

Principes et applications de la stimulation électrique transcrânienne

Julien MODOLO

*INSERM, Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, France
Laboratoire Traitement du Signal et de l'Image, U1099, France*

19 Juin 2019

Société Française de RadioProtection

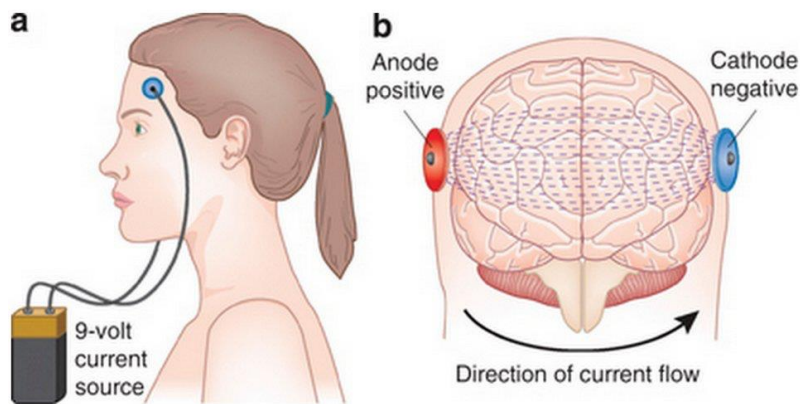
Plan

- 1 – Bref historique de la stimulation électrique transcrânienne
- 2 – Principes physiques
- 3 – Application: la mémoire de travail
- 4 - Quelles implications pour les normes d'exposition aux CEM?

1 - Bref historique de la stimulation électrique transcrânienne

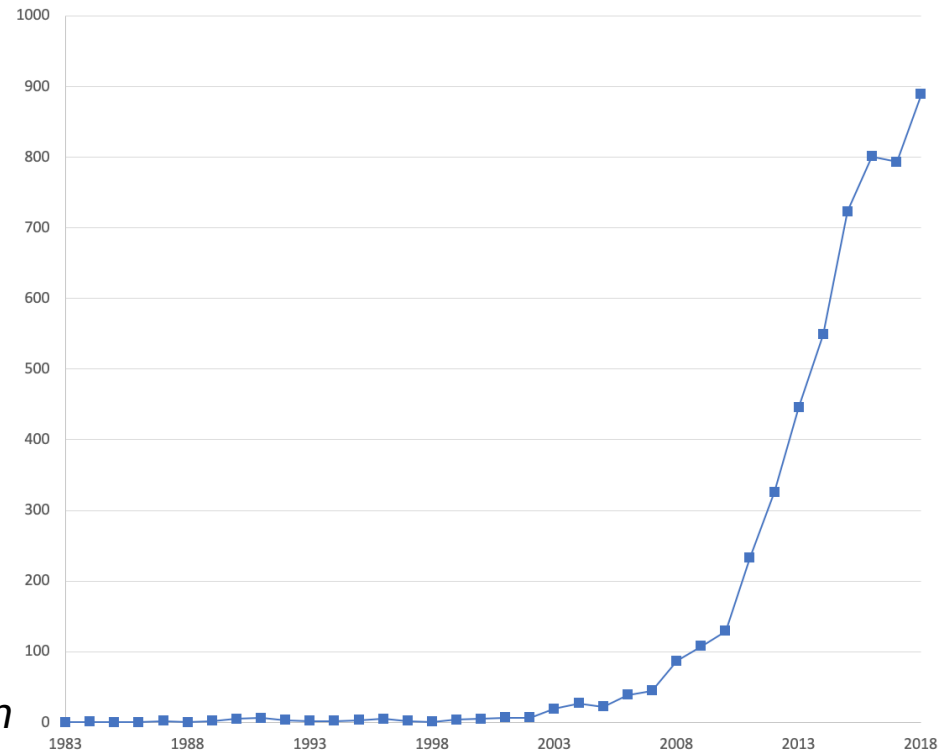
Stimulation électrique transcrânienne?

