



# La robotique au service de la Stimulation Magnétique Transcrânienne



Romuald Ginhoux, PhD - Axilum Robotics

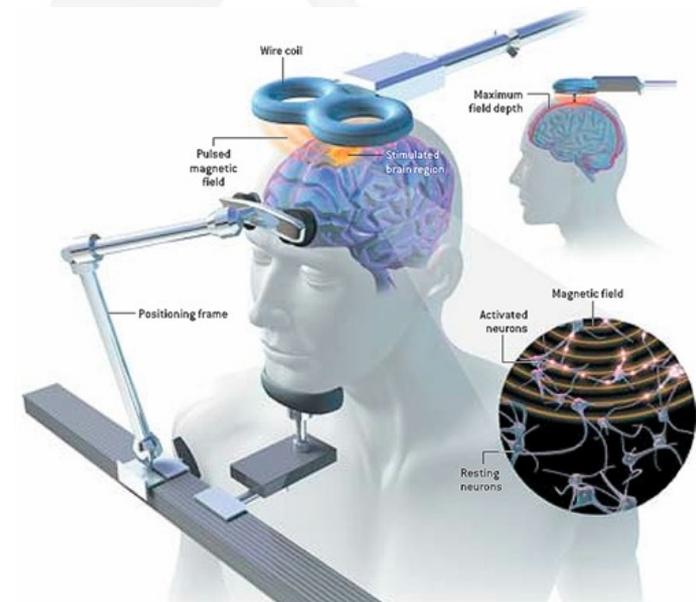
Pr. Bernard Bayle, Pr. Pierre Renaud - ICUBE/Université de Strasbourg



Journées de Neurophysiologie Clinique  
Mâcon, 29 juin 2016

# Stimulation Magnétique Transcrânienne (TMS)

- Technique de neurostimulation non-invasive focalisée
  - Champ magnétique pulsé appliqué sur la tête à l'aide d'une bobine
  - Induction d'impulsions électriques dans le cortex
  - Excitation/inhibition des neurones ciblés
- Applications thérapeutiques<sup>1</sup> troubles pharmaco-résistants
  - Dépression majeure
  - Douleur neuropathique chronique
  - Rééducation post-AVC
- Applications diagnostiques
  - Mesures d'excitabilité corticale
  - Cartographie pré-neurochirurgicale
- Recherche en neurosciences



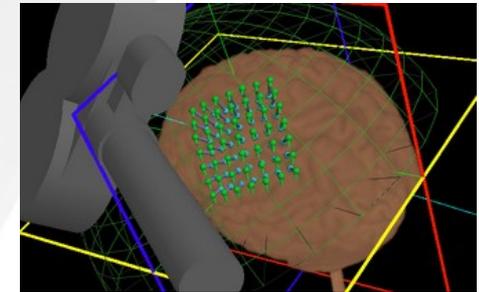
[1] Lefaucheur et al., *Evidence-based guidelines on the therapeutic use of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS)*, Clin Neurophysiol. 2014, 125(11):2150-2206

# Plan

- Les challenges de la TMS
- Les robots développés pour la TMS
- Le fonctionnement des robots de TMS
- Le futur de la TMS robotisée ?

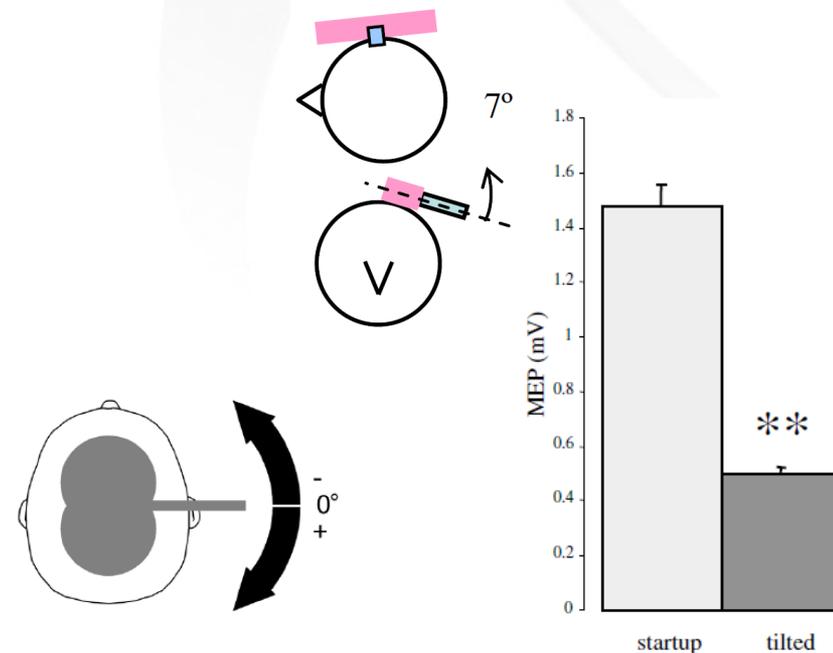
# Les challenges de la TMS : précision

- Tenir le centre de la bobine à la bonne position
- Avoir la bonne orientation par rapport au cerveau
- Maintenir la bobine au contact



- Incliner la bobine de  $7^\circ$  peut faire chuter de 60% le Potentiel Evoqué Moteur (muscle abducteur du pouce)<sup>1</sup>

- Tourner la bobine de  $30^\circ$  fait varier de 8% le PEM (muscle abducteur du gros orteil)<sup>2</sup>



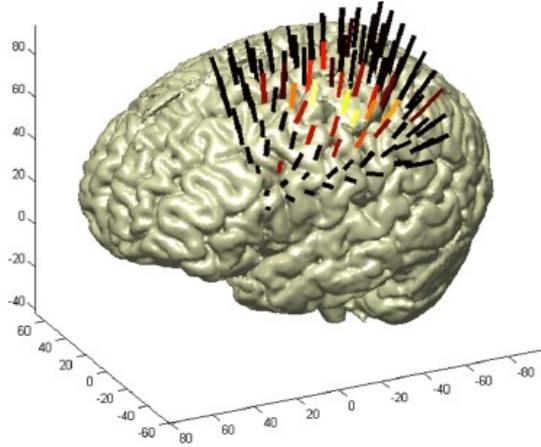
[1] Toschi et al., *Transcranial magnetic stimulation in heterogeneous brain tissue: Clinical impact on focality, reproducibility and true sham stimulation*, Journal of Psychiatric Research, 43 (2009), pp255-264

[2] Richter et al., *Optimal Coil Orientation for transcranial magnetic stimulation*, PLoS ONE 8(4): e60358, 2013.

