

# Stimulation électrique nerveuse implantée et signaux sEMG sus-lésionnels pour la restauration sélective et le contrôle de mouvements de main et d'avant-bras chez des patients présentant une tétraplégie complète

Wafa Tigra, PhD

Colloque Jeunes Chercheuses, Jeunes Chercheurs,  
Handicap, Vieillissement, Indépendance, Insertion, Technologies

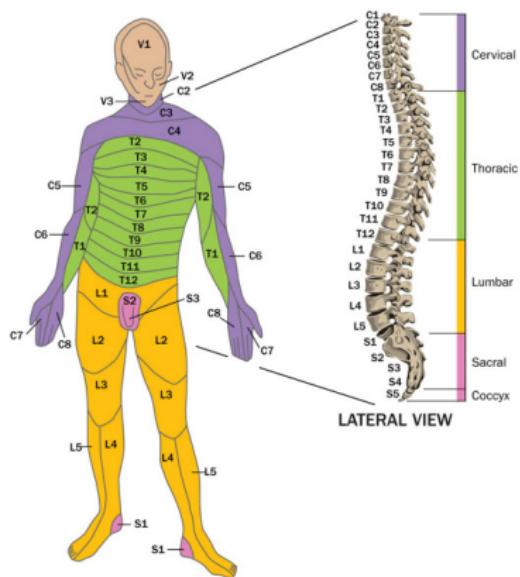
13 Juin 2019,  
[wafa.tigra@gmail.com](mailto:wafa.tigra@gmail.com), [wtigra.github.io](http://wtigra.github.io)



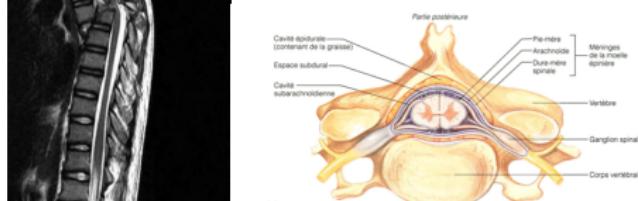
Axonic  
NEUROSTIMULATION SYSTEMS



# Lésions de la moelle épinière



Correspondance métamère médullaire et aire innervée, d'après sci-bc.ca



- 1200 nouveaux cas /an
- Prévalence estimée à 50.000 en France

Population tétraplégique :

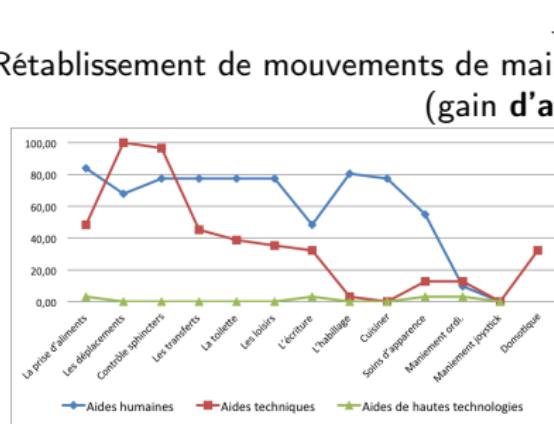
- 39 %
- Espérance de vie à 25 ans : 40 ans
- Sexe ratio : 3 hommes pour 1 femme
- niveau C5 : 30 %
- Complet moteur : 55 %

Pourquoi restaurer des mouvements de préhension chez la personne tétraplégique ?

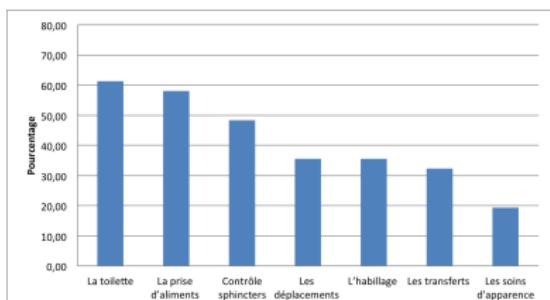
### Priorités de récupération

#### Perte d'autonomie et priorité de récupération

Conséquences : déficits moteurs et sensoriels, douleurs articulaires, escarres, complications urinaires, affections multi-systémiques...



