

**PLACE DES EXOSQUELETES DE MARCHE**

**DANS DE LA RÉÉDUCATION ROBOTISÉE DES MEMBRES INFÉRIEURS**

**CHEZ LES PERSONNES ATTEINTES DU LOCKED-IN SYNDROME**

**(RAGT = REABILITATION ASSISTED GAIT THERAPY)**

Vendredi 14 mars 2025 – 23e Journée d'ALIS

***Dr Frédéric PELLAS***  
***(ALIS - CHU NIMES)***



# Qu'est ce qu'un robot exosquelette ?



Dans quel contexte sont-ils utilisés ?

Médical



Industriel



Militaire



# LA ROBOTIQUE DANS LE DOMAINE MÉDICAL / SANTÉ

Assistance vie  
quotidienne

Rééducatif

Chirurgical





### INTÉRÊTS THÉRAPEUTIQUE

- Périmètre de marche
- Risques de chutes
  - Transferts
- Tonus du tronc
- Psychologique
- Sédentarisme



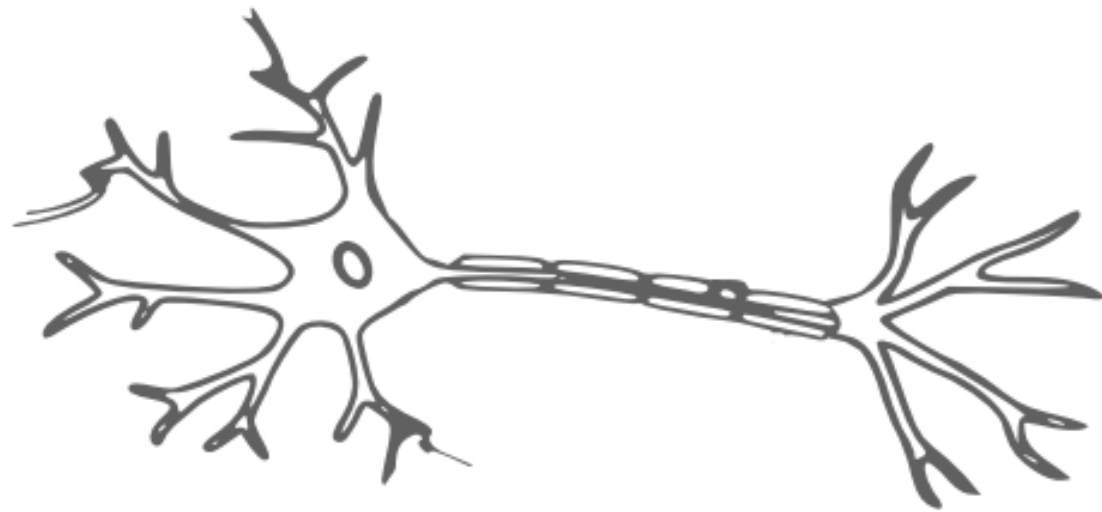
### TYPE DE PATHOLOGIES :

- SEP
- TC
- AVC
- Blessé médullaire
- Guillain Barré



### RÉÉDUCATION

- Schéma de marche et posture
- Renforcement musculaire MI
- Coordination/Double tache
- Contrôle moteur
- Endurance (cardio)



# L'exosquelette

## ATALANTE



**1** RÉGLABLE EN FONCTION DE LA LONGUEUR DES SEGMENTS DU PATIENT

**2** AUTOSTABILISÉ

**3** PETIT PAS OU GRAND PAS

**4** DÉPLACEMENT MULTI DIRECTIONNEL

**5** MOUVEMENT DÉCLENCHÉ PAR LE PATIENT

**6** SÉCURITÉ

GOLVO



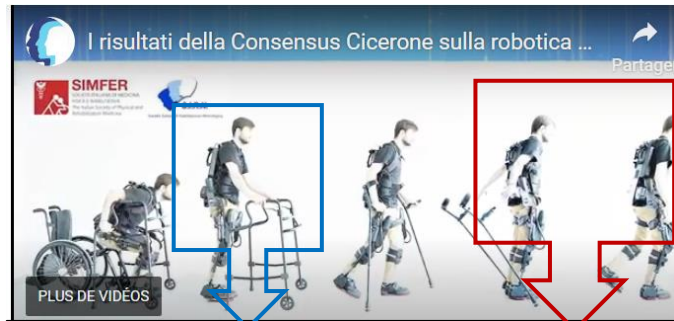
Poignets rééducateurs

# Pourquoi verticaliser

## CLASSIQUE (statique, sur place, piétiner)

- Trophicité (os, peau, muscle, circulation)
- Souplesse articulaire (flessions/tronc)
- Proprioception
- Travail posture tronc / abdo (douleurs rachis)
- MARCHER en décharge
- Trophicité idem
- Schéma de marche “physio” avec défilement **champ visuel**
- Travail postural en mouvement plus “physio”
  - renforcé par celui des MS en APA (dissociation)