Définition: appliquer un courant électrique de manière non-invasive (scalp), de telle sorte qu'une fraction du courant atteint le cortex cérébral



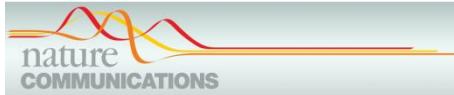
tDCS: transcranial Direct Current Stimulation

*tACS: transcranial **Alternating** Current Stimulation*



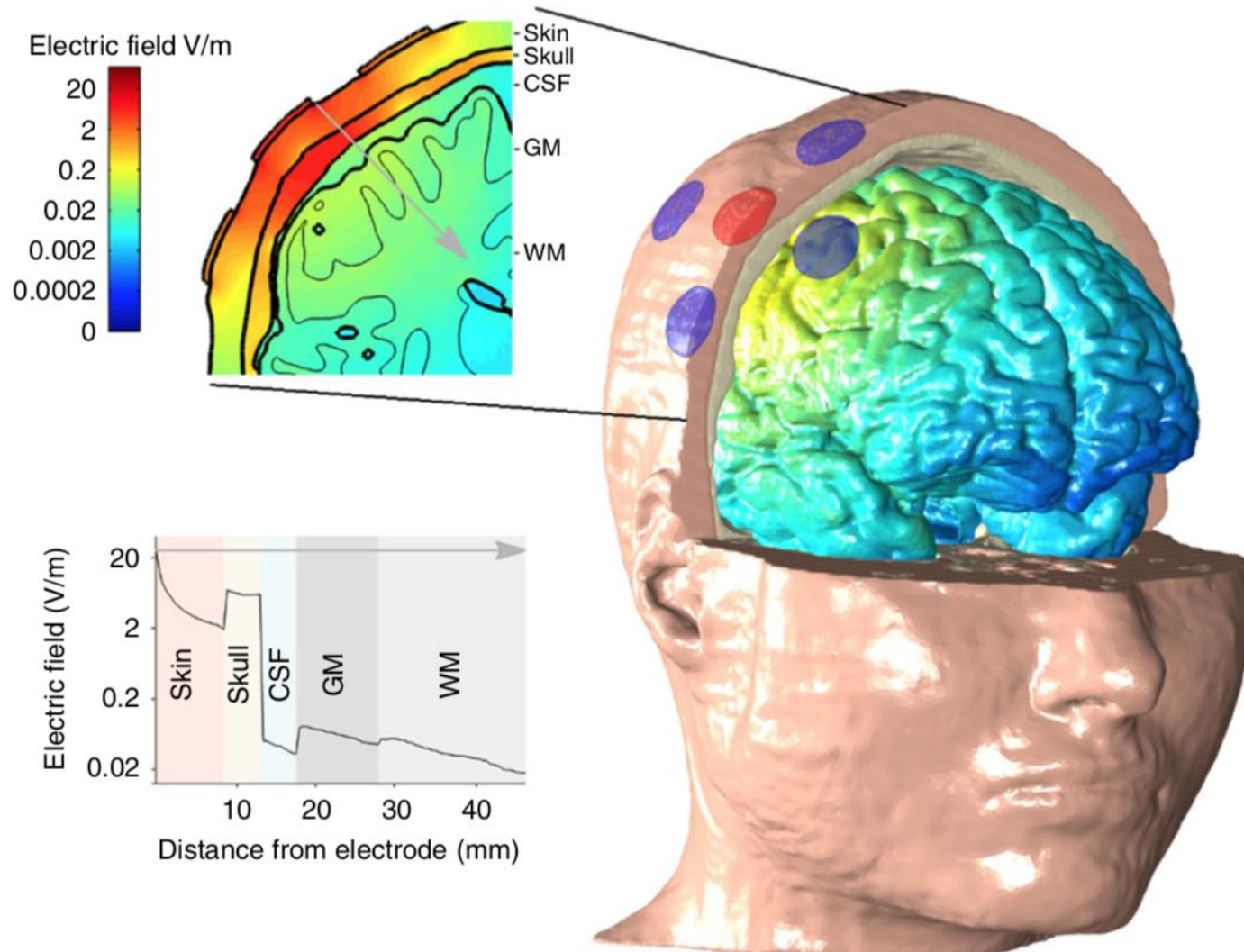
Nombre d'articles tDCS par an (source: Medline)

Stimulation électrique transcrânienne?



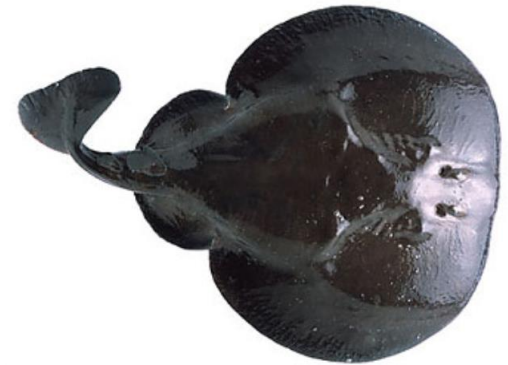
tACS motor system effects can be caused by transcutaneous stimulation of peripheral nerves

Boateng Asamoah¹, Ahmad Khatoun¹ & Myles Mc Laughlin¹



Quelques applications anciennes...