Domaines pour lesquels les sujets tétraplégiques (tous niveaux confondus) ont besoin d'aide (n=31).

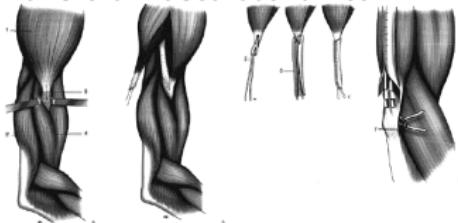


Tâches jugées prioritaires en termes d'espoir de récupération fonctionnelle (n=31).

## Comment peut-on restaurer des mouvements ?

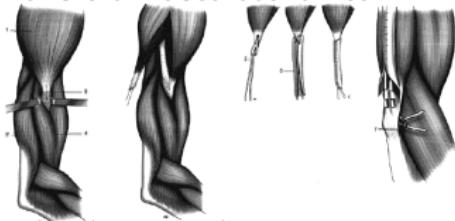
## Comment peut-on restaurer des mouvements ?

- Transfert musculotendineux



## Comment peut-on restaurer des mouvements ?

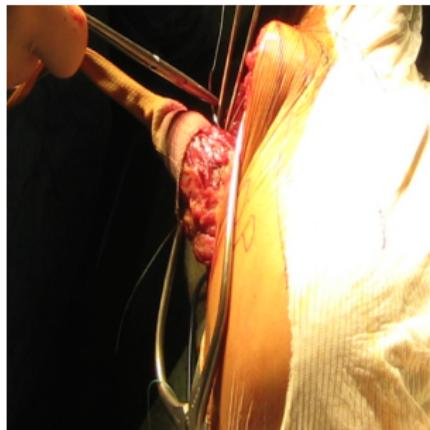
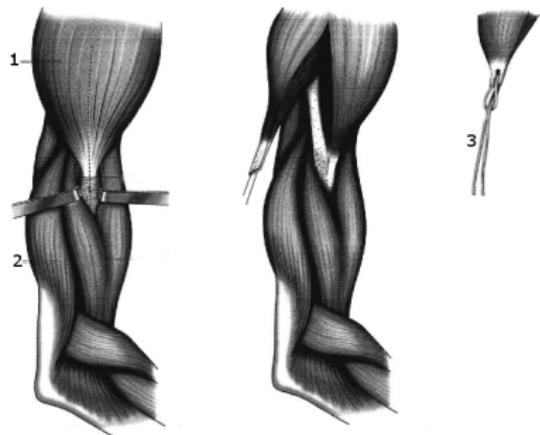
- Transfert musculotendineux



- Stimulation Electrique Fonctionnelle

Comment peut-on restaurer des mouvements ?

## Transfert musculo-tendineux

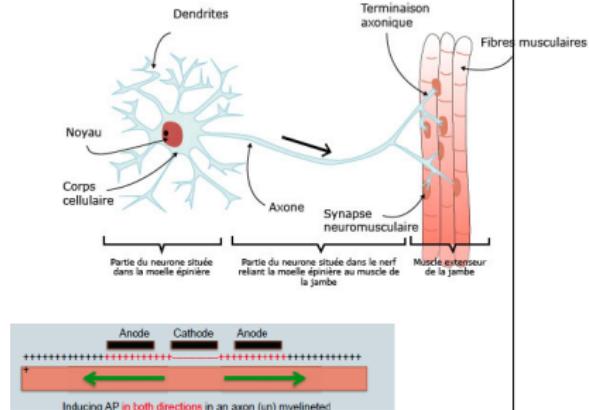


Transfert du deltoïde postérieur sur le tendon du triceps pour restaurer une extension du coude. 1. deltoïde postérieur ; 2. triceps brachii ; 3. ligament synthétique, d'après B. Coulet et al. 2003