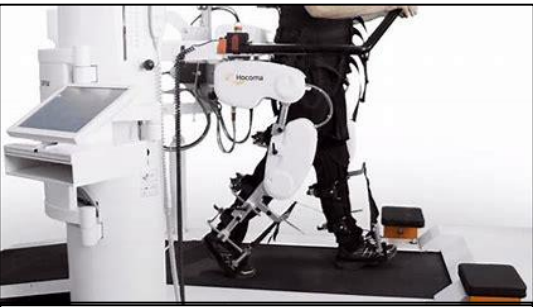




EKSO

Atalante

Marche libre



Sur tapis : lokomat



« End-effector »  
marche sur place  
(GEO de THERA)

# Les EXOS ....

## Systeme electromecanique

- EXO de marche «libre» (= EXO «Atalante» ou EXO «EKSO») ⇔ dynamique
- EXO de marche sur tapis (= lokomat) ⇔ «statique»
- EXO type « end-effector » (marche «sur place» = stepper) ⇔ «statique»

## CONF CONSENSUS « CICERONE »

### ITALIENNE DE LA S.I.R.N.)

SUR LA REEDUCATION ROBOTIQUE ASSISTEE  
(ROBOT & AUTRES DISPOSITIFS ELECTRO-MECANIQUES)



Pour être considérée «robotique» une technologie doit posséder **4 sous-systèmes**

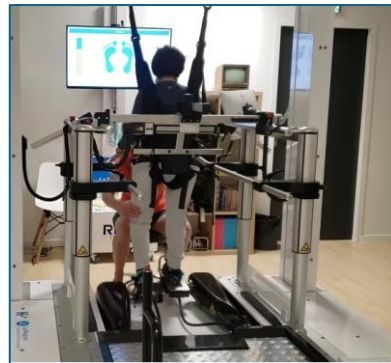
- **support mécanique du mouvement** (exosquelette, bi/uni latéral)
- **Système décharge de poids** (harnais ou l'exosquelette lui-même)
- **Capteurs de mesure de données** (PST de la marche, angles, force, EMG / énergétiques)
- **Retro-contrôle du mouvement du «robot» via ces mesures (voir d'IA, ce qui est «top»)**
  - *La définition existait Avant l'IA... Mais l'IA et les nouveaux capteurs «boostent» les performances*



## La Rééducation robotisée (RR), IMPLIQUE INTERACTION THÉRAPEUTE ⇔ PATIENT ⇔ ENVIRONNEMENT

Les robots actuels permettent via des capteurs et l'IA une RF :

- **Personnalisée « centrée »** sur le patient
- **Adaptable aux progrès** (vitesse, résistance, pente etc...)
- Adaptable à l'**environnement** (terrain) :
  - cas des exosquelettes « marche libre »
  - enrichissent l'expérience posturale et sensorielle (par / tapis)
  - Cas des exosquelettes personnels



# Pour le LIS, y compris incomplet, « tétra » partiels ... on a quoi en général ?

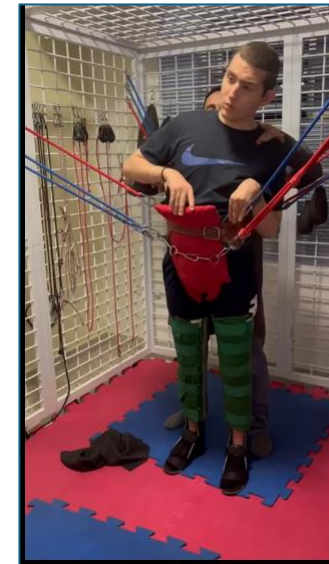
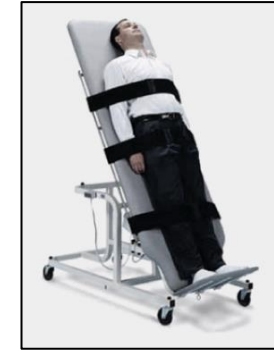
tilt o stand-up ..... / Barres parallèles .....