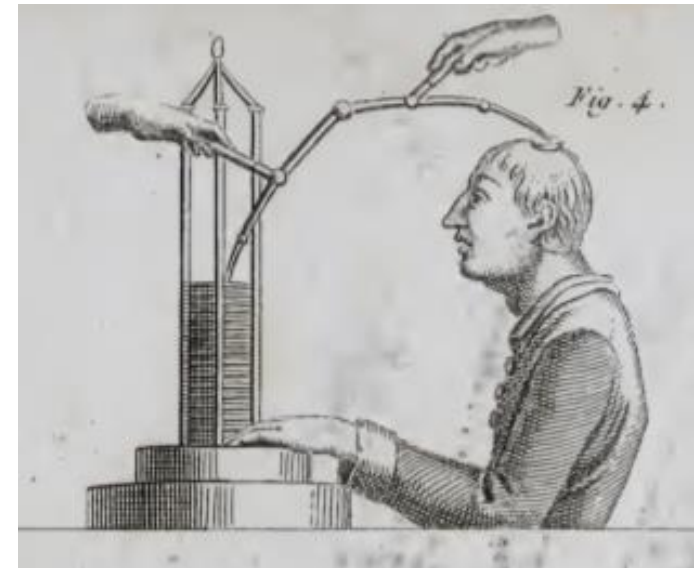
Rome antique: utilisation des raies pour délivrer des chocs électriques et soulager la **migraine**.



Aldini, neveu de Galvani, traitait un patient **mélancolique** par stimulation électrique en 1804.

224 E S S A I
moi l'avons éprouvé, d'une commotion extrêmement fortes et suivie d'une insomnie durant plusieurs jours.
Nous imaginâmes dès-lors de raser la tête sur la suture pariétale, et d'y diriger le courant galvanique. Le lieu fut ensuite mouillé et recouvert d'une pièce d'argent; le malade plaça ses mains à la base de la pile, et on établit un arc de communication de cette pile à l'armature métallique posée sur la tête: (pl. 5 fig. 4.) la commotion fut bien moins vive et devint très-supportable; aussi ce moyen, que nous continuâmes d'employer depuis ce moment, produisit - il les améliorations les plus sensibles dans l'état du sujet. Je n'ai pas besoin de remarquer que j'alternais avec l'application aux différentes parties de la face; mais ce que je ne dois pas sur-tout oublier de dire, c'est que les expériences amenaient toujours dans l'expression de la physio-

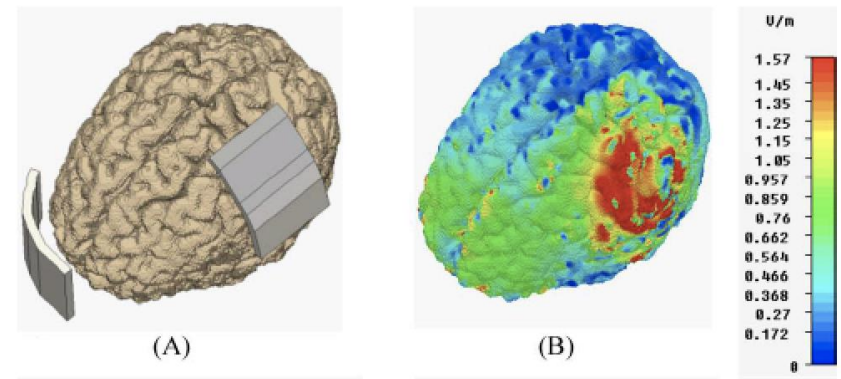
SUR LE GALVANISME. 225
nomie ces changements frappants que j'ai décrits plus haut.
MM. Brugnatelli et Zola, ainsi que plusieurs autres savants étrangers, ont été témoins de mes observations. Enfin la mélancolie disparut; le malade ne rebuta plus les aliments qu'on lui présentait: il en sentit le besoin, et reprit bientôt toutes ses forces. Les médecins de l'hôpital ne doutant point de sa parfaite guérison, lui permirent d'en sortir; ils jugèrent cependant convenable de lui faire faire auparavant une saignée au bras; mais, à l'exception de cette saignée, il ne fut administré aucun autre remède. Sans cette précaution que je pris, l'on aurait peut-être attribué à d'autres médicaments les heureux effets obtenus par l'administration du galvanisme.



