



La robotique au service de la Stimulation Magnétique Transcrânienne



Romuald Ginhoux, PhD - Axilum Robotics

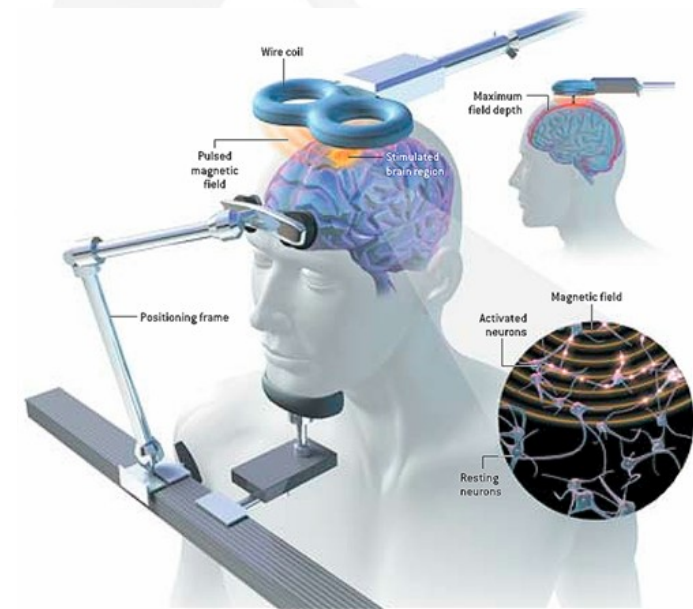
Pr. Bernard Bayle, Pr. Pierre Renaud - ICUBE/Université de Strasbourg



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 thérapeutiques¹ troubles pharmaco-résistants
 - Dépression majeure
 - Douleur neuropathique chronique
 - Rééducation post-AVC
- Applications diagnostiques
 - Mesures d'excitabilité corticale
 - Cartographie pré-neurochirurgicale
- Recherche en neurosciences



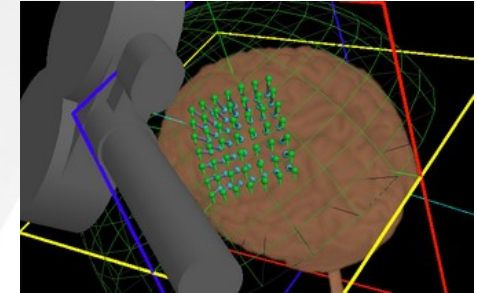
[1] Lefaucheur et al., *Evidence-based guidelines on the therapeutic use of repetitive transcranial magnetic stimulation (rTMS)*, Clin Neurophysiol. 2014, 125(11):2150-2206

Plan

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

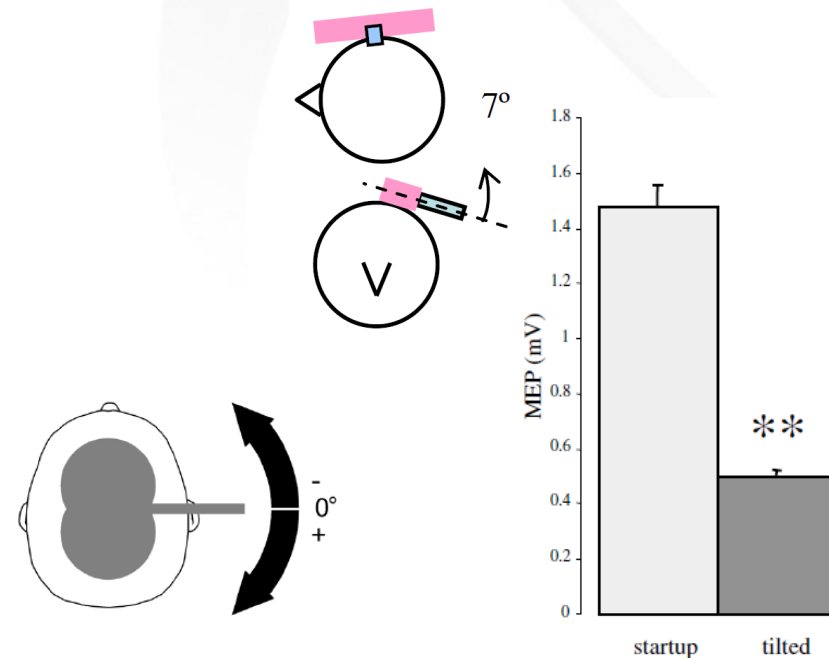
Les challenges de la TMS : précision

- 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° peut faire chuter de 60% le Potentiel Evoqué Moteur (muscle abducteur du pouce)¹

- Tourner la bobine de 30° fait varier de 8% le PEM (muscle abducteur du gros orteil)²