# Les challenges de la TMS : répétabilité

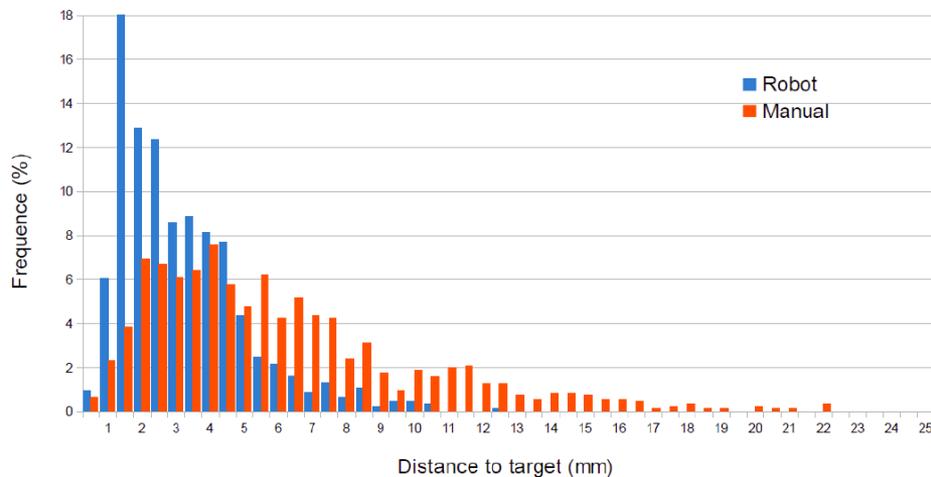
- Durée des séances
  - Stimuler une ou plusieurs cibles
  - Tenir la bobine pendant une durée prolongée
  - Compenser les mouvements de tête
- Répéter à l'identique une stimulation
  - Minimiser les biais : variabilité inter/intra-opérateurs (études cliniques)
- Optimiser les ressources médicales (applications thérapeutiques)
  - 20+ séances / patient
  - Nombre de patients à traiter

# Un robot ou un opérateur humain ?

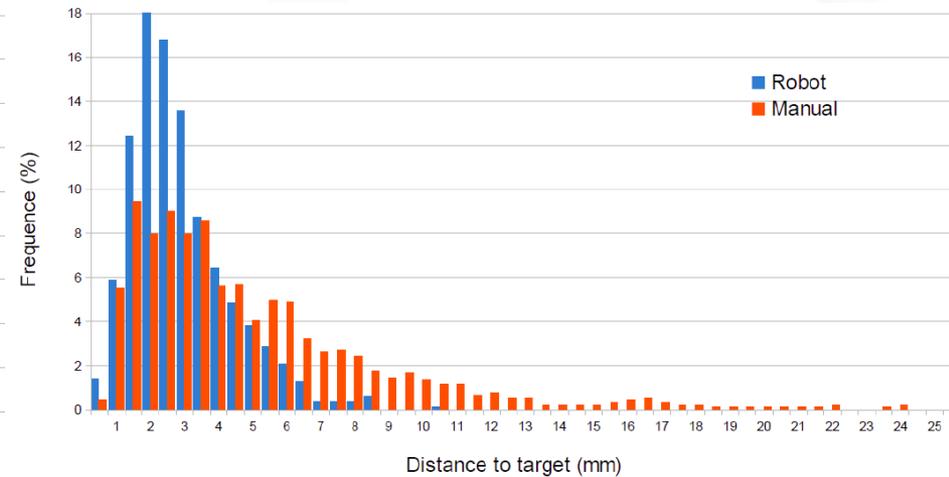


- Grille 10 x 10 centrée sur pouce droit
- Espacement de 10 mm
- 2 expériences : avec/sans pré-contraction
- Précision et répétabilité améliorée d'un facteur 2 ( $p < 0.01$ )

Précision

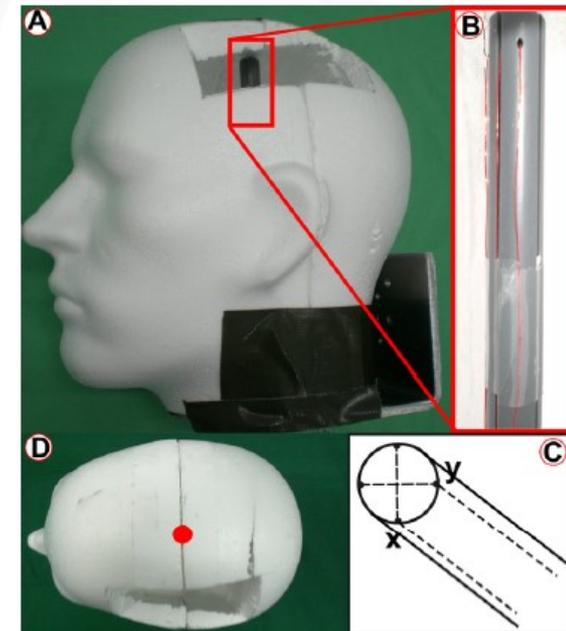
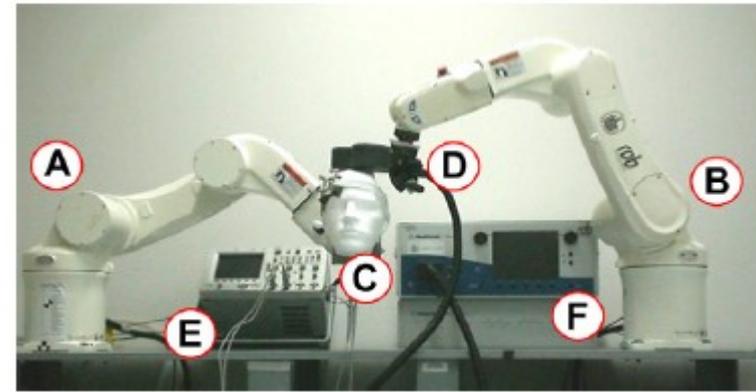


