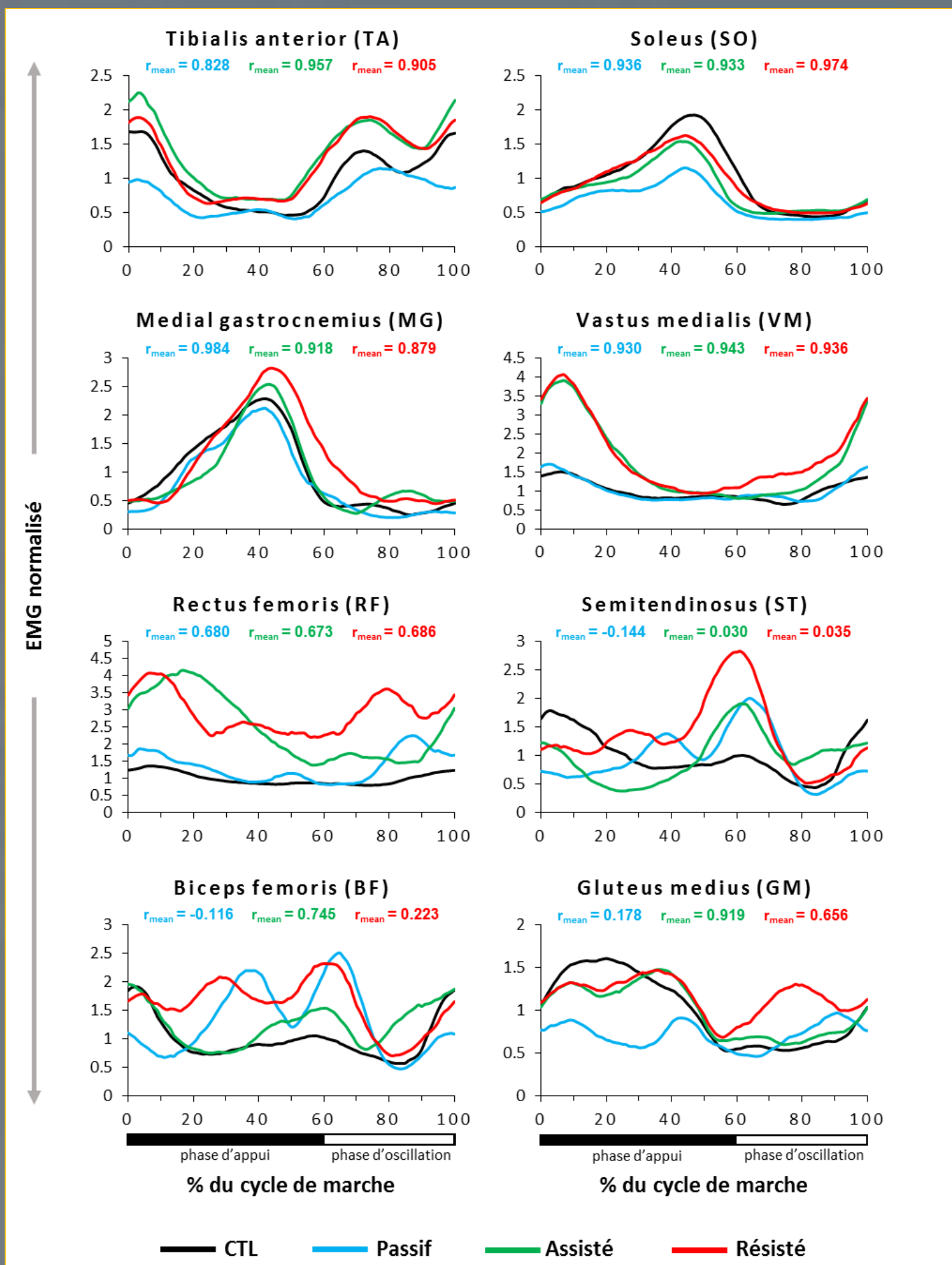


Fig. 2 : Moyennes de groupe des patrons d'activation musculaire au MI droit avec corrélations (r_{mean}) de CTL vs Passif, Assisté et Résisté.