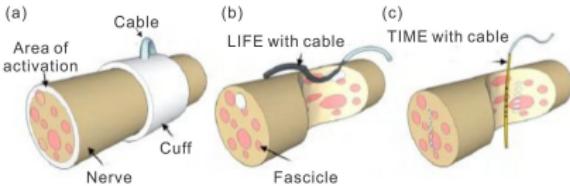
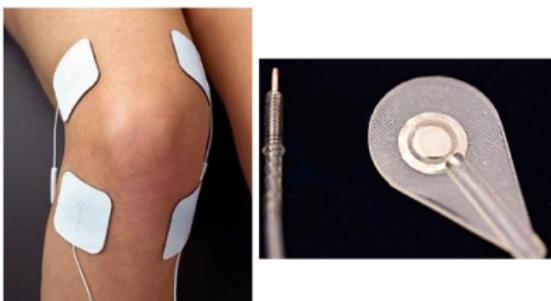
- Requiert au minimum 2 muscles agonistes
- La rééducation ne marche pas toujours

## Principe de la FES

## Principe de la FES



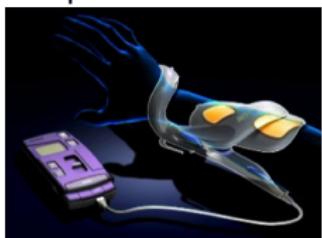
PA et ES



## Electrodes de stimulation externes et implantées

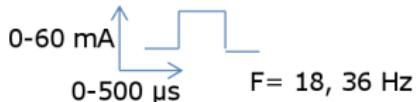
# Dispositifs d'électrostimulation externe

Dispositifs externes : Handmaster, Bionic Glove, ActiGrip...



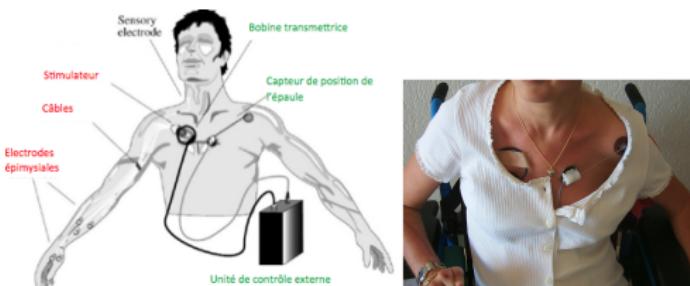
Le HandMaster

- Stimulation via 3 électrodes de surface
- Interface sujets : interrupteur

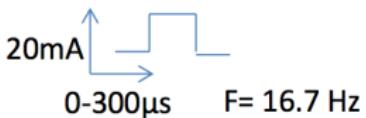


- Seule neuroprothèse pour le membre sup. non invasive commercialisée
- 2 modes de préhension :
  - flexion des doigts
  - opposition du pouce
- Limitations :
  - mode de déclenchement de la stimulation,
  - variabilité dans la taille des membres supérieurs inter sujets,
  - sélectivité de stimulation (muscles profonds et/ou de petite taille)

# Dispositifs d'électrostimulation implantée : le système Freehand



Le système Freehand d'après J. Hobby et al. 2001



- Interface sujets : épaule controlatérale
- Stimulation épimysiale (jusqu'à 8 canaux de stimulation)

# Dispositifs d'électrostimulation implantée : le système Freehand



Les modes de préhension permis par le système Freehand

- 2 modes de préhension :
  - palmaire : de 4,7-7,0 N (effet tenodèse) à 21-29,5 N (via stimulation électrique)
  - latéral : de 0,3-1,7 N sans stimulation à 16,3 N avec stimulation

- Plus de 300 sujets implantés dans le monde dont 6 en France (5 à Montpellier par J. Teissier)
- Limitations :

- nombre de composants externes
- absence de contrôle bilateral
- externalisation des électrodes
- énergie nécessaire

## ① Objectif :

- répondre aux attentes et besoins de la population tétraplégique qui ne peut pas bénéficier d'un **transfert musculo-tendineux** pour retrouver des mouvements de main, en restaurant une préhension palmaire et latérale et
- pallier les complications du système "Freehand".