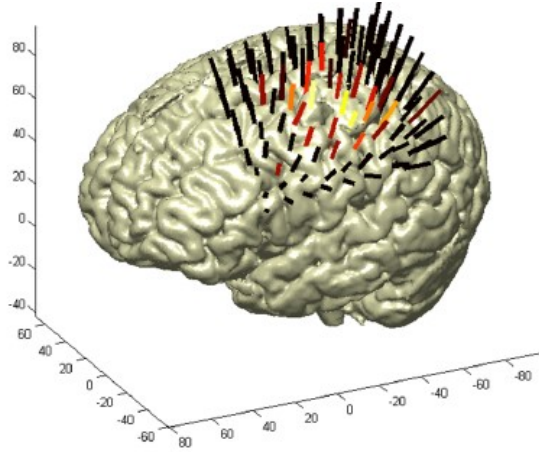
[1] Toschi et al., *Transcranial magnetic stimulation in heterogeneous brain tissue: Clinical impact on focality, reproducibility and true sham stimulation*, Journal of Psychiatric Research, 43 (2009), pp255-264

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

Les challenges de la TMS : répétabilité

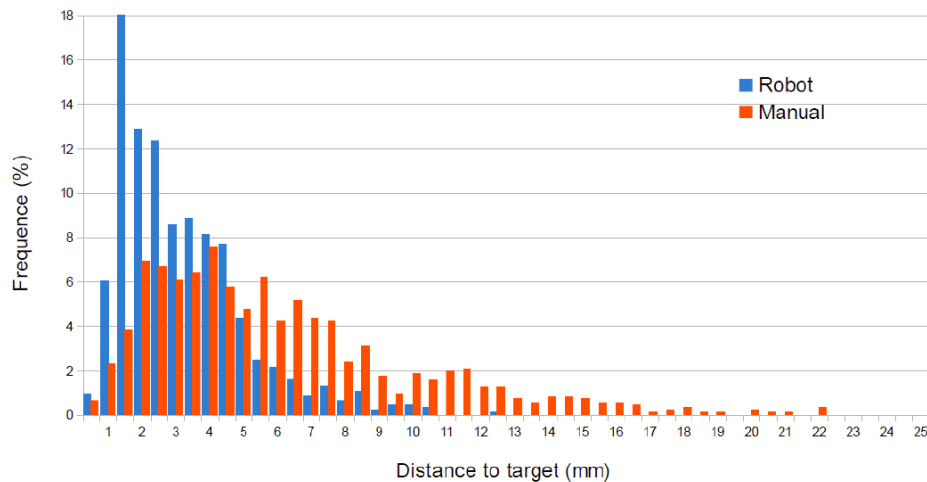
- Durée des séances
 - Stimuler une ou plusieurs cibles
 - Tenir la bobine pendant une durée prolongée
 - Compenser les mouvements de tête
- Répéter à l'identique une stimulation
 - Minimiser les biais : variabilité inter/intra-opérateurs (études cliniques)
- Optimiser les ressources médicales (applications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

Un robot ou un opérateur humain ?

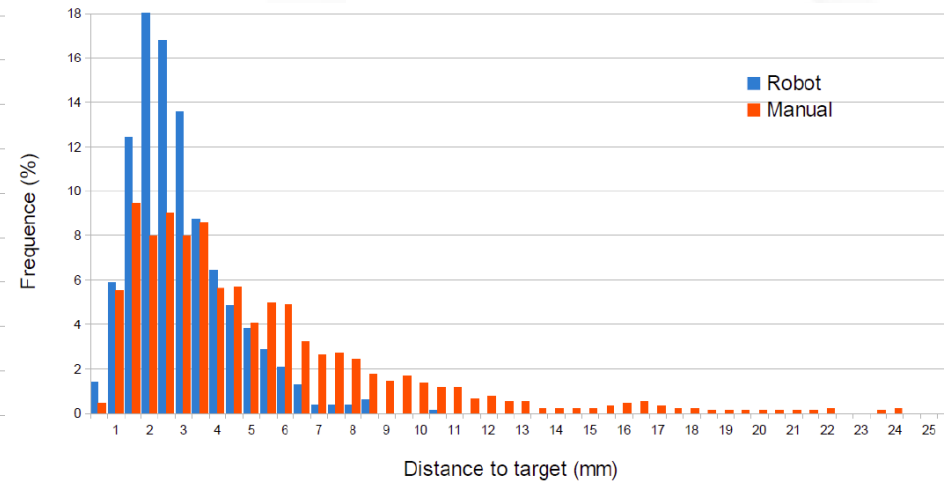


- Grille 10 x 10 centrée sur pouce droit
- Espacement de 10 mm
- 2 expériences : avec/sans pré-contraction
- Précision et répétabilité améliorée d'un facteur 2 ($p < 0.01$)