Répétabilité



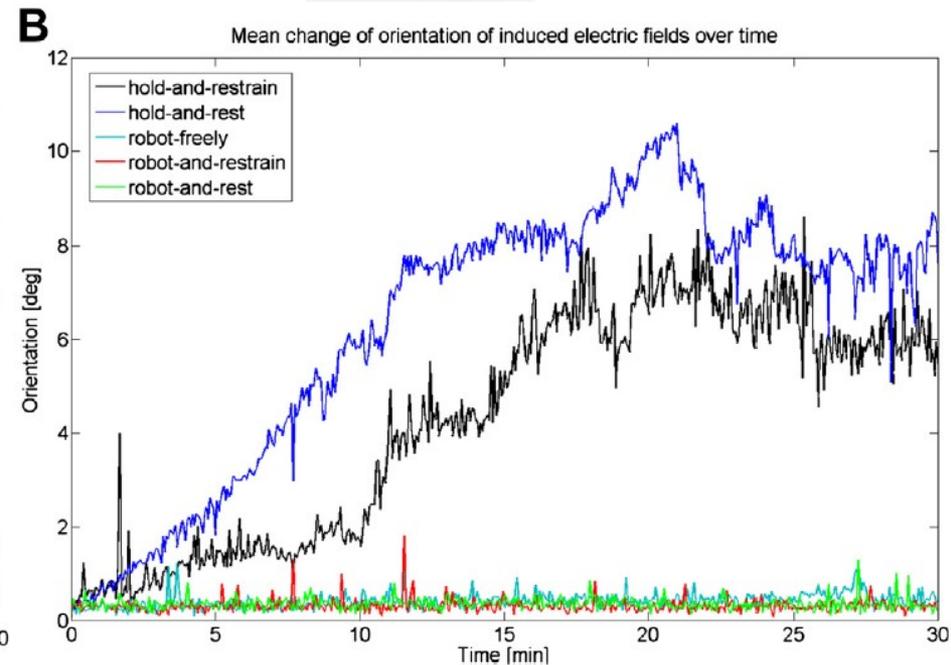
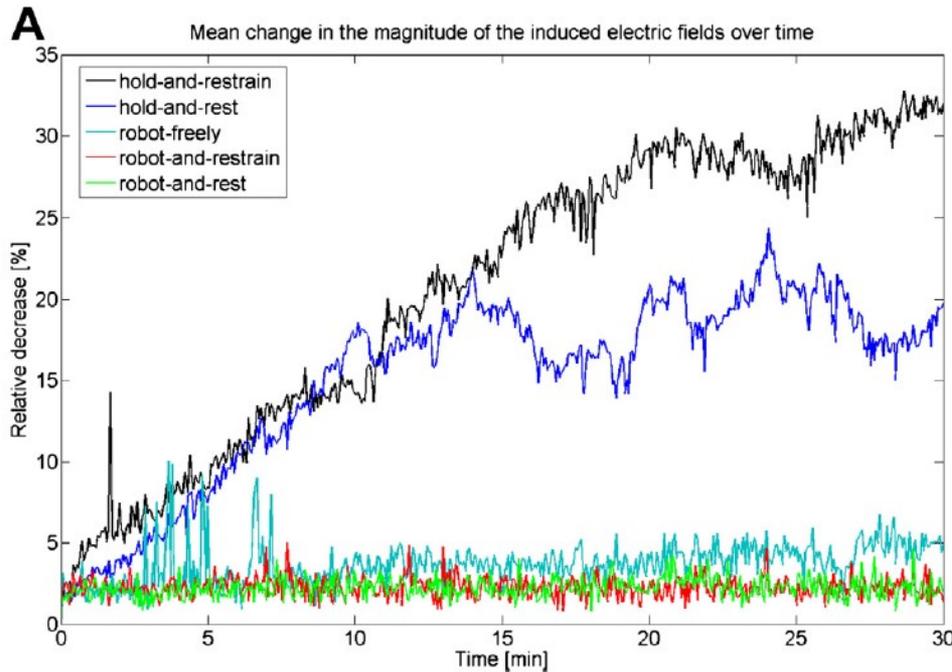
# Un robot ou un support fixe ?

- 3 comportements de patient testés
  - Se retenir de bouger (*restrain*)
  - Se reposer contre un appui-tête (*rest*)
  - Bouger librement (*freely*)
- 2 méthodes testées
  - Bobine sur robot (*robot*)
  - Bobine sur support fixe (*hold*)
- Mouvements réels enregistrés rejoués par un 2<sup>ème</sup> robot
- Mannequin
- Capteur de champ électrique



# Un robot ou un support fixe ?

- Bobine sur support fixe  $\Rightarrow$  déviation lente, même sur tête au repos
- Bobine sur robot  $\Rightarrow$  compensation de tous les mouvements



- $\Rightarrow$  Apport en confort
- Tenir et déplacer la bobine

# Plan

- Les challenges de la TMS
- **Les robots développés pour la TMS**
- Le fonctionnement des robots de TMS
- Le futur de la TMS robotisée ?

# Les robots développés pour la TMS

## Prototypes de laboratoire

- Université de San Antonio



- Bras de chirurgie NeuroMate
- Pas de mesure du contact
- Précision de positionnement : 2 mm

- Université de Helsinki



- Robot dédié
- Architecture sphérique
- Demi-arc pivotant d'avant en arrière
- Porte-bobine se déplaçant via un système motorisé
- Pas de mesure du contact

Lancaster et al., *Evaluation of an Image-Guided, Robotically Positioned Transcranial Magnetic Stimulation System*, Human Brain Mapping 22:329-340(2004)

Ruohonen, *Transcranial magnetic stimulation: modelling and new techniques*. Phd thesis, Helsinki University of Technology, Department of Engineering Physics and Mathematics, 1998.

# Les robots développés pour la TMS

## Prototypes de laboratoire

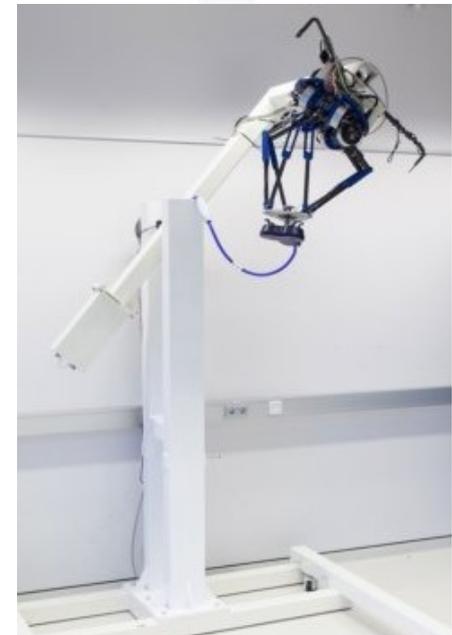
- Université de Rome
  - Robot collaboratif Kuka Lightweight
  - Capteurs de couple intégrés dans chaque articulation



**contact souple** = erreur de position et orientation élevées (5 mm)

**contact dur** = précision améliorée (1 mm)

- Université de Twente
  - TMS pendant marche sur tapis roulant
  - Robot suspendu à architecture parallèle
  - Faible masse
  - Système de mesure du contact avec la tête



Pennimpepe et al., *Hot Spot Hound: a novel robot-assisted platform for enhancing TMS performance*, IEEE EMBS Annual Conf., pp 6301-6304, 2013.