## ② Via

- **stimulation électrique neurale** et
- mode de pilotage **ergonomique** de cette stimulation.

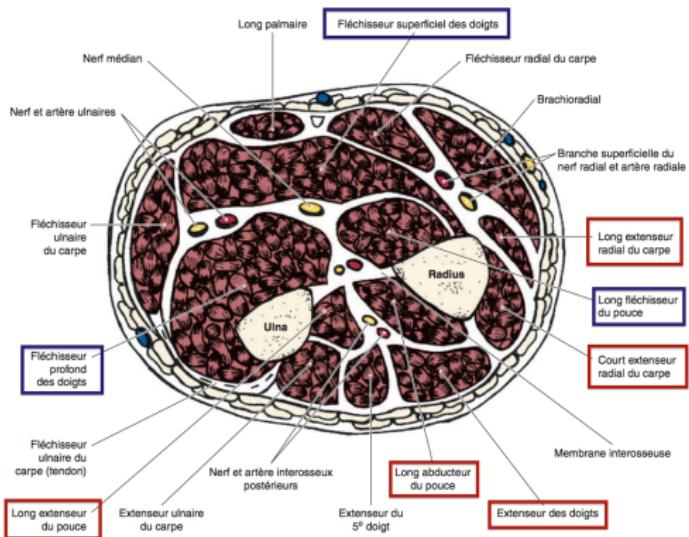
Rappel limitations SEF épimysiale par Freehand :

- nombre de composants implantés
- externalisation des électrodes
- énergie nécessaire
- absence de contrôle bilateral
- nombre de composants externes

# SE sélective neurale pour la restauration de fonctions de préhension

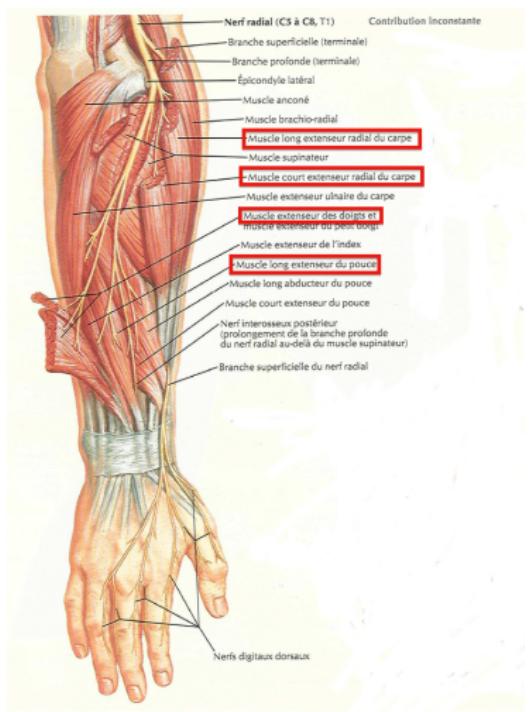
## Stimulation des muscles :

- ECRL/B (radial)
- EDC (radial)
- EPL (AbPB) (radial)
- FPL (median)
- FDS (median)
- FDP (median)