Muscles	Mesures	Model				ANOVA								Posthoc comparisons			
		CTL	Passive	Resisted	Assisted	Cvs P	Cvs A	Cvs R	P vs A	P vs R	A vs R	A vs P	R vs A	P vs R	A vs P	R vs A	P vs R
TA	Mean (SD)	Cycle: 1.00 (0.00)	0.74 (0.38)	1.36 (0.41)	1.26 (0.49)	<0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Stance	0.83 (0.10)	0.58 (0.33)	1.13 (0.43)	0.98 (0.39)	<0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Swing	1.26 (0.14)	0.96 (0.58)	1.69 (0.50)	1.66 (0.64)	<0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Max (SD)	Cycle: 1.79 (0.25)	1.57 (0.78)	2.59 (0.86)	2.36 (0.79)	<0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Swing	1.76 (0.27)	1.24 (0.70)	2.39 (0.87)	2.00 (0.71)	<0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
SO	Mean (SD)	Cycle: 1.00 (0.00)	0.66 (0.14)	0.85 (0.14)	0.93 (0.17)	<0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Stance	1.00 (0.00)	0.62 (0.18)	1.07 (0.19)	1.18 (0.20)	<0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Swing	0.56 (0.13)	0.43 (0.13)	0.53 (0.16)	0.57 (0.17)	<0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Max (SD)	Cycle: 2.02 (0.33)	1.22 (0.42)	1.63 (0.48)	1.70 (0.57)	<0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Swing	1.16 (0.35)	0.60 (0.16)	0.76 (0.17)	0.91 (0.32)	<0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
MG	Mean (SD)	Cycle: 1.00 (0.00)	0.85 (0.38)	0.97 (0.32)	1.21 (0.43)	0.002											
	Stance	1.43 (0.13)	1.21 (0.53)	1.30 (0.44)	1.60 (0.57)	0.021											
	Swing	0.37 (0.19)	0.32 (0.21)	0.49 (0.25)	0.65 (0.36)	<0.001						*	*	*			
	Max (SD)	Cycle: 2.42 (0.46)	2.32 (0.97)	2.73 (0.99)	3.04 (1.24)	0.011											
	Swing	2.42 (0.46)	2.32 (0.97)	2.73 (0.99)	3.04 (1.24)	0.011											
VM	Mean (SD)	Cycle: 1.00 (0.00)	1.01 (0.36)	1.74 (0.72)	1.92 (0.83)	<0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Stance	1.04 (0.10)	1.03 (0.33)	1.98 (0.91)	2.01 (0.66)	<0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Swing	0.84 (0.15)	0.88 (0.56)	1.39 (0.59)	1.79 (1.25)	0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Max (SD)	Cycle: 1.68 (0.36)	1.95 (0.82)	4.05 (2.06)	4.15 (1.73)	<0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Swing	1.60 (0.33)	1.90 (0.79)	4.04 (2.07)	4.15 (1.73)	<0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
RF	Mean (SD)	Cycle: 1.00 (0.00)	1.01 (0.36)	1.74 (0.72)	1.92 (0.83)	<0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Stance	1.04 (0.10)	1.03 (0.33)	1.98 (0.91)	2.01 (0.66)	<0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Swing	0.84 (0.15)	0.88 (0.56)	1.39 (0.59)	1.79 (1.25)	0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Max (SD)	Cycle: 1.68 (0.36)	1.95 (0.82)	4.05 (2.06)	4.15 (1.73)	<0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Swing	1.60 (0.33)	1.90 (0.79)	4.04 (2.07)	4.15 (1.73)	<0.001	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
ST	Mean (SD)	Cycle: 1.00 (0.00)	0.97 (0.48)	0.98 (0.44)	1.37 (1.10)	0.128											
	Stance	1.12 (0.13)	0.97 (0.68)	0.82 (0.43)	1.47 (1.35)	0.076											
	Swing	0.83 (0.19)	0.98 (0.34)	1.22 (0.59)	1.23 (0.82)	0.034											
	Max (SD)	Cycle: 2.09 (0.53)	2.47 (1.00)	2.96 (1.55)	3.29 (2.03)	0.128											
	Swing	2.07 (0.52)	2.17 (1.06)	2.16 (1.28)	3.08 (2.91)	0.157											
BF	Mean (SD)	Cycle: 1.00 (0.00)	1.32 (0.67)	1.25 (0.83)	1.61 (1.03)	0.039											
	Stance	1.05 (0.11)	1.37 (0.91)	1.19 (0.79)	1.79 (1.22)	0.023											
	Swing	0.93 (0.16)	1.25 (0.56)	1.35 (0.88)	1.34 (0.88)	0.078											
	Max (SD)	Cycle: 2.17 (0.66)	3.35 (1.94)	2.69 (2.07)	3.65 (2.58)	0.062											
	Swing	2.15 (0.64)	3.05 (2.03)	2.55 (1.96)	3.48 (2.49)	0.107											
GM	Mean (SD)	Cycle: 1.00 (0.00)	0.72 (0.37)	0.99 (0.69)	1.17 (0.71)	0.025	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Stance	1.25 (0.13)	0.72 (0.36)	1.18 (0.91)	1.22 (0.72)	0.017	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Swing	0.63 (0.19)	0.71 (0.48)	0.71 (0.48)	1.09 (0.86)	0.009	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	Max (SD)	Cycle: 1.80 (0.25)	1.46 (1.00)	1.83 (1.48)	2.03 (1.35)	0.216											
	Swing	1.08 (0.32)	1.12 (0.82)	1.12 (0.66)	1.59 (1.21)	0.036											

Table 2 : Moyennes et max de groupe des exigences musculaires au MI droit par cycle et phases (*= différence statistiquement significative).