De Jong et al., *A method for evaluation and comparison of parallel robots for safe human interaction, applied to robotic TMS*, IEEE Int. Conf. On Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp. 986-991, 2012.

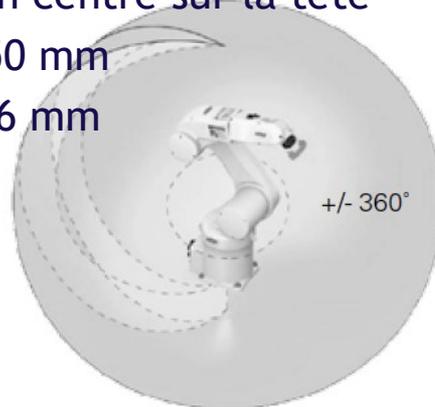
# Les robots développés pour la TMS

## Systèmes commerciaux

- ANT SmartMove (Université de Lübeck)
  - Robot industriel Adept Viper
  - Bridage logiciel des moteurs
  - Absence de zone de sécurité
  - Pas de certification Dir.93/42/EEC
  - Capteur d'effort
  - Calibrage robot « hors-ligne »

Espace de travail non centré sur la tête

- Rayon externe 850 mm
- Rayon interne 166 mm



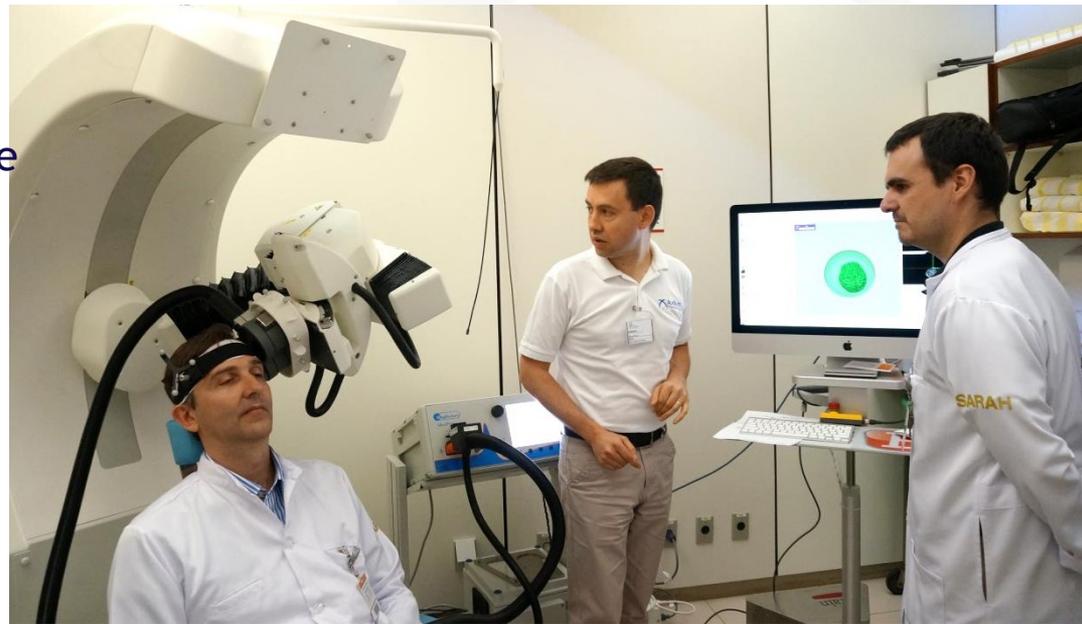
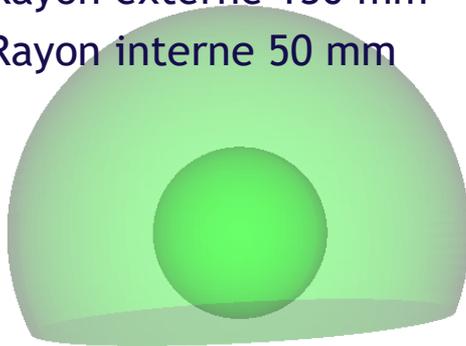
# Les robots développés pour la TMS

## Systèmes commerciaux

- Axilum Robotics TMS-Robot (Université de Strasbourg)
  - Architecture sphérique dédiée
  - Motorisation dédiée
  - Capteur d'effort
  - Certification classe IIa Dir.93/42/EEC
  - Calibrage robot « en-ligne »

Espace de travail centré sur la tête

- Rayon externe 130 mm
- Rayon interne 50 mm



Zorn et al., *Design and Evaluation of a Robotic System for Transcranial Magnetic Stimulation*, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2012, 59(3), pp 805 - 815.



# Plan

- Les challenges de la TMS
- Les robots développés pour la TMS
- **Le fonctionnement des robots de TMS**
- Le futur de la TMS robotisée ?

# Le fonctionnement des robots de TMS

- Le robot est guidé par l'image



**Stimulateur et bobine**



**+ Neuro-navigator**



**+ Robot**

- Repérage anatomique

- Personnalisation (IRM du cerveau)
- Marqueurs optiques
- Recalage spatial tête-IRM-caméra<sup>1</sup>
- Guidage selon l'IRM

- Système mécatronique poly-articulé
- Réduction du « facteur humain »

[1] Lefaucheur, *Why image-guided navigation becomes essential in the practice of TMS*, Clinical Neurophysiology (2010) 40, 1-5.