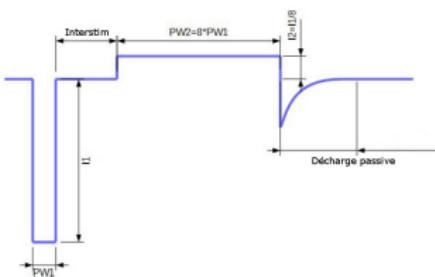


Coupe transversale au tiers moyen de l'avant-bras droit

# Défi de la SE sélective neurale pour la restauration de fonctions de préhension



# SE sélective neurale pour la restauration de fonctions de préhension

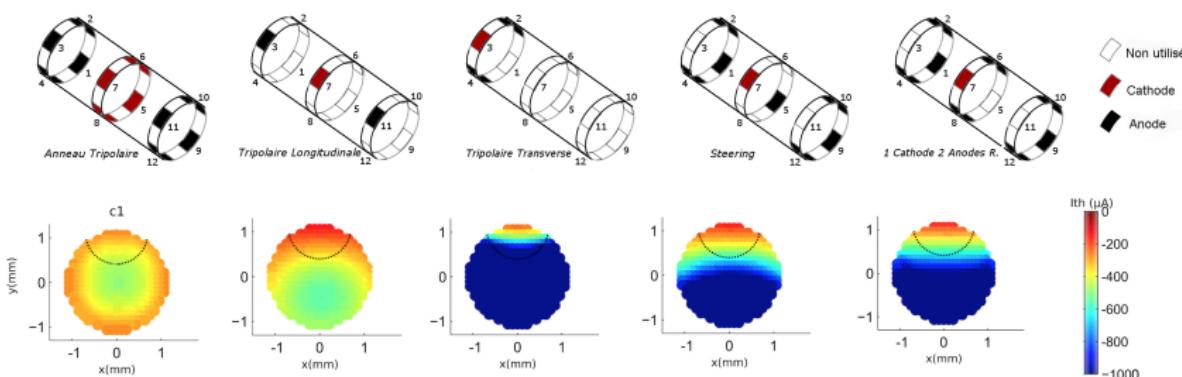


06/02/2016

- Intensité croissante pouvant atteindre 2.4 mA
- Stimulation tétanique pendant 2 secondes

## Configurations de stimulation pertinentes

## Configurations de stimulation pertinentes



Cartographie transversale d'un nerf illustrant le courant nécessaire à l'activation des axones cibles en fonction du type de configuration de stimulation, d'après O. Rossel et M. Dali

## Compromis entre sélectivité et courant injecté

- Jusqu'à 40 configurations de stimulation différentes jugées pertinentes

## Etude de Faisabilité: Protocole

- 6 patients présentant un tétraplégie complète,
- XP réalisées lors d'un transfert mulculo-tendineux,
- Inclusion : Mapping réalisé avant chirurgie positif (ES) pour au moins 1 muscle fléchisseur ou 1 muscle extenseur



Sujet	Sexe	Age (années)	Temps depuis l'accident (mois)	Nerf stimulé	Côté opéré	Score de Giens
P1	M	19	30	median	droit	1
P2	M	23	22	radial	gauche	0
P3	M	25	34	radial	gauche	1
P4	M	31	21	radial	gauche	2
P5	M	32	29	radial	gauche	2
P6	M	54	7	median	droit	2

Table : Caractéristiques des patients

## Etude de faisabilité: Résultats

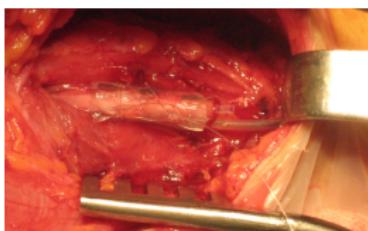


Electrode cuff 4 mm cuff placée atour du nerf radial, environ 5 cm au dessus du coude

**Patient 4 : Stimulation du nerf radial** (Clinique Beausoleil, Dr Teissier, Montpellier)

- Chirurgie bras gauche

## Etude de faisabilité: Résultats



Electrode cuff 4 mm cuff placée atour du nerf radial, environ 5 cm au dessus du coude