Précision

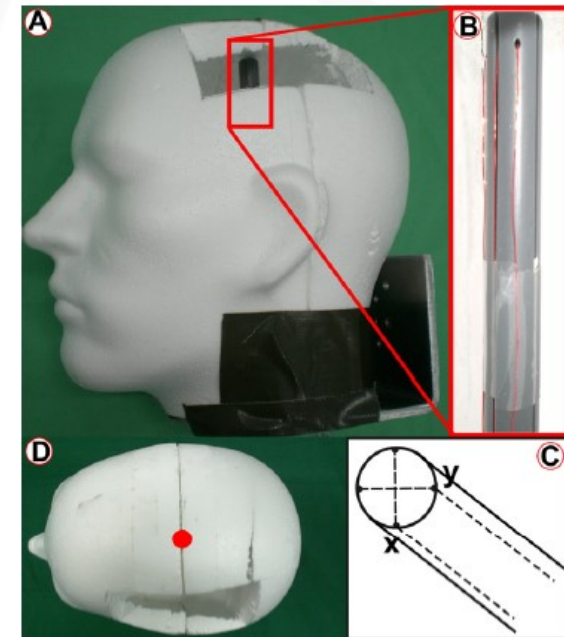
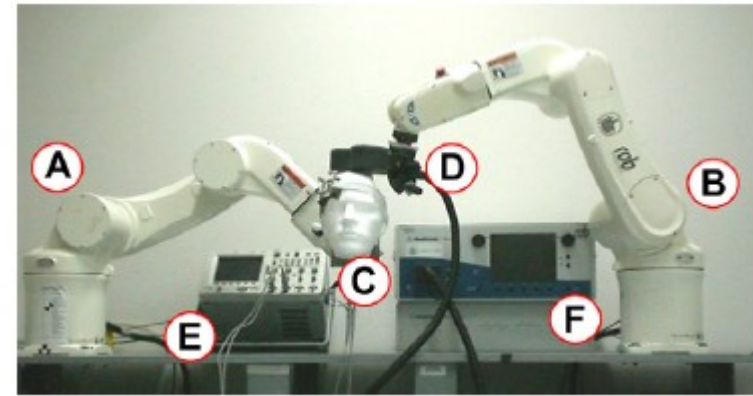


Répétabilité



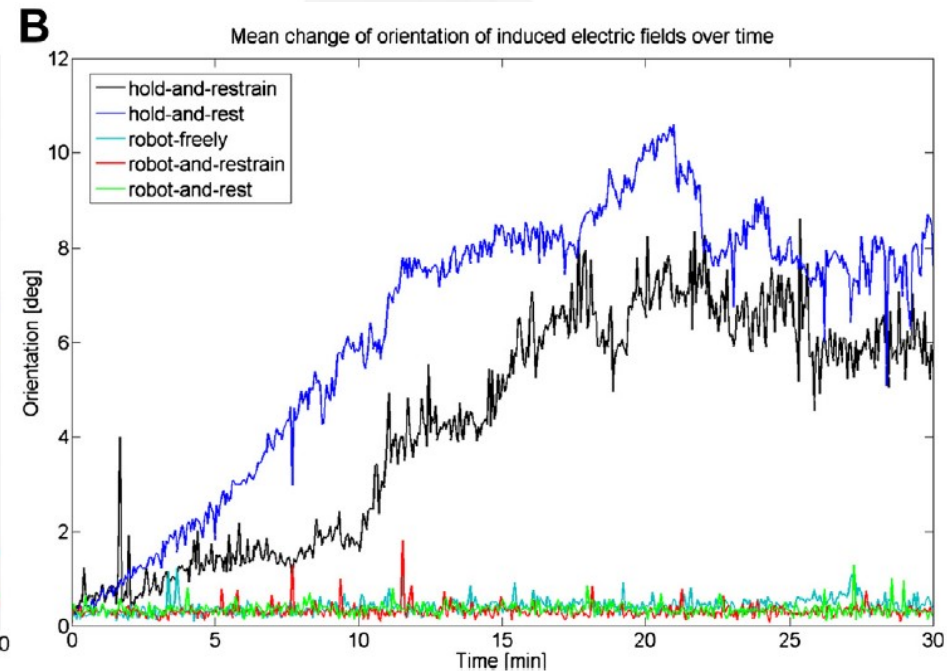
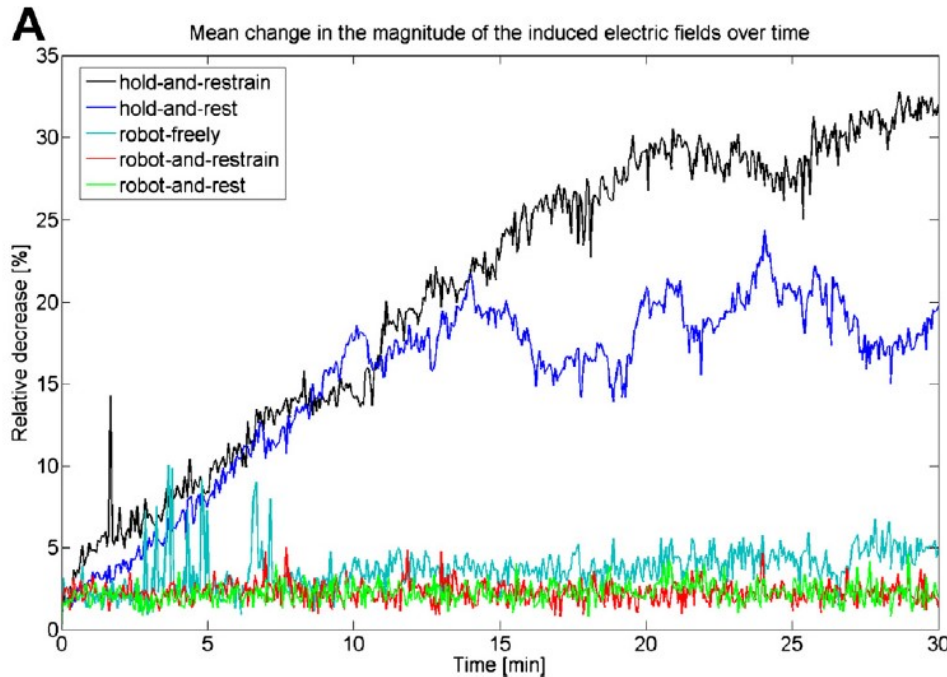
Un robot ou un support fixe ?