# Le fonctionnement des robots de TMS

- Planification des cibles selon 6 DDL

- Matrice de transformation homogène

$$T^* = T_{tête \rightarrow bobine} = \begin{bmatrix} R_{tête \rightarrow bobine} & P_{tête \rightarrow bobine} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

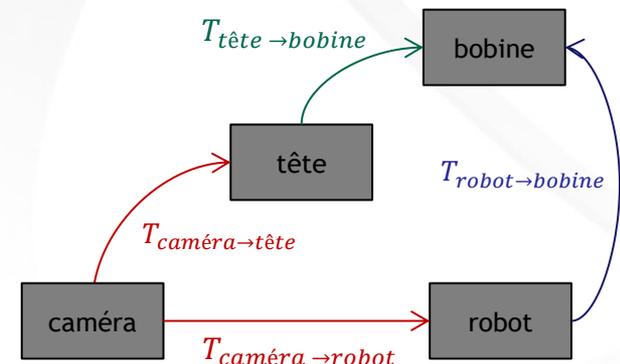
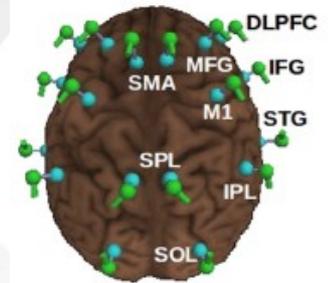
- Position (X,Y,Z) de la cible dans le cerveau
- Projection d'un point de contact sur la tête
- Définition de l'orientation au point de contact

- Compensation des mouvements de tête

- Tracking par la caméra  $T_{caméra \rightarrow tête}(t)$
- Compensation des mouvements de la tête :

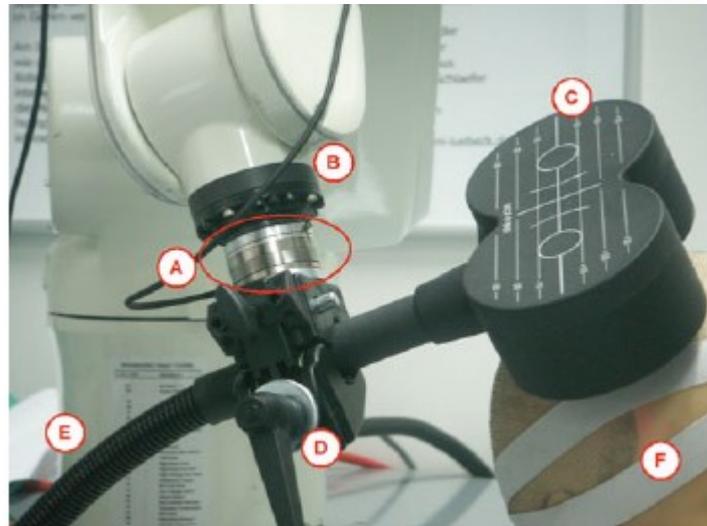
ajuster  $T_{robot \rightarrow bobine}(t)$  afin que  $T_{tête \rightarrow bobine}(t) = T^*$

sachant que  $T_{tête \rightarrow bobine}(t) = T^{-1}_{caméra \rightarrow tête}(t) \times T_{caméra \rightarrow robot}(t) \times T_{robot \rightarrow bobine}(t)$



# Le fonctionnement des robots de TMS

- Maintenir le contact entre bobine et tête
  - 3 approches
    - Capteurs intégrés aux articulations (robot collaboratif)
    - Capteur entre robot et bobine<sup>1</sup> : 6 DDL
      - Compensation de gravité nécessaire
    - Capteur entre bobine et tête<sup>2</sup> : 1 DDL
      - Commande dite floue



[1] Richter et al., *Hand-assisted positioning and contact pressure control for motion compensated robotized transcranial magnetic stimulation*, 2012, *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2012, 7(6):845-52

[2] C. Lebossé et al, *Modeling and evaluation of low cost force sensors*, *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, 27(4):815-822.

# Le fonctionnement des robots de TMS

- Maîtrise de la précision de positionnement

- Stratégies de commande

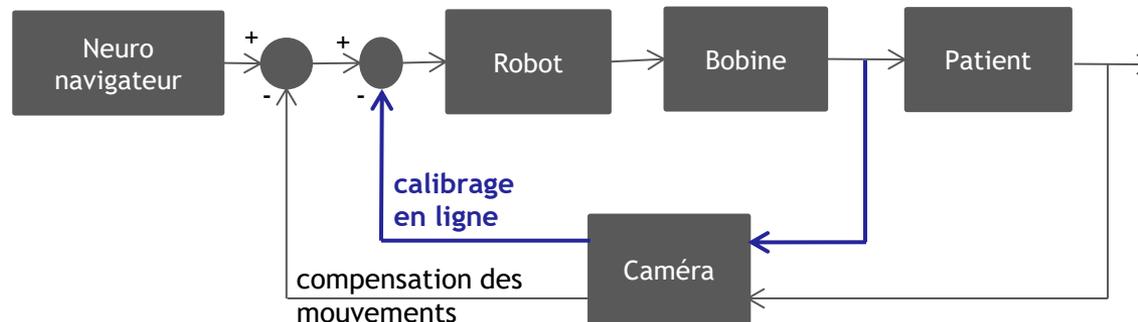
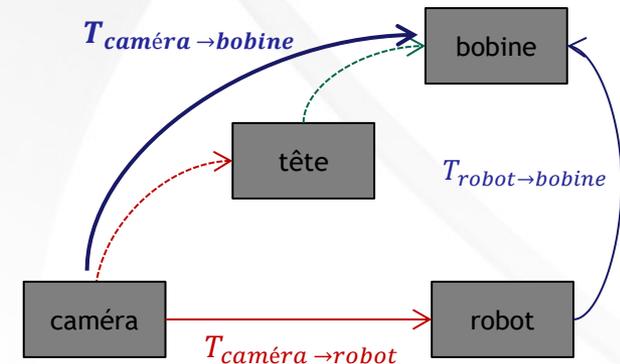
- **Boucle fermée** (calibrage « en ligne »)  $T_{caméra \rightarrow bobine}(t)$

- Imprécisions de calibrage robot ou bobine
- Flexibilité du mécanisme, câble de la bobine
- ⇒ Précision : 1 mm