Dosimétrie

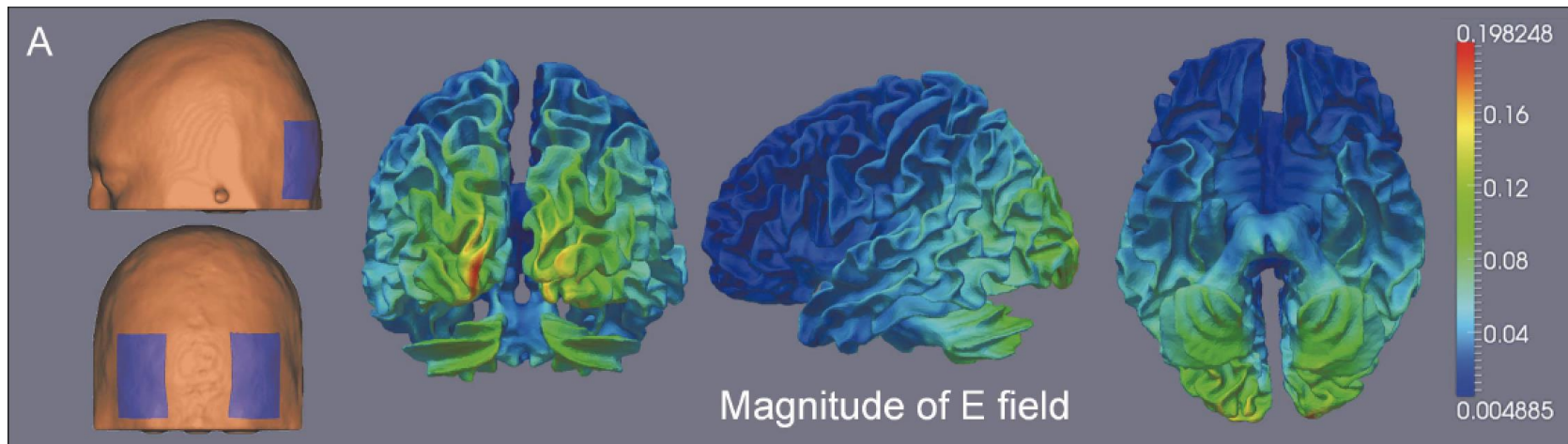
Transcranial Direct Current Stimulation: Estimation of the Electric Field and of the Current Density in an Anatomical Human Head Model

Marta Parazzini*, Serena Fiocchi, Elena Rossi, Alessia Paglialonga, and Paolo Ravazzani



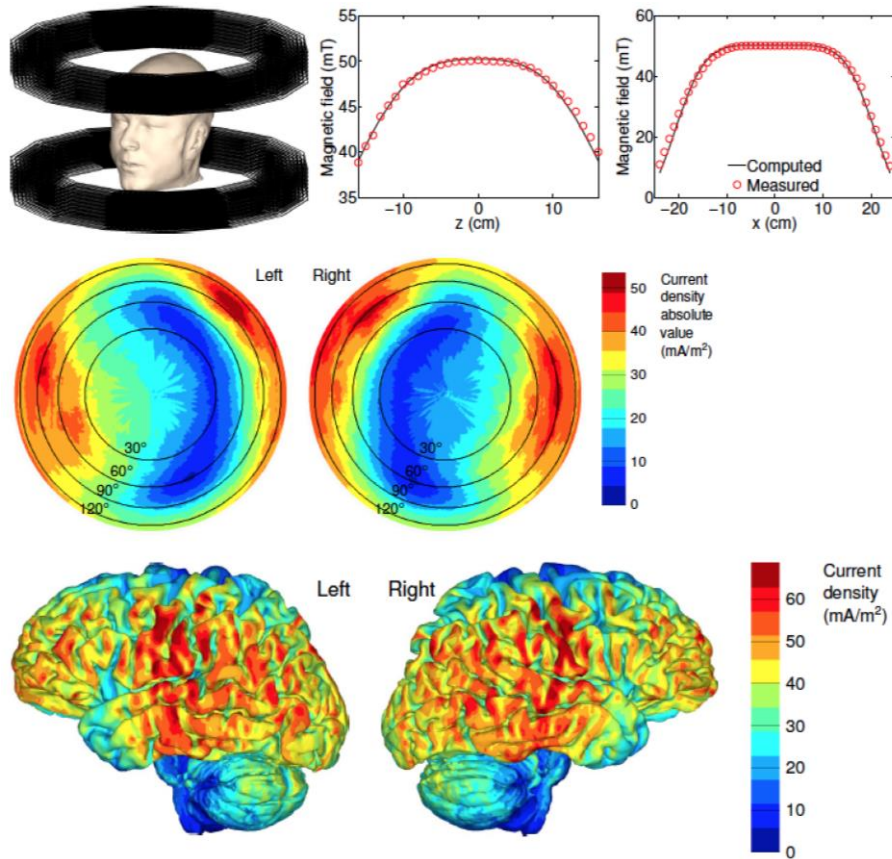
From Oscillatory Transcranial Current Stimulation to Scalp EEG Changes: A Biophysical and Physiological Modeling Study