- 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^{ème} 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

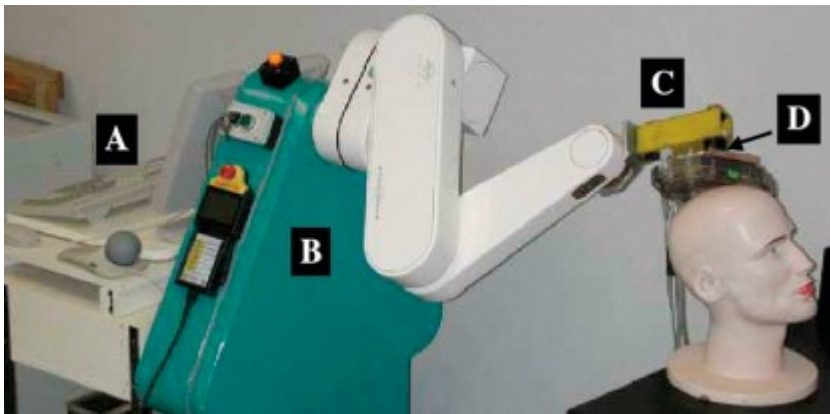
Plan

- 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



Pennimpe 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



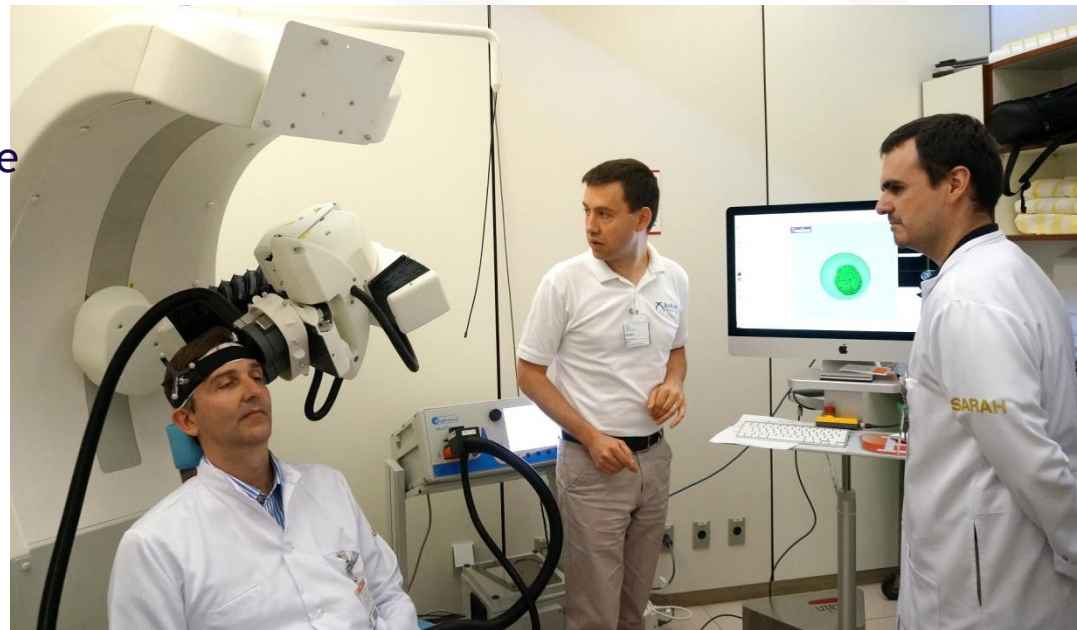
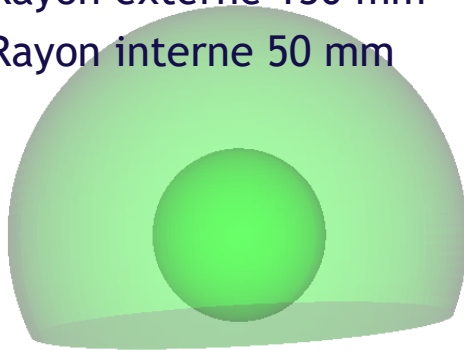
Les robots développés pour la TMS

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-caméra¹
- 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