- **Boucle ouverte**

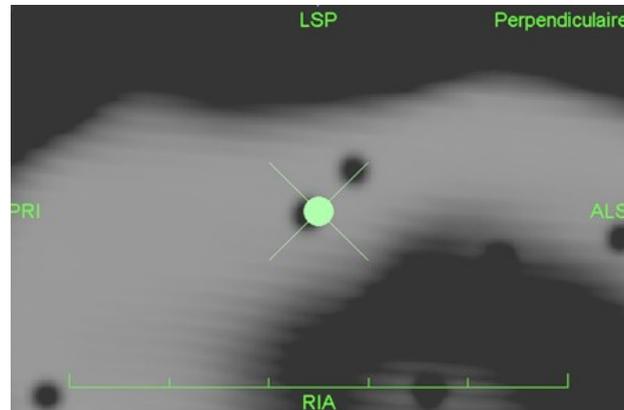
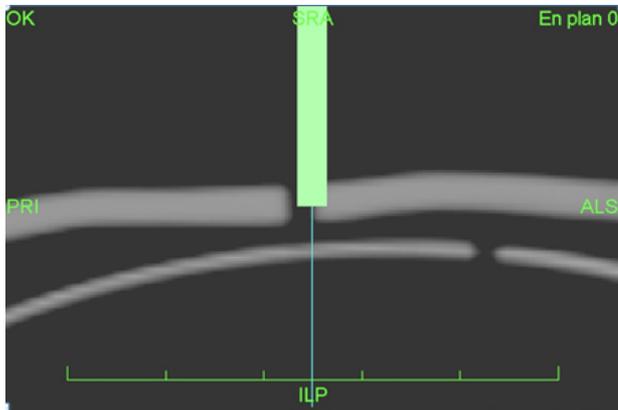
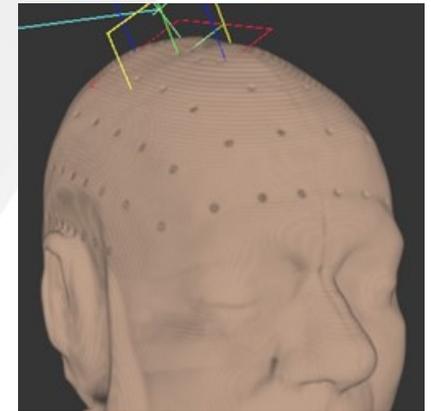
- Sans marqueurs optiques sur la bobine
- ⇒ Précision dégradée : 1~5 mm

- Précision relative au recalage IRM / tête

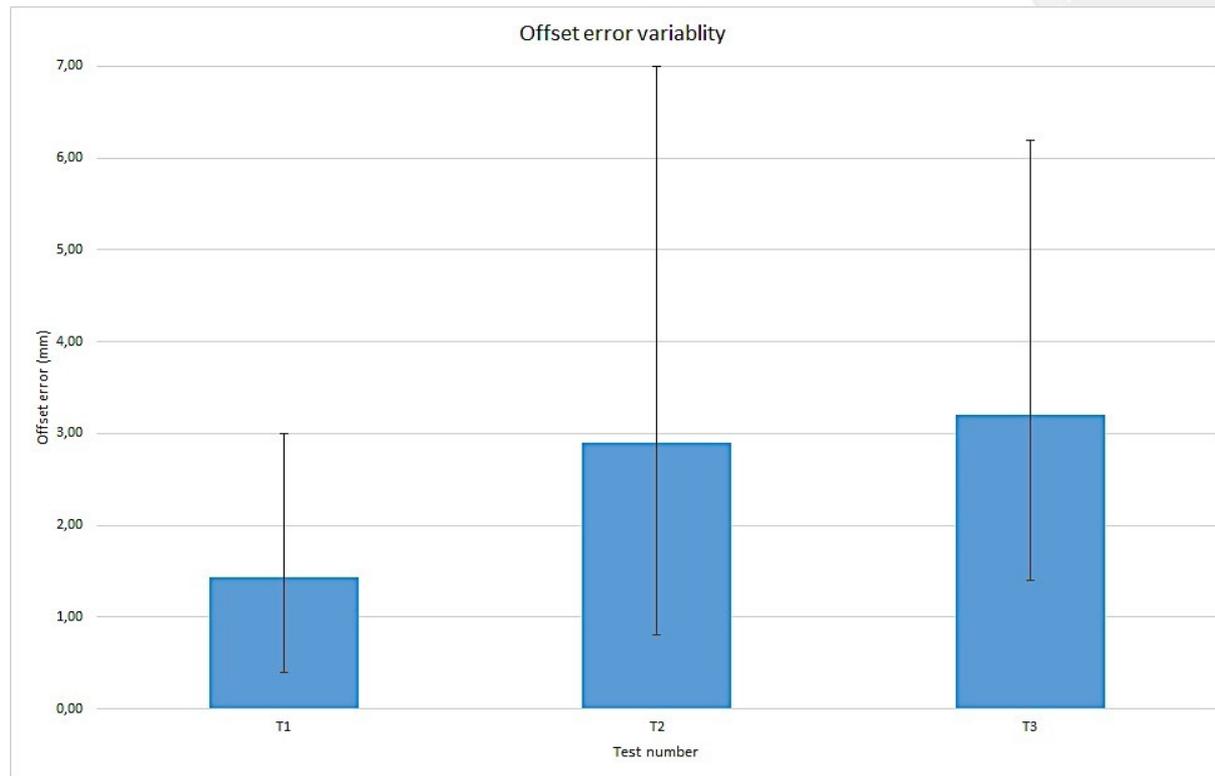


# Le fonctionnement des robots de TMS

- Dépendance à la qualité du recalage tête / IRM
  - 7 opérateurs
  - Mannequin muni de trous visibles
  - 3 tests de recalage
    - 3 repères anatomiques de pré-recalage (nez, oreilles)
    - 100 points de surface pour recalage (type ICP)
    - 1 repère de vérification : mesure d'offset
  - (T1) Conditions idéales
  - (T2) Pointeur mal orienté à la limite de détection de la caméra
  - (T3) Pointeur à 2 mm des repères prévus



# Le fonctionnement des robots de TMS



- (T1) Offset moyen de 1.5 mm en conditions idéales
- (T2, T3) Offset de 3 mm + grande variabilité

- ⇒ Recalage = étape manuelle critique de la TMS robotisée
- ⇒ Formation et attention de l'opérateur = répétabilité du recalage

# Plan

- Les challenges de la TMS
- Les robots développés pour la TMS
- Le fonctionnement des robots de TMS
- Le futur de la TMS robotisée ?