Isabelle Merlet^{1,2*}, Gwénaél Birot^{1,2}, Ricardo Salvador³, Behnam Molaee-Ardekani^{1,2}, Abeye Mekonnen³, Aureli Soria-Frish⁴, Giulio Ruffini⁴, Pedro C. Miranda^{3,5}, Fabrice Wendling^{1,2}



Dosimétrie

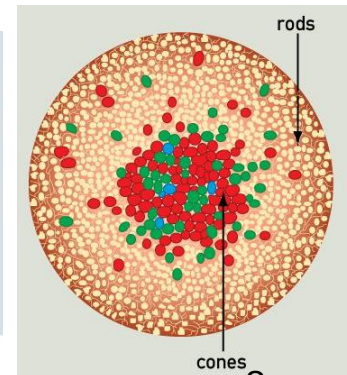
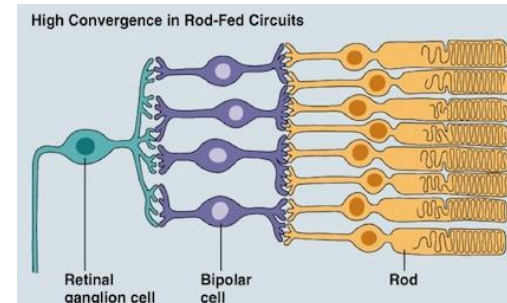
Effet aigü le plus reproductible: perception de **phosphènes** (peut constituer un biais pour certaines études).



Effet suggéré sur les **bâtonnets**:

→ Situés en **périphérie** du champ visuel (perception + courant induit maximal)

→ Pas impliqués dans la **vision couleur** (perception noir et blanc)