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

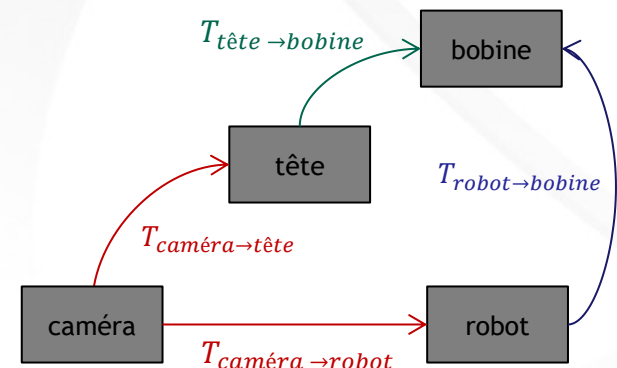
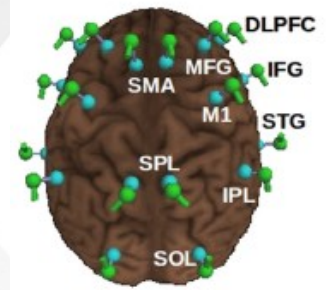
- Position (X,Y,Z) de la cible dans le cerveau
- Projection d'un point de contact sur la tête
- Définition de l'orientation au point de contact

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



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 bobine¹ : 6 DDL
 - Compensation de gravité nécessaire
 - Capteur entre bobine et tête² : 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

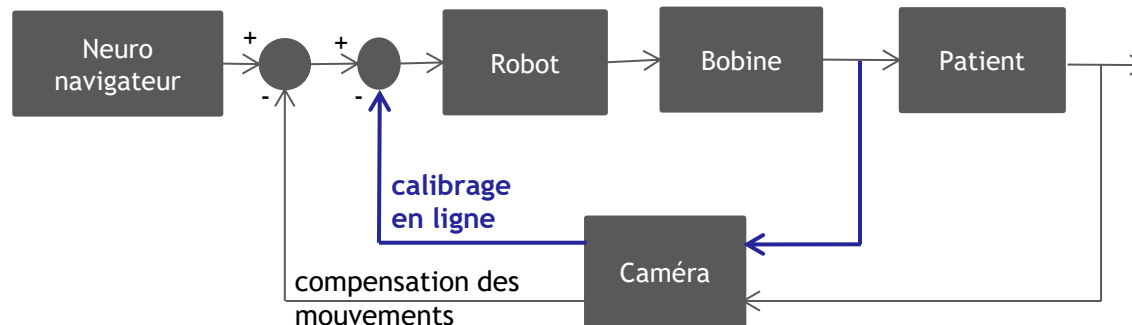
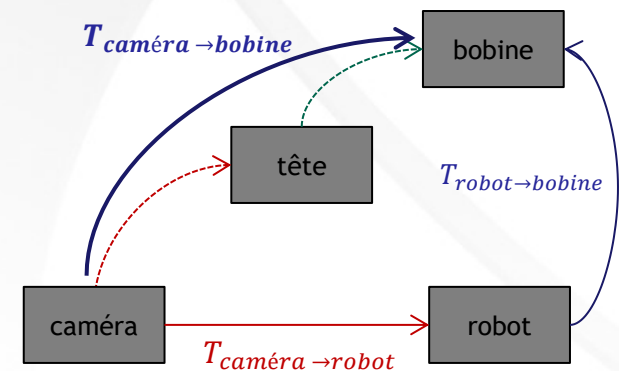
- **Boucle fermée** (calibrage « en ligne ») $T_{\text{caméra} \rightarrow \text{bobine}}(t)$

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

- **Boucle ouverte**

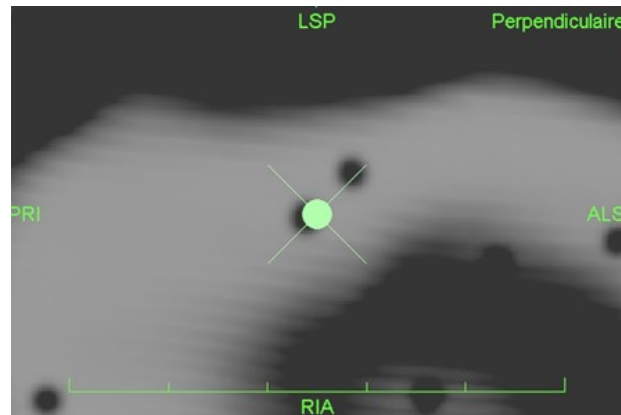
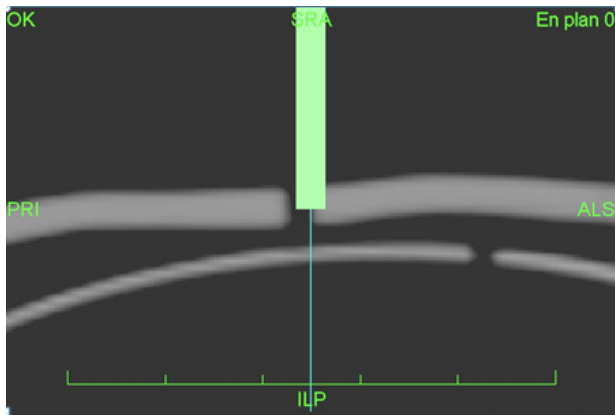
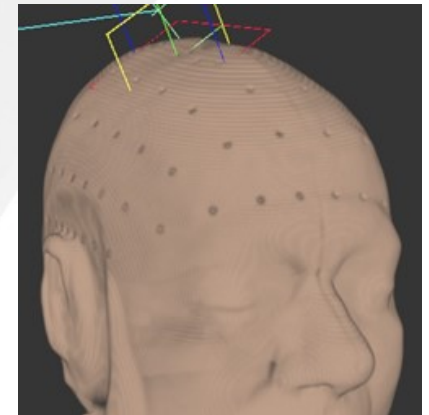
- Sans marqueurs optiques sur la bobine
- ⇒ Précision dégradée : 1~5 mm