# Le futur de la TMS robotisée ?

- Tracking direct sans marqueurs

- Pas de recalage manuel !
- Caméra “temps de vol”<sup>1</sup>
  - Compact
  - Tracking visage en 3D
  - Cadence vidéo
  - Précis : 1.5 mm +/- 1.4 mm
  - Peu de pixels
- Mais : recalage automatique sur IRM ?
- Ne pas utiliser d’IRM ?<sup>2</sup>



(a)



(b)



(c)



(d)

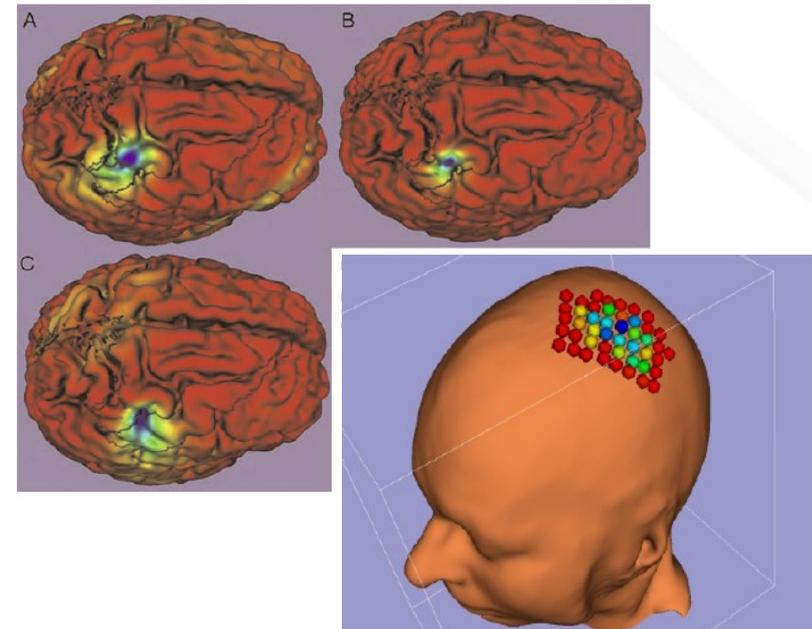
[1] Yasumuro et al., *Coil Positioning System for Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation Treatment by ToF Camera Ego-Motion*, Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc., 2013, pp 3586-3589.

[2] Combès et al., *MRI-free neuronavigation for transcranial magnetic stimulation in severe depression*, MICCAI Workshop on Mesh Processing in Medical Image Analysis (MeshMed'2011)

# Le futur de la TMS robotisée ?

- Standardisation de procédures complexes
  - Interconnexion avec stimulateur (déclenchement à position)
  - Interconnexion avec systèmes mesures électro-physiologiques (EEG, EMG)
- ⇒ Méthodologies automatisées
  - Exemple 1 : Cartographie motrice

- Patients avec tumeurs<sup>1,2</sup>
- 3 muscles (avant-bras, pouce et petit-doigt)
- Cartographie pré-chirurgicale par TMS
- Résultat comparable à moins de 5 mm avec stimulation directe

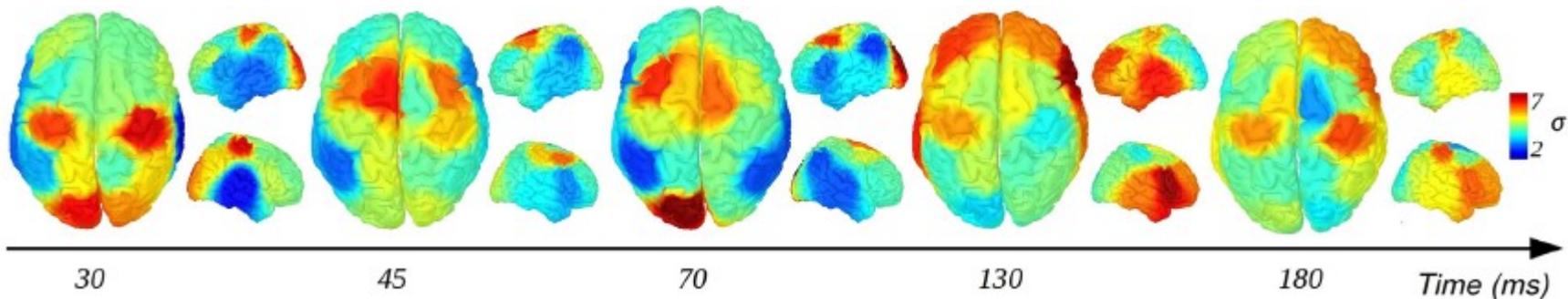
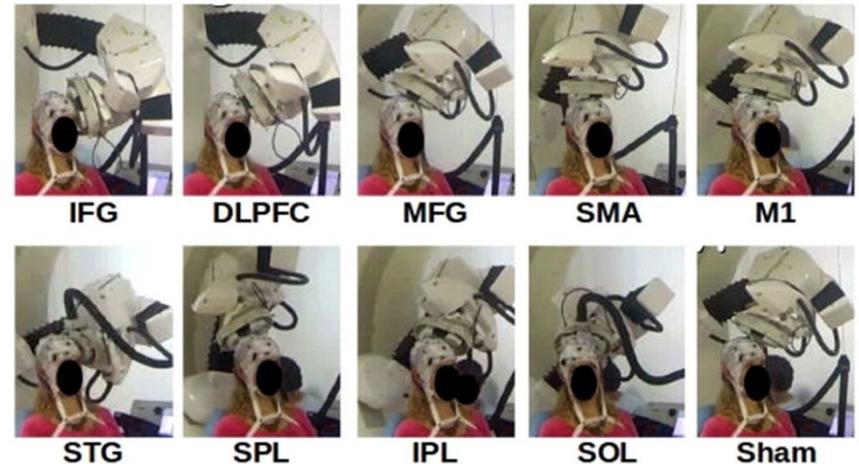
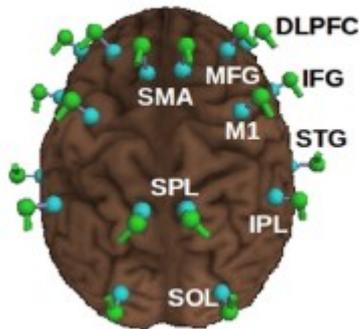


[1] Kantelhardt et al., *Robotized image-guided transcranial magnetic stimulation, a novel technique for functional brain-mapping*, Society Proceedings / Clinical Neurophysiology 120 (2009) e9-e88

[2] Finke et al., *Brain mapping using robotized TMS*, Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc., 2008, pp3929-3932