Décharge type potence “golvo” ou rail

(Lite Gait / Sté Biodex)

• *Mais à quoi bon... il ne (re)marchera jamais (même avec AT)*

- *... trop dangereux (chute)*
- *besoin d'une 1/3 personne à côté !!!*
- *ça va l'empêcher de faire son deuil !*



# Systemes robotisés de marche

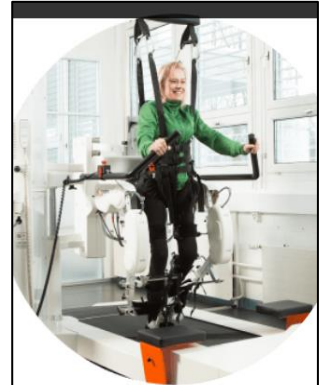
## EXO à poste «fixe» : sur tapis ou end-effector (pédalier)

- Décharge poids
- Marche sur place / retour (feed-back) possible (écran, lunettes)
- Tenue tête et tronc possible (*ie «Lokomat»*)

## EXO de «marche libre»

- Autoportants +/- cannes
- (*ie Atalante / Ekso*)

Qu'est ce qu'un exosquelette de marche?



Lokomat

The worlds leading robotic medical device that provides physiological and intensive rehabilitative gait training to patients with severe motoric impairments.



# QUI verticaliser avec des systèmes robotisés / EXO ?

- LIS complet ou “majeur” :

- ne peut s'appuyer sur 2 bras / pas tenue de tête, ni du “cou”

- **Stations fixes** (tapis / “end-effector”) avec corset & harnais

- **EXOS libres très Difficile**

- **Que Atalante => Corset cervical / harnais + contrôle par tiers +++**



# QUI verticaliser avec des systèmes robotisés / EXO ?

- LIS qui ne peuvent tenir sur les bras (mais bonne tenue tête & “cou”)
  - Comme d'autres tétraparésies (SEP, lésions médullaires, SLA, polynévrites)
  - **End effector / tapis aussi**
  - **EXO à tester :**
    - EKSO +/- selon force des bras assez forts ...
    - **Atalante ++ : éventuel autocontrôle de l'exo possible**