- Précision relative au recalage IRM / tête

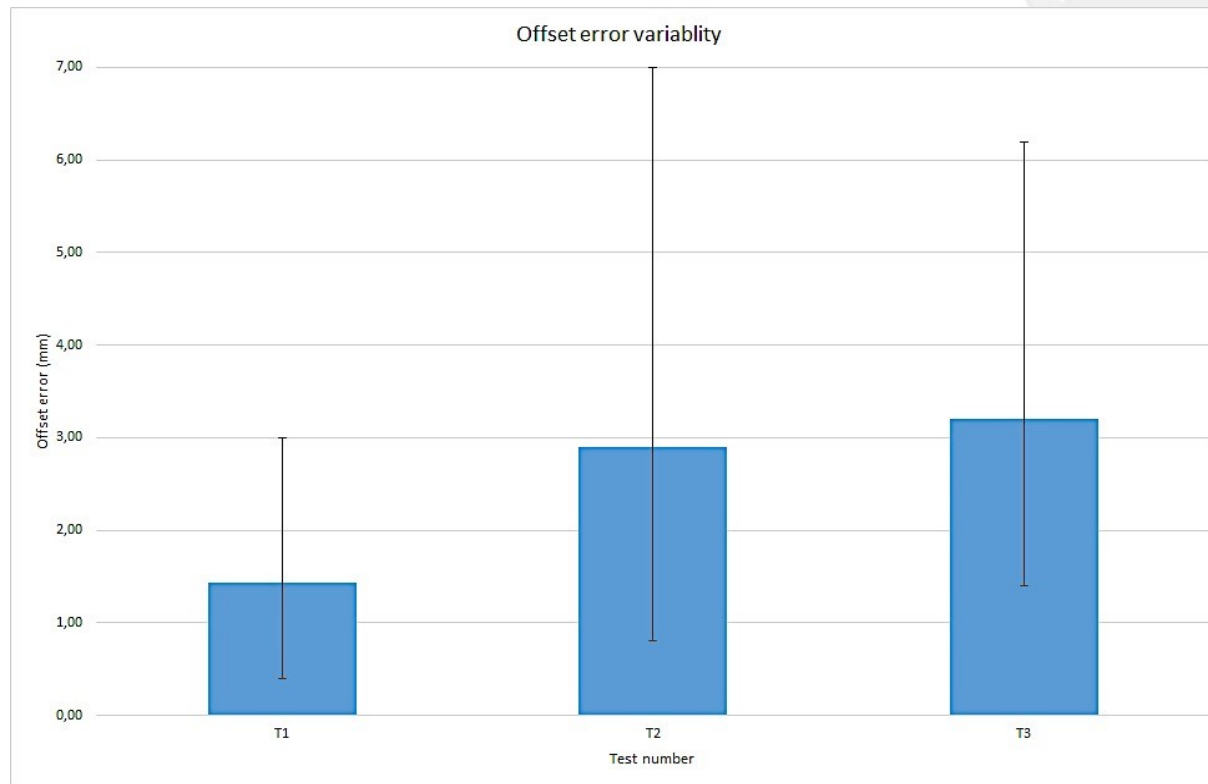


Le fonctionnement des robots de TMS

- 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”¹
 - 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 ?²



(a)



(b)



(c)



(d)