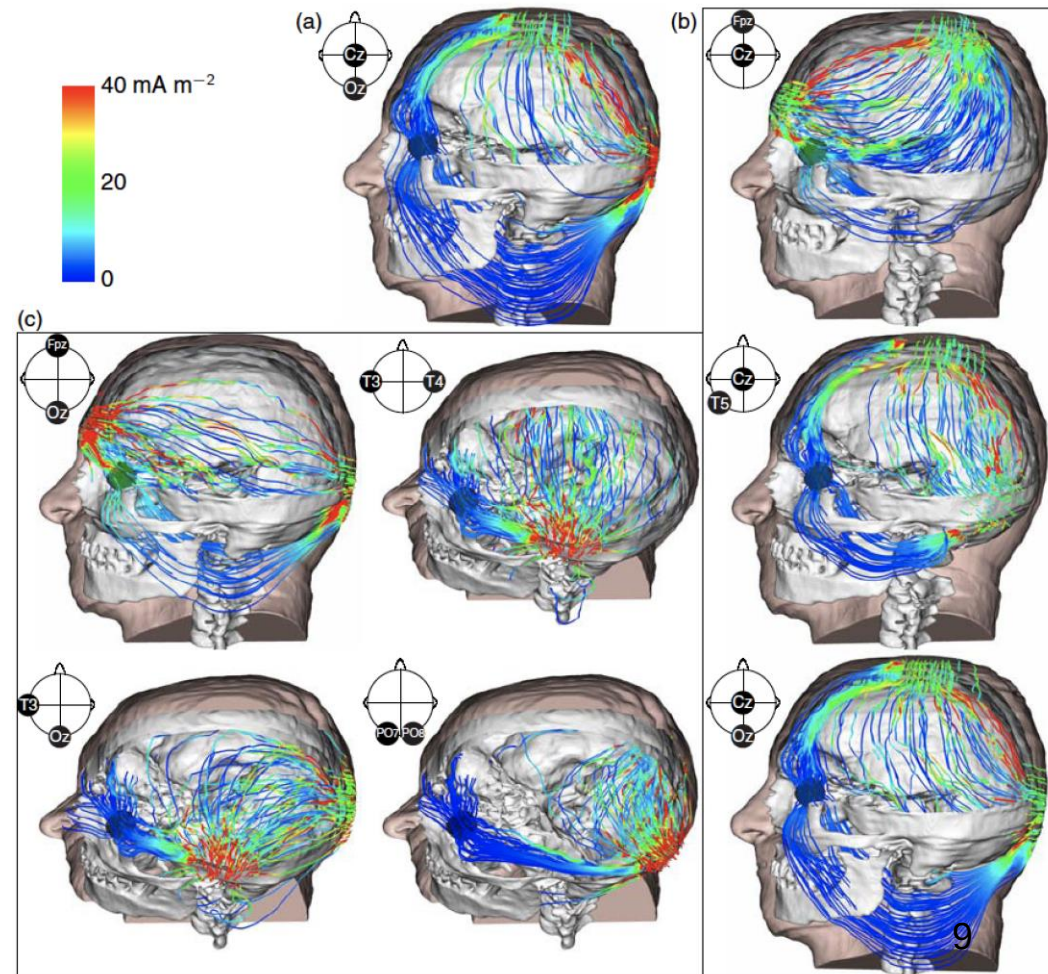


Dosimétrie

Computational analysis shows why transcranial alternating current stimulation induces retinal phosphenes

Ilkka Laakso and Akimasa Hirata

Tissue/body fluid	σ (S m ⁻¹)
Blood	0.70
Bone (cancellous)	0.07
Bone (cortical) and tooth	0.02
Bone marrow	0.05
Brain (grey matter)	0.10
Brain (white matter)	0.06
Cartilage	0.18
Cerebellum	0.10
Cerebrospinal fluid	1.80
Cornea	0.50
Fat	0.04
Lens	0.32
Mucous membrane	0.10
Muscle	0.35
Nerve and spinal chord	0.03
Oesophagus	0.50
Retina	0.70



Dosimétrie



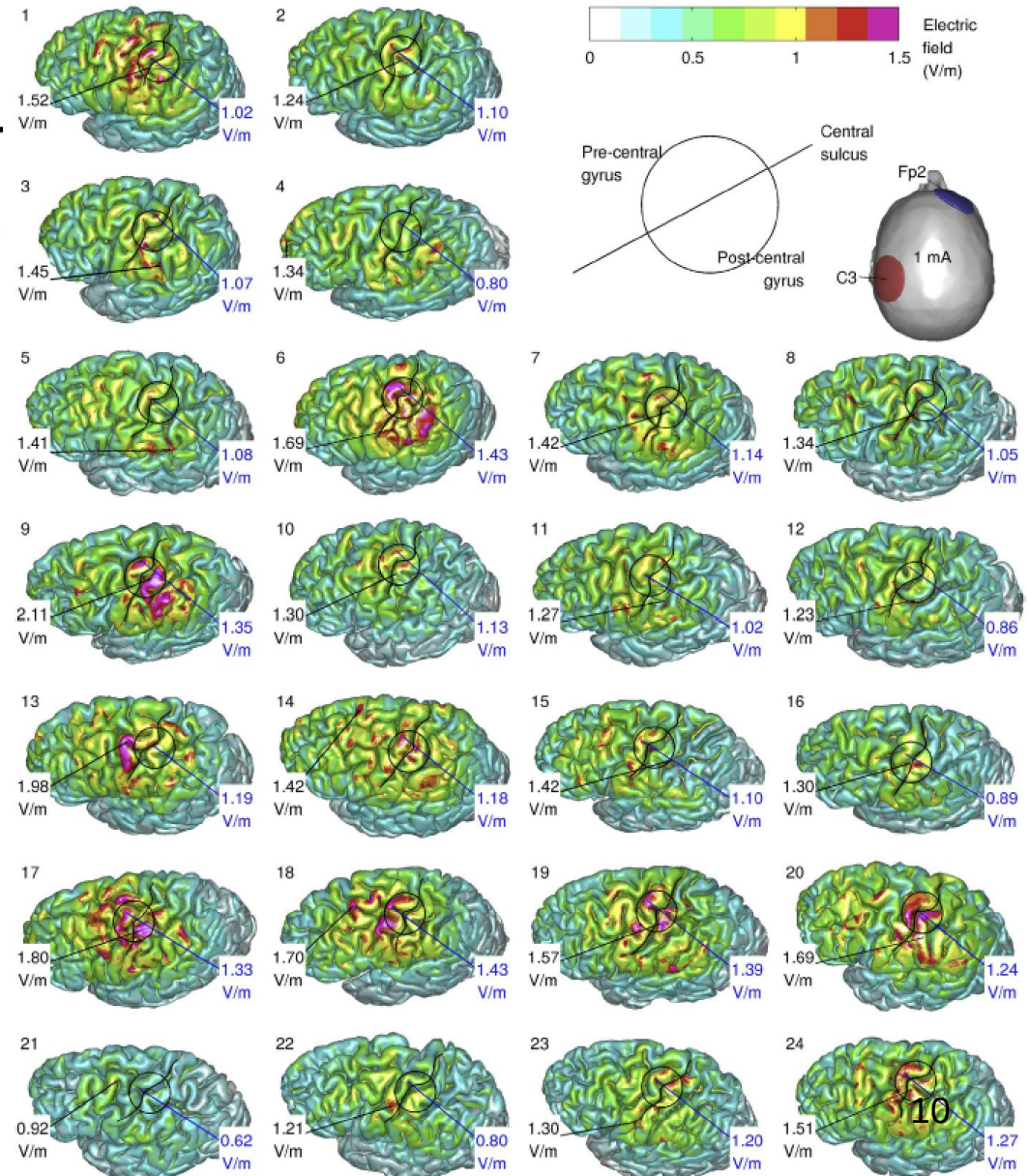
Contents lists available at [ScienceDirect](http://www.sciencedirect.com)