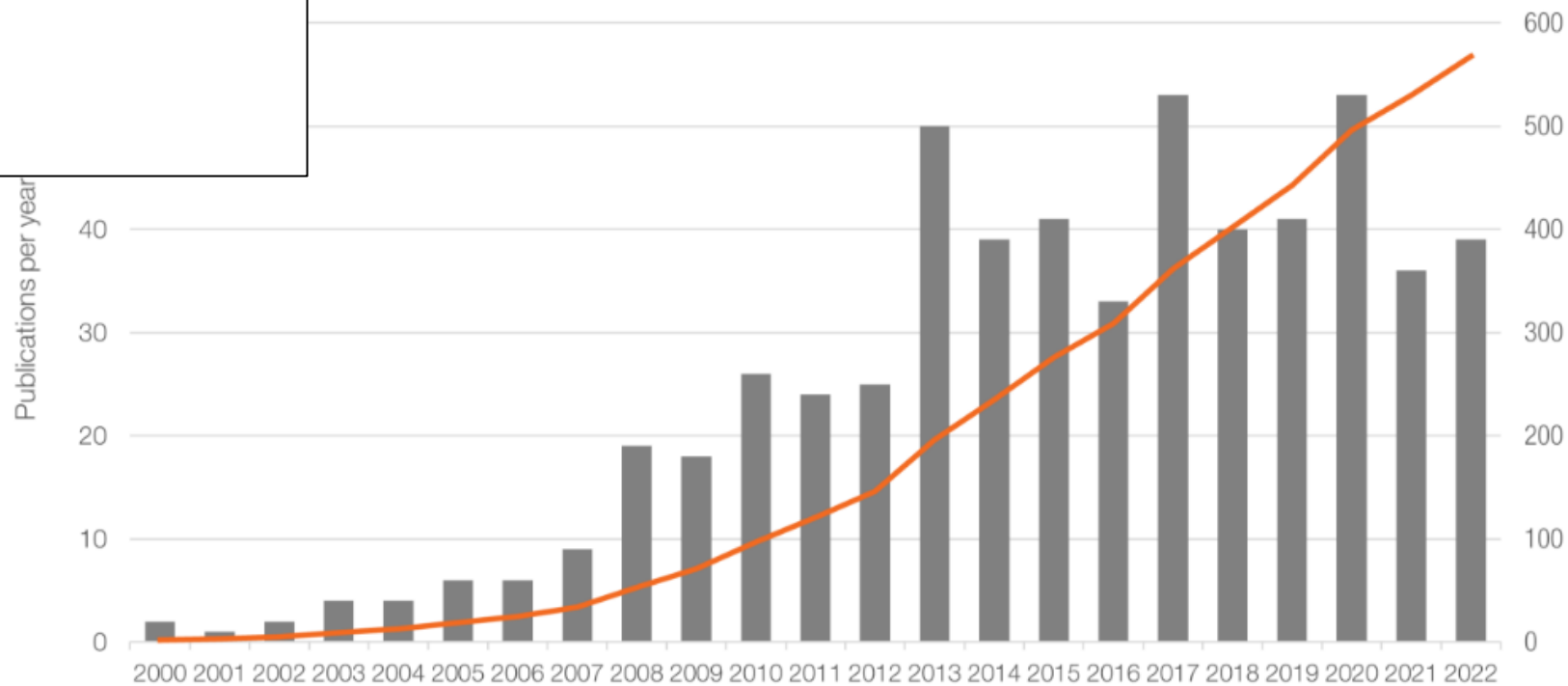


# Le plus vieux LOKOMAT



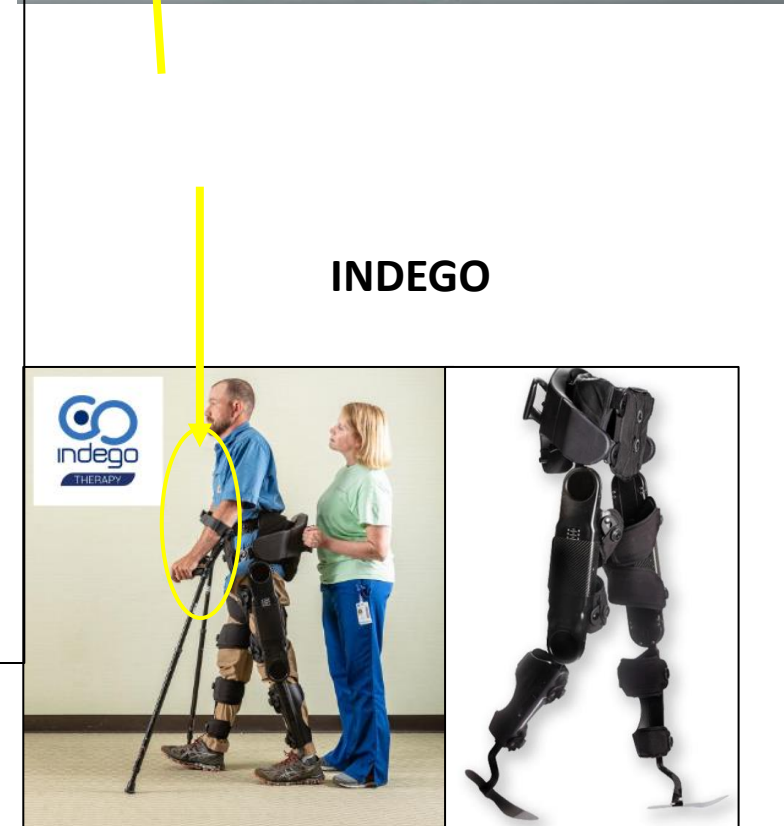
## LOKOMAT THERAPY IS BACKED UP BY 20 YEARS OF CLINICAL RESEARCH

ations



## EXOS NON AUTO STABILISÉS («MARCHE «LIBRE»)

- **necessite des cannes :**
- **incompatible pour les LIS**
- **poids et dimensions réduites ... Et prix !**
- LIS incomplets ... Peut-être avec déambulateur
  - à appui anté-brachial
  - pour travail en kiné ?



# EXOS AUTOSTABILISES (MARCHE LIBRE)

Atalante

- *Se lever, s'asseoir, se pencher en avant / les côtés, piétinements*
- *Pas latéraux, demi-tours et tours complets, marche AR*
- *training du rachis/tronc/ abdominaux*

Qu'est ce qu'un exosquelette de marche?