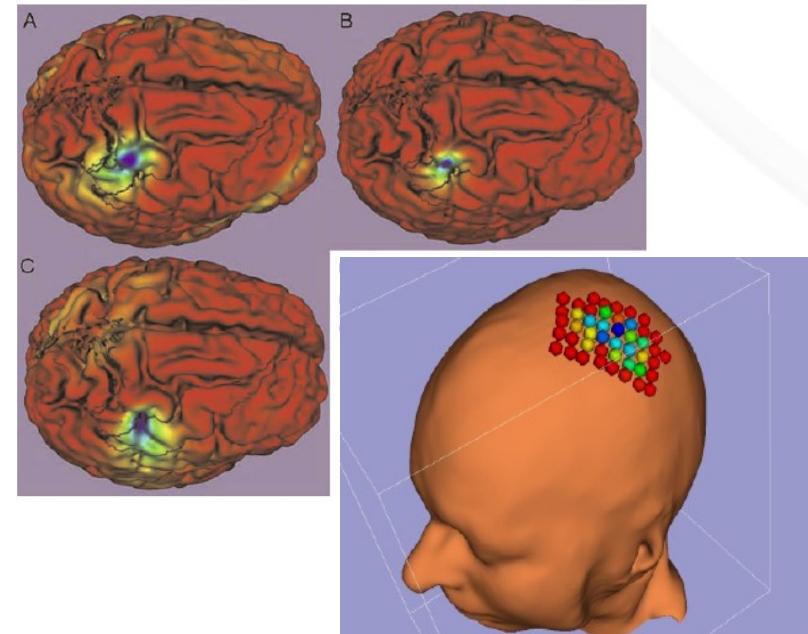
[1] Yasumuro et al., *Coil Positioning System for Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation Treatment by ToF Camera Ego-Motion*, Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc., 2013, pp 3586-3589.

[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^{1,2}
- 3 muscles (avant-bras, pouce et petit-doigt)
- Cartographie pré-chirurgicale par TMS
- Résultat comparable à moins de 5 mm avec stimulation directe

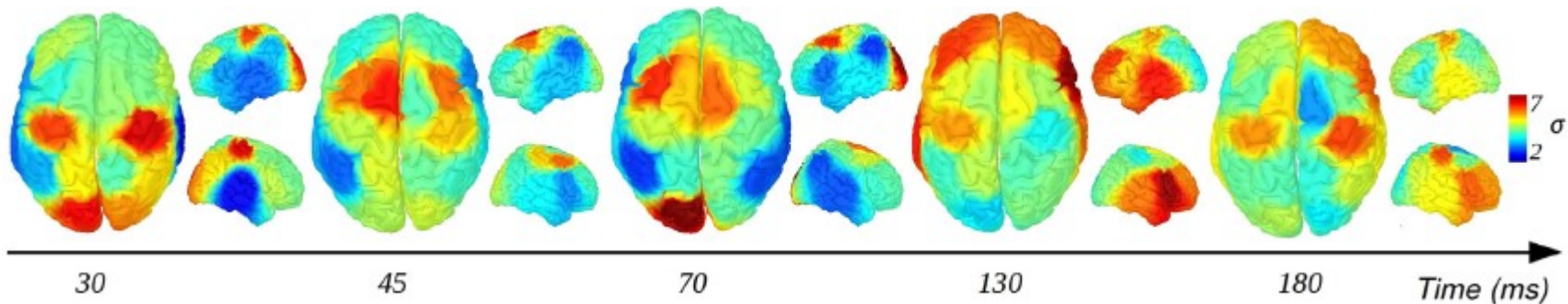
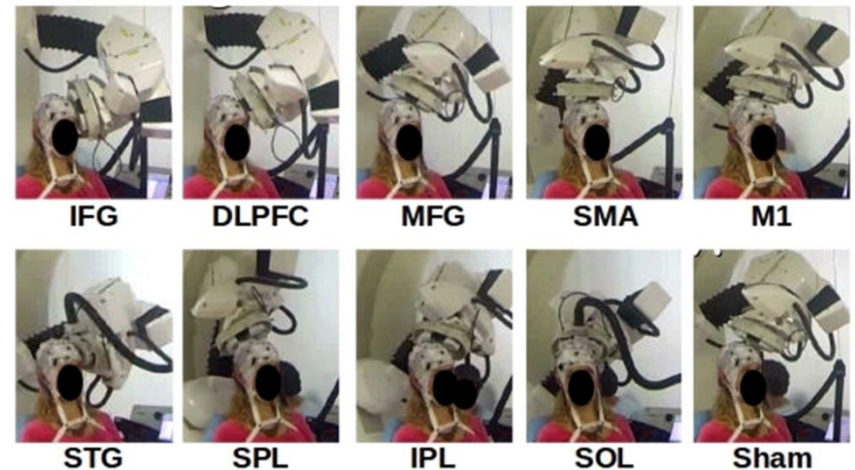
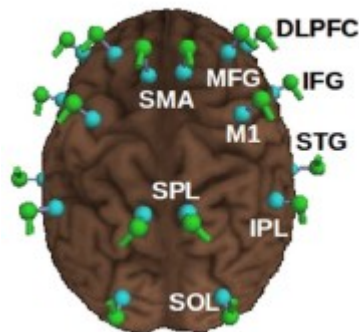


[1] Kantelhardt et al., *Robotized image-guided transcranial magnetic stimulation, a novel technique for functional brain-mapping*, Society Proceedings / Clinical Neurophysiology 120 (2009) e9-e88

[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 ?