**Patient 4 : Stimulation du nerf radial (Clinique Beausoleil, Dr Teissier, Montpellier)**

- Chirurgie bras gauche
- Activation sélective des muscles Extensor Carpi Radialis, Extensor Digitorum Communis and Extensor Pollicis Longus (MRC scale = 4/4+, 25 Hz, 250  $\mu$ s; [700-1100]  $\mu$ A )

## Etude de faisabilité: Résultats



Electrode cuff 6 mm placée autour du nerf médian, environ 5 cm sous le coude

**Patient 6 : Stimulation du nerf médian (Clinique Beau Soleil, Dr Teissier, Montpellier)**

- Chirurgie bras droit

## Etude de faisabilité: Résultats



Electrode cuff 6 mm placée autour du nerf médian, environ 5 cm sous le coude

**Patient 6 : Stimulation du nerf médian** (Clinique Beau Soleil, Dr Teissier, Montpellier)

- Chirurgie bras droit
- Activation sélective des muscles Flexor Pollicis Longus, Flexor Digitorum Superficialis (MRC scale = 3-4, 25 Hz, 250  $\mu$ s; [1000-1600]  $\mu$ A)

## Etude de faisabilité: Résultats

### Mouvements sélectifs:

- pour le patient I : flexion du poignet,
- pour le patient II : extension du pouce,
- pour le patient III : supination, extension du poignet,
- pour le patient IV : extension du poignet, du pouce, des doigts,
- pour le patient V : supination, flexion du coude, extension du poignet,
- pour le patient VI : flexion des doigts, du pouce, opposition du pouce (pince palmaire et latérale ont également été observées).

## Stimulation du nerf radial

## Etude de faisabilité: Résultats détaillés pour le nerf radial

Patient ID	Mouvements sélectifs [induit avec la configuration #]	Amplitude de stimulation, ( $\mu$ A)	Score MRC <sup>2</sup> maximal (valeur)
2	Extension du pouce [3, 17, 18 bis]	188, 300, 300	2
	Extension des doigts [11 bis]	375	
3	Extension du poignet [3, 8, 7, 10, 11, 12, 14, 17, 18 bis]	270, 150, 150, 180, 150, 540, 150, 150	4+
	Supination [3 bis]	360	5
	Flexion du coude [1' bis]	330	3
4	Extension du pouce [2, 28*, 32, 33, 34 bis]	750, 1319, 963, 1663, 1094	2
	Extension du poignet [1, 6, 7, 10, 11, 12, 14, 24, 25*, 28, 38* bis]	525, 450, 525, 450, 525, 525, 525, 600, 525, 1094, 1313, 1838, 963	4+
	Extension des doigts [32* bis]	960	5
5	Flexion du pouce [4, 28*, 34 bis]	488, 1444, 919	3
	Extension du poignet [1, 8, 12, 14, 17, 24 bis]	375, 525, 525, 525, 450, 1313	4
	Supination [1', 2, 3, 6, 7, 11, 18, 19, 28, 29, 30, 32*, 34* bis]	375, 450, 525, 300, 300, 413, 413, 450, 656, 656, 1181, 910, 1313	3

TABLE 2 – Observations visuelles des mouvements sélectifs [induit via la configuration # de la table 4 de [23]] lors de la stimulation du nerf radial, les configurations robustes (#) sont en **gras**. \*Electrode tournée à 180°