## Exercices fonctionnels avancés



Marcher en gérant ses courbes de trajectoire au sol

Marcher en faisant une courbe de 90° vers la droite ou la gauche en faisant un arrêt maximum.

Marcher en faisant une courbe de 180° vers la droite ou la gauche en faisant deux arrêts maximums.

Marcher en faisant une courbe de 90° vers la droite ou la gauche sans arrêt.

Marcher en faisant une courbe de 180° vers la droite ou la gauche sans arrêt.

Faire un slalom autour de 4 plots espacés de 3 m, associé ou non au déplacement d'un objet.



Bénéfices rééducatifs attendus :

*Transfert d'appui*

*Travail du tronc/axial*

*Travail des amplitudes articulaires dans les différentes phases de la marche et les demi-tours : permet de travailler les rotations et les abductions et non seulement les flexions/extensions*

*Travail de la proprioception dans tous les plans de l'espace*



S'arrêter avec précision

S'arrêter lorsque l'examineur le demande.

S'arrêter à moins d'un mètre d'un plot.

S'arrêter à moins de 50 cm d'un plot.

Marcher, s'arrêter et gérer sa trajectoire autour d'un meuble

S'arrêter à proximité et en face d'un meuble en carton de 94 cm de hauteur et déplacer un objet de 5kg.

S'arrêter à proximité et en face d'un meuble en carton de 94 cm de hauteur, faire un tour de 90° et déplacer un objet de 5kg.



**Possiblee chez LIS incomplets avec harnais + collier cervical (en cours d'adaptation par WC)**



# EXOS AUTOSTABILISES (MARCHE LIBRE)

Atalante

- *Marche libre sans AT, naturelle*
- *bipède, déplacement dans l'espace (3D + CV), on regarde devant soi*
- *bras libres pour «autre chose» (tenir, attraper, lancer)*
  - *training MS lors d'APA +++*
- *Travail en double tâche*



## Tâches orientées MS

### Equilibre sans objet

Transférer son poids sur la jambe droite et la jambe gauche.



Bénéfices rééducatifs attendus :

Transfert d'appui

Renforcement axial



### Echange de balles avec le kiné

Echanger une balle avec le kinésithérapeute (ballon de basket, Medecine ball, etc.). Cet exercice peut permettre de travailler l'équilibre du tronc et global du patient.



Bénéfices rééducatifs attendus :

Travail de renforcement du tronc et des membres supérieurs

Travail proprioceptif global

Renforcement de l'appareil extenseur



# EXO AUTOSTABILISE (MARCHE LIBRE)

Atalante

- **Modalité**

- d'assistance complète, partielle (participation patient) ou résistance
- D/G différencié possible
- 12 degrés de liberté par membre (6 hanche, 2 genou, 4 cheville)
- 1 personne derrière
  - Pour la sécurité + contrôle ESO (tetra)
  - poids et volume plus importants que c/o les autres exosquelettes



# CHU de Nîmes X Wandercraft



## Parcours patient au CHU de Nîmes

- 4-8 semaines de rééducation intensive 5 jours sur 7
- 3 jours de thérapie conventionnelle / 2 jours de séance avec ATALANTE
- 90' de séance par jour
- 2 rééducateurs consacrés aux séances d'exosquelette
- Bilan d'entrée / Bilan de sortie
- Synthèse de l'équipe pluridisciplinaire

## L'équipe :

- Docteur référent : Dr PELLAS
- 2 infirmières
- 6 kinés formés
- 2 EAPA formés



# CRITÈRES D'EXCLUSION

- **Escarres (stade 2) aux points d'appui** / vérifier leur non apparition en fin de séance ++
- **Instabilité vertébrale** / Arthrodèse vertébrale < 3 mois
- **Fracture vertébrale sans arthrodèse inférieure à 6 mois**
- **Chez para complet OU non marchant : Ostéoporose : T Score inférieure à 2.5**
- Spasticité à 4 sur la MAS (rétractions ... selon) ou à 3 (selon le nombre et la zone de muscles)  
// OK jusqu'à 2/4 à la MAS
- **Hypotension Orthostatique : test hTO à l'inclusion + à qq minutes de marche avec exo**
- Troubles cognitifs qui ne permet pas suivre des directives
- **Pieds Equins : en théorie** aucun, tester réductibilité debout, 15° max. possibles avec cale de compensation