Brain Stimulation

journal homepage: www.brainstimjrn.com

Inter-subject Variability in Electric Fields of Motor Cortical tDCS

Ilkka Laakso^{a,*}, Satoshi Tanaka^b, Soichiro Koyama^{d,c}, Valerio De Santis^a, Akimasa Hirata^a



there is now converging evidence that the electric fields induced by tDCS/tACS, even if subthreshold (on the order of 1 V/m, [Figure 1A](#)), can modulate neuronal function. In particular, it is estimated that a tDCS intensity of 1 mA generates electrical fields at the level of cortical neurons in the 0.2–0.5 V/m range [\[4,25,36\]](#), while 2 mA (~ 0.01 mA/cm²) would produce an electric field of about of 1 V/m [\[14,40\]](#).



Therefore, the main question that arises is: what are the mechanisms that explain neurophysiological effects, for such levels of *in situ* electric field?

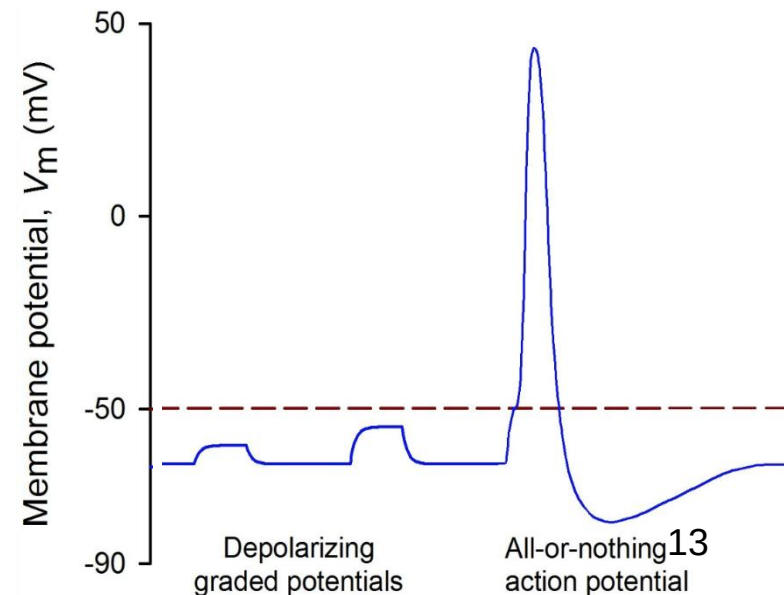
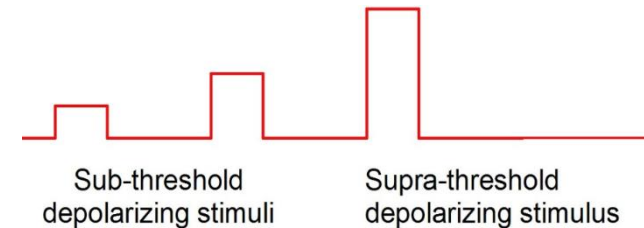
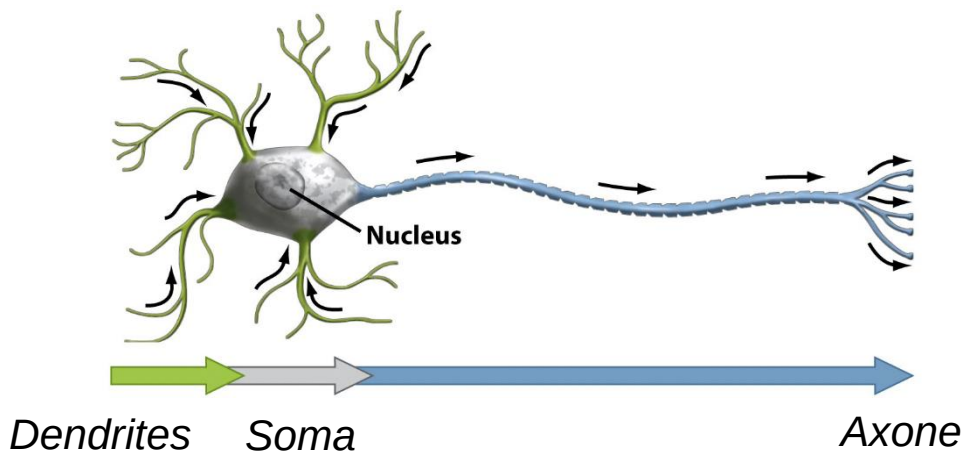
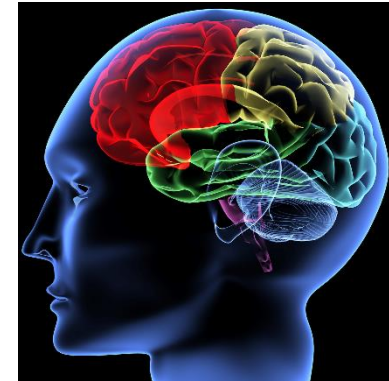
2 - Principes physiques