1. Patrons d'activation musculaire (Fig.2)

- Généralement préservés aux MI's dans les trois modes avec EXORM;
- Fortement corrélés pour les muscles vaste médial, gastrocnémien médial, soléaire et tibial antérieur.

2. Exigences musculaires (Table 2 et Fig.3)

- Mode résisté : travail des muscles droit fémoral, vaste médial et gastrocnémien médial augmenté significativement;
 - Mode assisté : travail des muscles droit fémoral, vaste médial et tibial antérieur augmenté significativement;
 - Mode passif : travail musculaire généralement comparable à la marche au sol sans EXORM.

Entraînement moyen avec EXORM

Station debout : 26,6 ± 8,8 min; Marche : 17,9 ± 6 min; Nombre de pas : 645 ± 194 pas.



Fig.1 : Vues d'ensemble d'une participante s'entraînant à la marche avec EXORM sous la supervision directe d'un thérapeute certifié.

Muscle	Placement of sensor
Tibialis anterior	at 1/3 on the line between the tip of the tibia and the tip of the medial malleolus
Soleus	at 2/3 of the line between the medial condyles of the femur to the medial malleolus
Medial gastrocnemius	on the most prominent bulge of the muscle
Vastus medialis	at 80% on the line between the anterior spina iliaca superior and the joint space in front of the anterior border of the medial ligament
Rectus femoris	at 50% on the line from the anterior spina iliaca superior to the superior part of the patella
Semitendinosus	at 50% on the line between the ischial tuberosity and the medial epicondyle of the tibia
Biceps femoris	at 50% on the line between the ischial tuberosity and the lateral epicondyle of the tibia
Gluteus medius	at 50% on the line from the crista iliaca to the trochanter

Table 1 : Positionnement des capteurs EMG selon les recommandations du projet SENIAM et vue du MI droit d'une participante avec pose des capteurs EMG.