# Le futur de la TMS robotisée ?

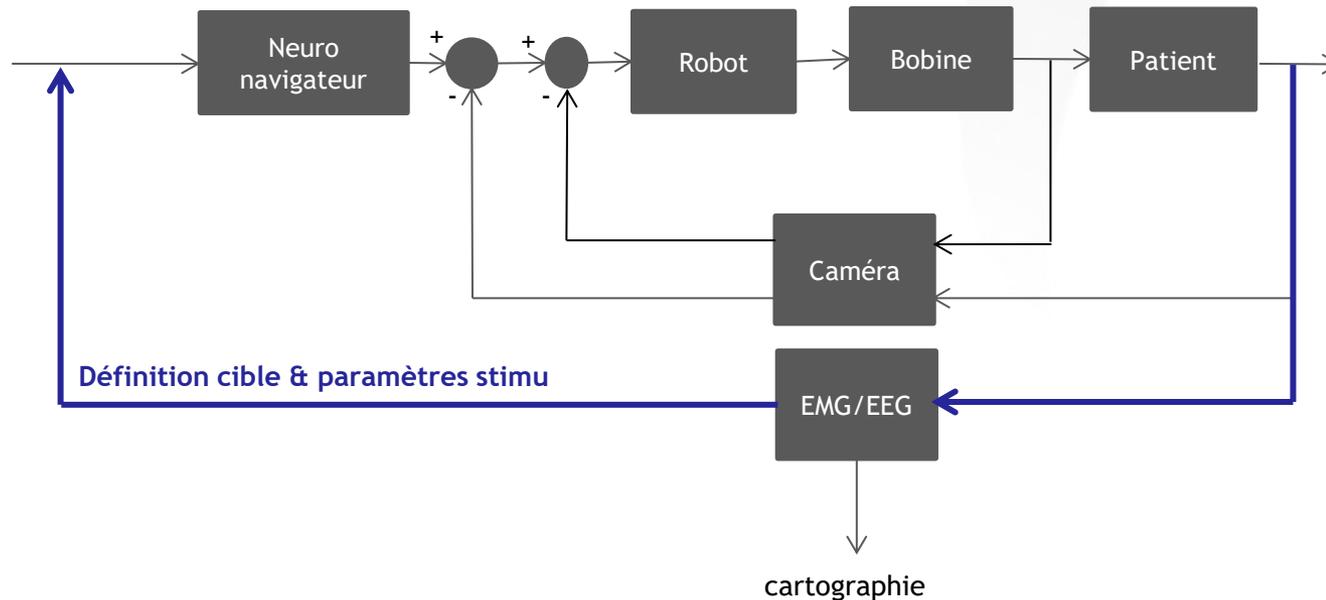
- Standardisation de procédures complexes
  - Exemple 2 : Cartographie fonctionnelle par TMS+EEG
- 18 cibles, 22 sujets
- Construction de cartes temporelles d'activation locale des circuits corticaux<sup>1</sup>



[1] Harquel et al., *Mapping dynamical properties of cortical microcircuits using robotized TMS and EEG: Towards functional cytoarchitectonics*, NeuroImage 135 (2016) pp115-124

# Le futur de la TMS robotisée ?

- « Boucle fermée » physiologique (TMS basée EMG/EEG)
  - Cible(t) + paramètres de stimulation (t) => EEG(t)
  - Calcul cible(t+1) et paramètres de stimulation (t+1)

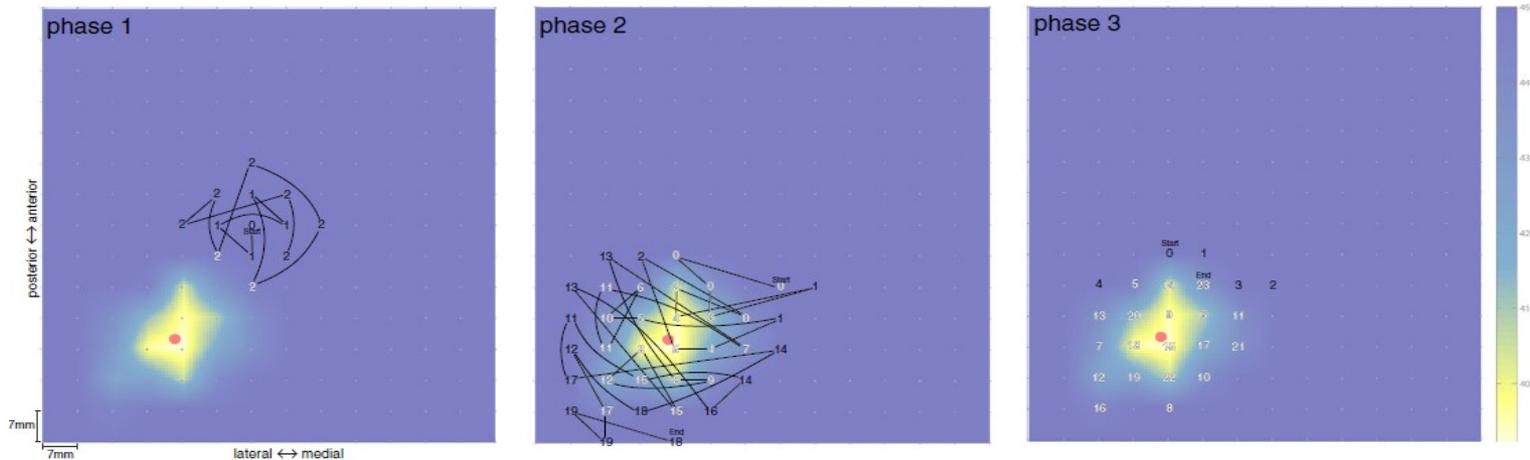


# Le futur de la TMS robotisée ?

- **Exemple 3 : « boucle fermée » basée EMG**
  - Recherche automatique du hot spot moteur et du seuil moteur

⇒ Retrouver le hot spot et le seuil moteur de manière fiable à chaque séance<sup>1</sup>

- Auto-construction d'une grille à partir de mesures EMG
- Evaluation du seuil moteur selon la méthode PEST
- Cible tirée au sort, 1 seule impulsion à chaque tirage
- Mouvement robotisé
- Total de 15 pulses par cible



Principal inconvénient : durée > 1h ...

[1] Meincke et al., *Automated TMS hotspot-hunting using a closed loop threshold-based algorithm*, NeuroImage 124 (2016) pp509-517

Merci de votre attention !

[axilumrobotics.com](http://axilumrobotics.com)

You Tube



**SNCLF**  
SOCIÉTÉ DE NEUROPHYSIOLOGIE  
CLINIQUE DE LANGUE FRANÇAISE

Journées de Neurophysiologie Clinique  
Mâcon, 29 juin 2016



8 rue Schertz  
67100 Strasbourg  
+33(0)3 88 55 62 07  
[info@axilumrobotics.com](mailto:info@axilumrobotics.com)

[axilumrobotics.com](http://axilumrobotics.com)