## Limites anthropométriques

- Longueurs segmentaires
  - Largeur de hanches/bassin : elle doit être comprise entre 32 et 46 cm
  - Longueur de cuisse : elle doit être comprise entre 56.8 cm et 64.8 cm
  - Distance entre le sol et le genou : elle doit être comprise entre 45.7 cm et 60.7 cm chaussures comprises
- Masse : elle ne doit pas être inférieure à 30 kg et ne doit pas être supérieure à 100 kg
- Taille : elle ne doit pas être inférieure à 150 cm et ne doit pas être supérieure à 190

# ReHo ... Rehabilitation Hero

*Nimble Robotics (Politecnico Torino)*



Exosquelette actif avec six degrés de liberté par articulation

- hanche, genou et cheville = 18 par membre

Intensité D/G différenciée possible pour les deux jambes

Support de rail

Soulagement partiel ou total du poids

Ce n'est pas vraiment une marche libre dans l'espace

# RÉÉDUCATION ASSISTÉE PAR ROBOT

## .... OU UNE AIDE TECHNIQUE ?

### ➤ Déambulation

- Maintenant – facile = via allègement du poids + rail ou porche
- Maintenant, mais cela coûte toujours... =
  - Statique sur tapis & Soulagement du poids & ESO = Lokomat
- Trois EXOS de marche « overground » (libres) sont FDA+ pour un usage personnel

### ➤ Révisions et méta-analyses difficiles à interpréter

### ➤ DE + en + utilisation de la robotique en complément du traitement conventionnel



### ➤ Futur:

- Rééducation intensive et prolongée avec des robots
- + autres technologies associées : VR, BMI, SEF



FDA +

Indego





Available online at

ScienceDirect

www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte

www.em-consulte.com

Original article

## Effect of wearable exoskeleton on post-stroke gait: A systematic review and meta-analysis

Ting-Hsuan Hsu<sup>a</sup>, Chi-Lin Tsai<sup>a</sup>, Ju-Yang Chi<sup>a,b</sup>, Chih-Yang Hsu<sup>a</sup>, Yen-Nung Lin<sup>a,c,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of Physical Medicine and Rehabilitation, Wan Fang Hospital, Taipei Medical University, Taipei, Taiwan

<sup>b</sup> School of Medical Sciences, Faculty of Medicine and Health, The University of Sydney, Australia

<sup>c</sup> Graduate Institute of Injury Prevention and Control, Taipei Medical University, Taipei, Taiwan

**Conclusions:** Exoskeleton-assisted training was superior to dose-matched conventional gait training in several gait-related outcomes at the end of the intervention and follow-up in this systematic review and meta-analysis, which may support the use of exoskeleton-assisted training in the rehabilitation setting. Whether wearing versus not wearing a wearable exoskeleton is beneficial during walking remains unknown.



# The Improvement of Walking Ability Following Stroke

A Systematic Review and Network Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials

Jan Mehrholz, Marcus Pohl, Joachim Kugler, Bernhard Elsner

Deutsches Ärzteblatt International | Dtsch Arztebl Int 2018; 115: 639–45

Conclusion: In comparison to conventional gait rehabilitation, gait training assisted by end-effector apparatus leads to a statistically significant and clinically relevant improvement in gait velocity and maximum walking distance after stroke, while treadmill training with body weight support leads to a statistically significant and clinically relevant improvement in maximum walking distance.

## Electromechanical-assisted training for walking after stroke (Review)

Mehrholz J, Thomas S, Kugler J, Pohl M, Elsner B

### Implications for practice

This Cochrane Review provides high-quality evidence that the use of electromechanical-assisted gait-training devices in combination with physiotherapy increases the chance of regaining independent walking ability among people after stroke. These results could be interpreted as preventing one participant from remaining dependent in walking after stroke for every eight treated. However, this apparent benefit for patients is not supported by our secondary outcomes.

Gait-training devices were associated with improvement in walking velocity (low-quality evidence) but not in walking capacity (moderate-quality evidence). It seems that the greatest benefits with regard to independence in walking and walking speed were achieved by participants who were non-ambulatory at the start of the study and by those for whom the intervention was applied early post stroke.