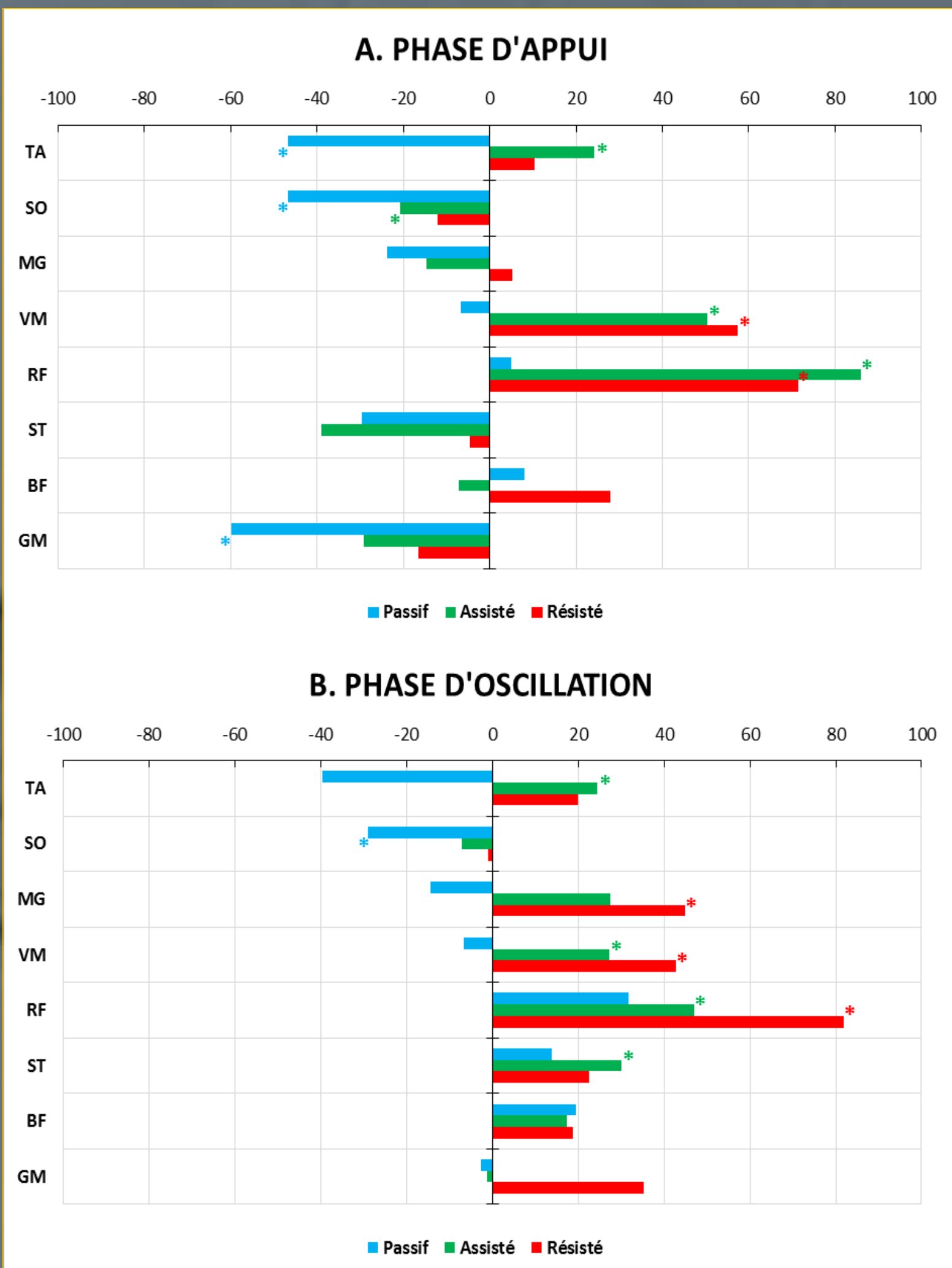


Fig. 3 : Différences relatives (%) de l'EMG moyen au MI droit de CTL vs Passif, Assisté et Résisté (*= différence statistiquement significative).

DISCUSSION

1. Patrons d'activation musculaire aux MI's

- Influencés positivement par : la mobilité du pelvis, la mise en charge et le transfert de poids³.
- EXORM : mouvements fonctionnels; favorise la neuroplasticité.

2. Exigences musculaires aux MI's

- Mode résisté : agit davantage aux articulations motorisées; influence les muscles bi articulaires.
- Mode assisté : idem mode résisté; effet stimulant via facilitation du mouvement.
- Mode passif : muscles activés via la stimulation des récepteurs tendineux, neuromusculaires et cutanés; favorise l'intégration sensorimotrice⁴.

Limites de l'étude

- Faible échantillon : collecte complémentaire?
- Participants en bonne santé seulement : lésions médullaires?
- Emphase sur patrons et exigences musculaires : synergies musculaires aux MI's? Sous phases de marche?
- Placement des capteurs EMG difficile aux ischio jambiers dû aux sangles de l'EXORM : mini capteurs EMG avec protections?

CONCLUSION

L'utilisation d'un EXORM apparait pertinente pour le renforcement musculaire des MI's et semble conforme aux principes de neuroplasticité reliés à l'entraînement locomoteur. Ces nouvelles preuves scientifiques serviront à orienter de futures études sur les EXORM ainsi qu'à soutenir le développement d'un programme d'entraînement locomoteur qui sera testé auprès de personnes ayant une lésion incomplète de la moelle épinière.

REMERCIEMENTS

Merci à Martin Vermette (pht, MSc), Michel Goyette (ing.) et Daniel Marineau pour leur aide précieuse. Merci au programme PREMIER, au département de physiothérapie de l'École de réadaptation et à mes collègues étudiants. Un Merci particulier à Manuel J. Escalona. Merci enfin à Dany H. Gagnon pour la générosité de son enseignement.

RÉFÉRENCES

1. Holanda LJ, Silva PMM, Amorim TC, Lacerda MO, Simao CR, Morya E. Robotic assisted gait as a tool for rehabilitation of individuals with spinal cord injury: a systematic review. J Neuroeng Rehabil. 2017;14(1):126. Epub 2017/12/06.
2. Esquenazi A, Talaty M, Jayaraman A. Powered Exoskeletons for Walking Assistance in Persons with Central Nervous System Injuries: A Narrative Review. PM R. 2017;9(1):46-62. Epub 2016/08/28.
3. Hidler, J. M., & Wall, A. E. (2005). Alterations in muscle activation patterns during robotic-assisted walking. Clinical Biomechanics, 20(2), 184-193.
4. Sylos-Labini, F., Lacquaniti, F., & Ivanenko, Y. P. (2014). Human locomotion under reduced gravity conditions: biomechanical and neurophysiological considerations. BioMed research international, 2014.