Patient ID	Mouvements non sélectifs [induit avec la configuration #]	Amplitude de stimulation ( $\mu$ A)	Score MRC maximal (valeur)
2	Extension du pouce + doigts [1, 3, 7, 17, 18, 33 bis]	300, 225, 150, 338, 338, 438	3, 3
	Extension du pouce + doigts + poignet [1, 3, 7, 11, 14, 17, 18, 25, 33 bis]	375, 300, 188, 150, 225, 375, 375, 263, 525	4, 3, 4
3	Supination + extension du poignet [3 bis]	600	3, 3
	Extension du poignet + doigts [2, 10 bis]	210, 240	3, 3
	Supination + extension du poignet + flexion du coude [6 bis]	180	3, 3, 3
4	Extension du poignet + extension des doigts [1' bis]	200	3, 2
	Extension du poignet + pouce + doigts [1', 6, 10, 11, 12, 14, 17, 18, 24, 28*, 32, 34 bis]	675, 525, 675, 900, 750, 675, 825, 788, 103, 1488, 1488, 1356	4, 4, 4
	Extension du poignet + pouce [2, 11, 12, 24, 28, 32, 33, 34]	675, 750, 600, 525, 600, 750, 600	3, 3
5	Extension du poignet + doigts [1, 8, 10, 14, 17, 18 bis]	675, 750, 600, 525, 600, 750, 600	5, 5
	Extension du poignet + flexion du coude [1, 12, 24, 25, 28*, 29*, 34 bis]	525, 600, 1575, 919, 1575, 656, 1181	5, 5
	Extension du poignet + flexion du coude [10, 29* bis]	488, 1444, 919	4, 4, 3
	Extension du poignet et des doigts [8, 10, 17 bis]	600, 300, 563	4, 3
	Supination + extension du poignet [1', 11, 18, 19, 29, 30 bis]	413, 563, 488, 525, 1050, 1444	3, 3
	Supination + extension du poignet + flexion du coude [1', 6, 7, 19, 28, 29 bis]	525, 413, 413, 565, 919, 1313	3, 5, 5
	Supination + extension du poignet + flexion du coude + extension des doigts [6, 7, 28, 29 bis]	600, 525, 1181, 1575	3, 5, 5, 4

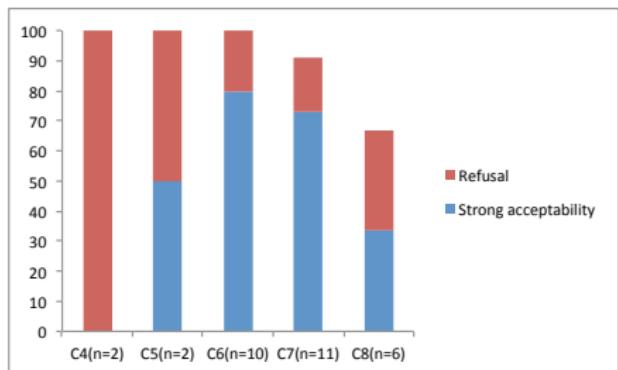
TABLE 3 – Observations visuelles des mouvements non sélectifs [induit via la configuration # de la table 4 de [23]] lors de la stimulation du nerf radial. \*Electrode tournée à 180°

Pour la correspondance "#" vs "configuration de stimulation" et plus de détails concernant la stimulation du nerf median: cf. [TAT<sup>+</sup>19].

- Stimulation sélective possible
- Activation sélective très efficace, puissants mouvements dès  $150\mu A$
- Cartographie de surface vs mouvements en stimulation implantée

## Acceptabilité des dispositifs ES implantés

# Acceptabilité des dispositifs ES implantés



Acceptabilité d'un dispositif implanté en fonction du niveau lésionnel (n=31)

Enquête réalisée en 2013 au centre Propara, Montpellier, France

- Taille du dispositif et nombre de composants externe réduits.
- Contrôle bimanuel



Partie externe du système Freehand,  
avec l'autorisation de Charles Fattal,  
Propara, France

## Patients et Méthodes

- Interface sujets : EMG
- CMN Propara (13 sujets)
- EMGs des muscles trapèze, deltoïde, biceps, pectoral du cou (I et C)
- But : trouver la meilleure commande (maintien de la contraction, reproductibilité du mouvement, efforts physiques requis, efforts attentionnels, confort, fatigue du cou, fatigue de l'épaule...) pour chaque sujet