# Advanced Technologies for the Rehabilitation of Gait and Balance Disorders

## The End-Effector Device for Gait Rehabilitation

Nicola Smania, Christian Geroin, Nicola Valè and Marialuisa Gandolfi

### 5 Conclusions

The literature suggests that end-effector devices can improve gait and balance performance in patients with neurological disorders. Despite the lack of common and shared treatment protocols, 20 min of gait training is generally considered to be the shortest time potentially able to produce changes in gait and balance performance.

To speed up progress in this field of research, clinical randomized controlled trials on larger samples of patients are needed. These trials should be designed with the aim of improving knowledge of robot-mediated learning mechanisms and, in particular, of robotic assistance, robotic perturbation, VR, and the interfacing of the brain with robotic devices, and also their combined effects. In addition, software designed to enhance sensory augmentations and sensorimotor integration processes (i.e. using vision manipulations) should be implemented.

## Et puis à la maison ? :

- **nouvelles aides techniques à la marche**
  - Orthèses intelligentes
  - Cyclo-ergomètre (Motomed) ;
- **systemes personnels (exosquelette individuel)**

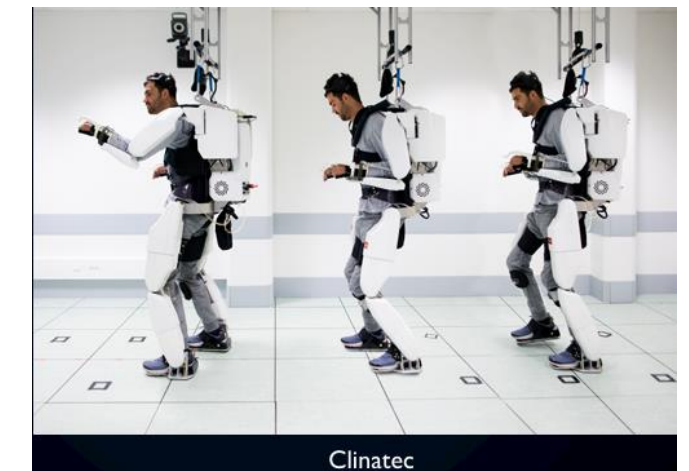
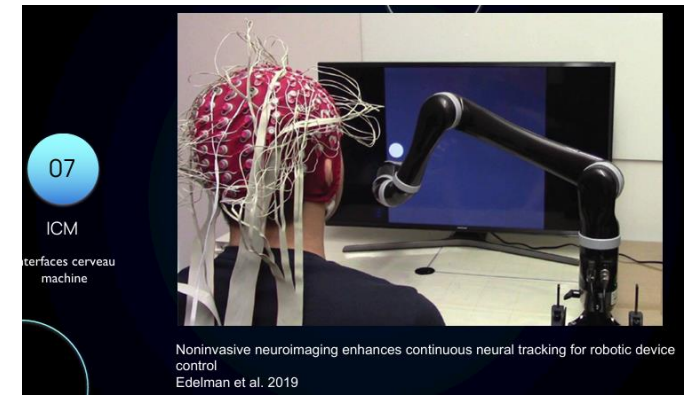
# Et puis à la maison ? ... pour les incomplets ...?

➤ nouvelles aides techniques à la marche, ou à la « rééducation » chez soi...