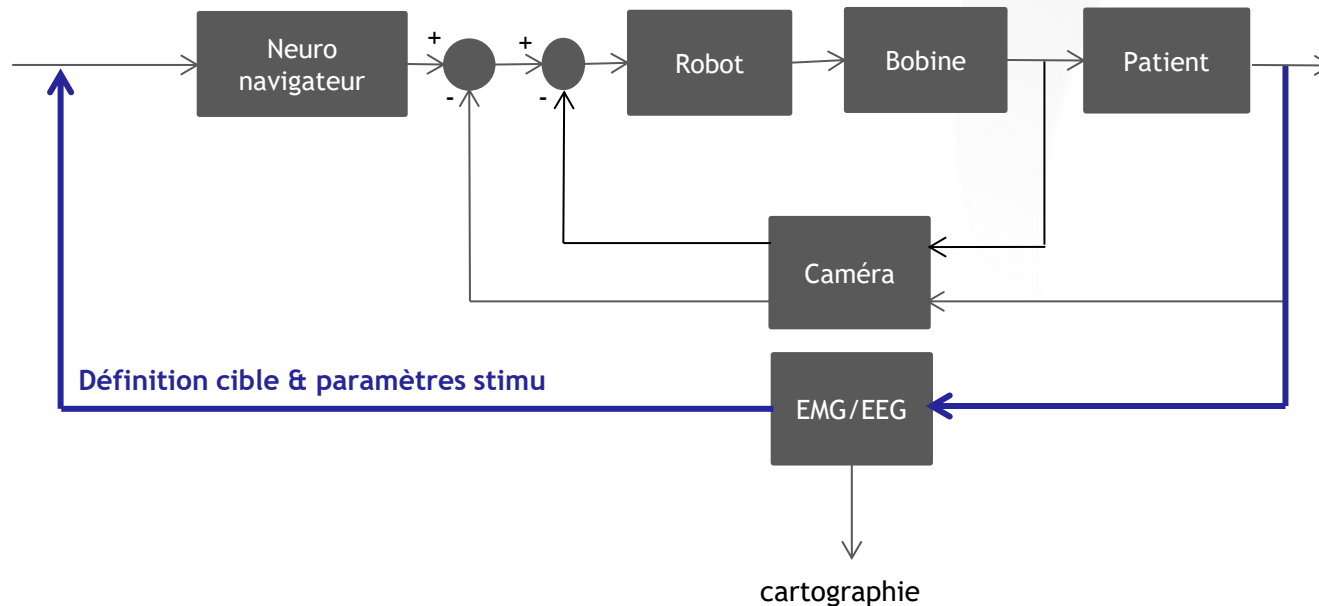
- Standardisation de procédures complexes
 - Exemple 2 : Cartographie fonctionnelle par TMS+EEG
- 18 cibles, 22 sujets
- Construction de cartes temporelles d'activation locale des circuits corticaux¹



[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)

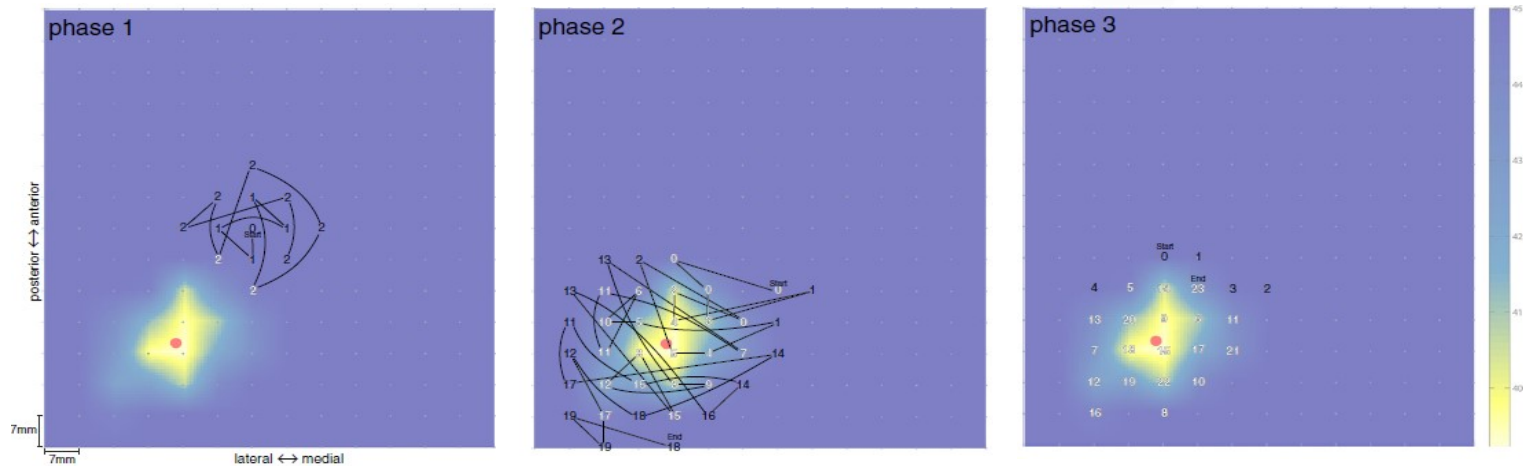


Le futur de la TMS robotisée ?

- **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 séance¹

- 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

YouTube



Journées de Neurophysiologie Clinique
Mâcon, 29 juin 2016



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

axilumrobotics.com