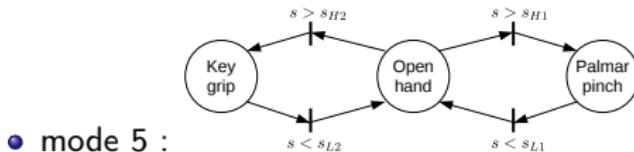
# Contrôle ergonomique de la stimulation nerveuse implantée

- Les signaux EMG **immédiatement sus-lésionnels** des patients tétraplégiques peuvent-ils être **utilisables** (protocole A)?
  - Une SCI n'est jamais "nette" = plusieurs métamères peuvent être touchés (faible signal EMG, muscles non fonctionnels...)
  - Maintient de cette contraction
  - Proprioception ...
- Les patients tétraplégiques peuvent-ils **contrôler une main robotique** (protocole B, différents modes programmés et évalués) via leurs contractions musculaires ? Ont-ils besoin d'entraînement ? Co-contraction ?
- Les patients tétraplégiques peuvent-ils **contrôler leur propre main** (protocole C) via leurs contractions musculaires ?

## Protocole B : méthodes

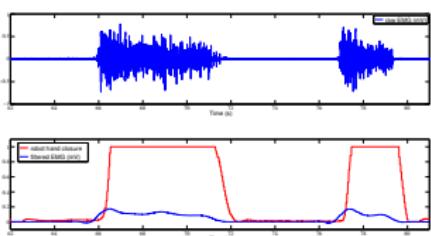
Différents modes programmés et évalués :

- mode 1 : contraction continue -> fermeture totale de la main, relâchement -> ouverture de la main
- mode 2 : contraction (impulsion unique) -> fermeture totale de la main, contraction (impulsion unique) -> ouverture de la main
- mode 3 : contraction gradée -> fermeture proportionnelle de la main, relâchement -> ouverture de la main
- mode 4 : contraction croisée

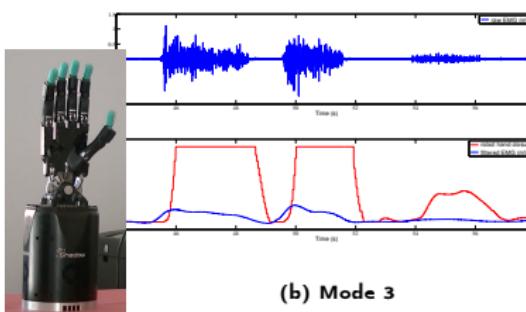


- mode 5 :

## Protocoles B et C



(a) Mode 1



(b) Mode 3

Exemple de commande de la main robotique générée à partir des enregistrements EMG chez le sujet 5 pour les modes 1 (a) et 3 (b). En haut : Signal EMG brut, en bas : signal EMG filtré (bleu) et trajectoire de la main (rouge). 0 : la main est ouverte, 1 : la main est fermée



## Bilan partie contrôle

- L'activité électrique des muscles sus lésionnels peut être utilisée comme interface
- Une contraction gradée et maintenue est possible
- Capacité proprioceptive
- L'objectif est atteint **dès la première tentative** -> technologie accessible
- Un muscle non fonctionnel peut être utilisé comme mode de commande
- Le contrôle est dépendant du sujet (muscle et/ou mode préférentiel)
- Cross-talk et co-contractions possibles

## Bilan

- Plus de neuroprothèse de stimulation implantée commercialisée permettant la restauration de mouvements de main
- Faisabilité d'une stimulation sélective neurale : comparaison des configurations
- Interface intuitive pour piloter la stimulation quelque soit le délai post-lésionnel

Merci de votre attention



Wafa Tigra, Christine Azevedo, Jacques Teissier, Anthony Gelis, Bertrand Coulet, Jean-Louis Divoux, and David Guiraud.

Implanted nerve electrical stimulation allows to selectively restore hand and forearm movements in patients with a complete tetraplegia.

*bioRxiv*, page 534362, 2019.