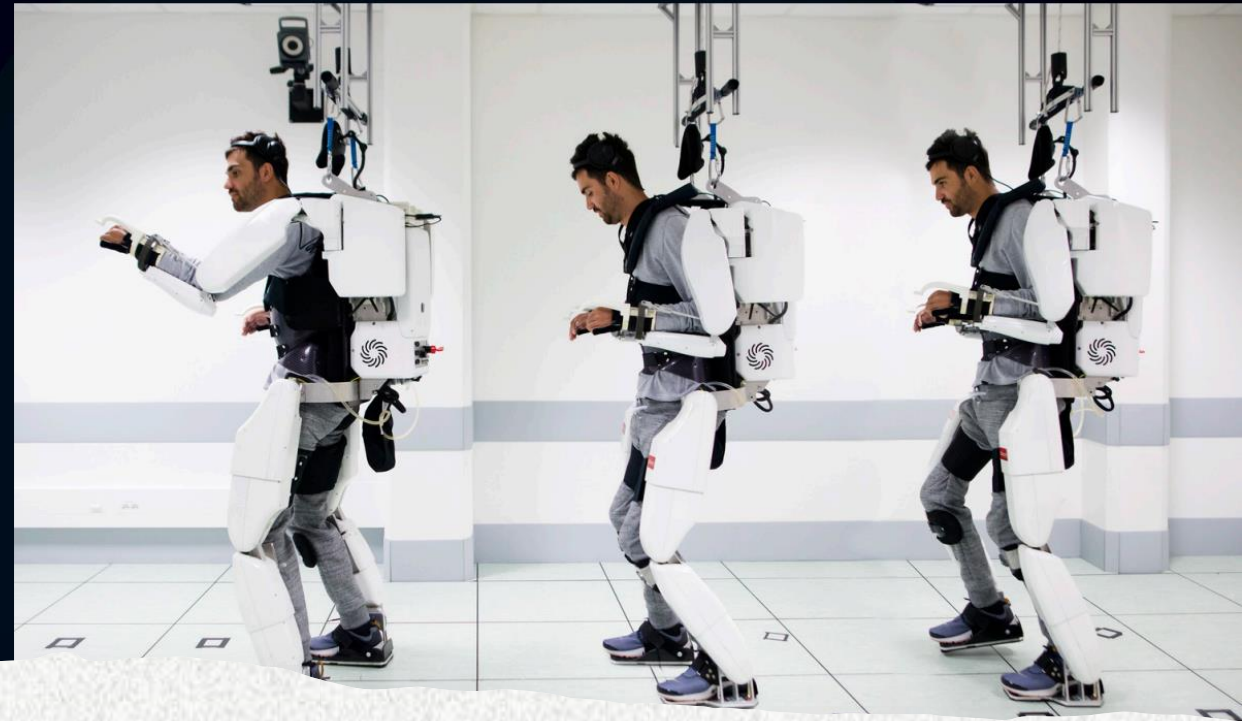
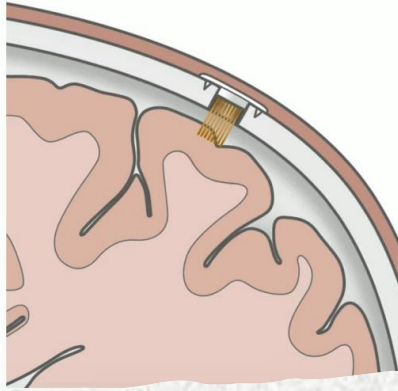
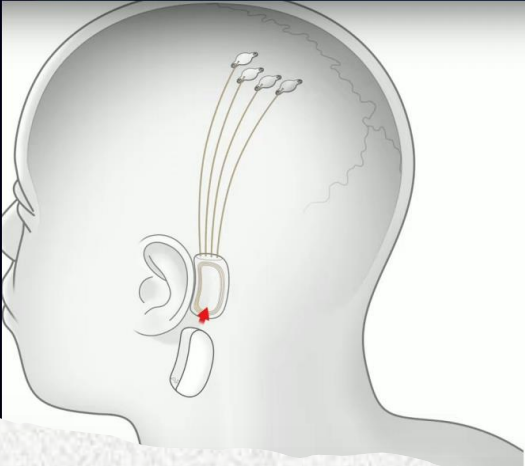
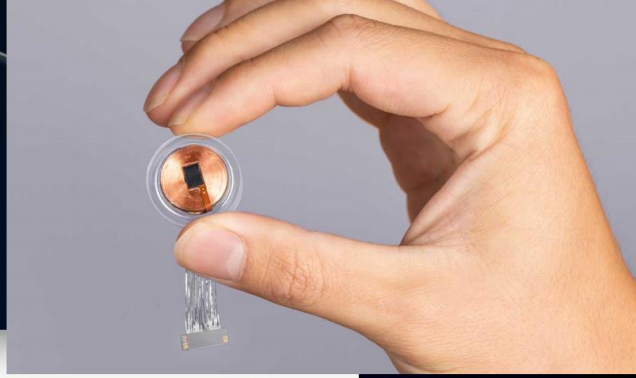
# Avenir : techniques associées

- \* IMC (interface cerveau-machine)
- \* VR
- \* SEF & feed-back sensoriel
- \* IA pour optimiser l'auto-contrôle et la personnalisation de l'appareil
  
- \* Rééducation répétitive et intense  
30'/jour, 4-5/semaine, \*2M



exosquelettes MS et MI avec interface cerveau machine

NEURALINK



Perspectives

# La robotique progresse et on commence à travailler avec...



<https://www.youtube.com/watch?v=fn3KWM1kuAw>

<https://www.youtube.com/watch?v=fn3KWM1kuAw>