Le « cerveau électrique »

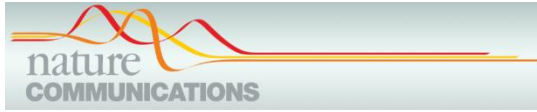
Le cerveau est composé de plus de **100 milliards de neurones**, cellules spécialisées dans le **traitement**, la **transmission** et le **stockage** de l'information.

En moyenne, chaque neurone est connecté à **10,000** autres neurones via des **synapses**.

Les neurones utilisent **des impulsions électriques (potentiels d'action)** pour transférer et traiter l'information.

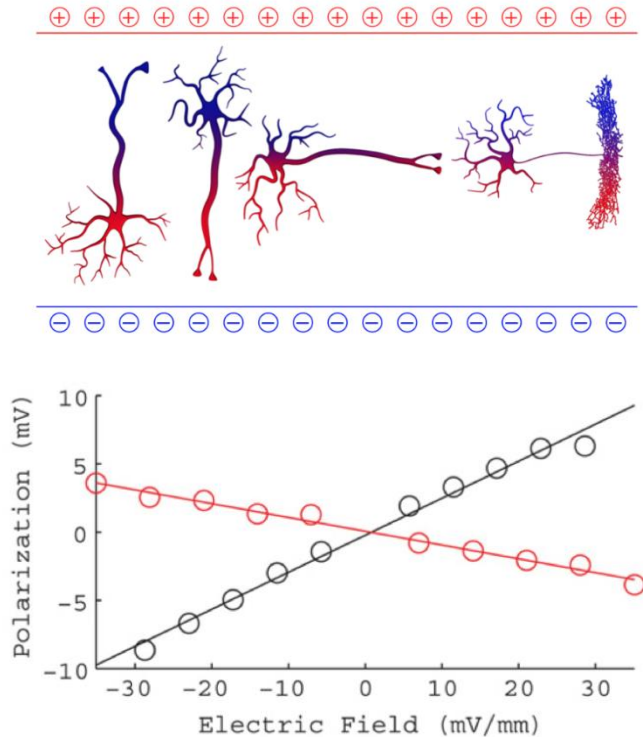


Effets du champ électrique *in situ* sur les neurones



Immediate neurophysiological effects of transcranial electrical stimulation

Anli Liu^{1,2}, Mihály Vöröslakos^{3,4}, Greg Kronberg⁵, Simon Henin^{1,2}, Matthew R. Krause⁶, Yu Huang⁵, Alexander Opitz⁷, Ashesh Mehta^{8,9}, Christopher C. Pack⁶, Bart Krekelberg¹⁰, Antal Berényi³, Lucas C. Parra⁵, Lucia Melloni^{1,2,11}, Orrin Devinsky^{1,2} & György Buzsáki⁴



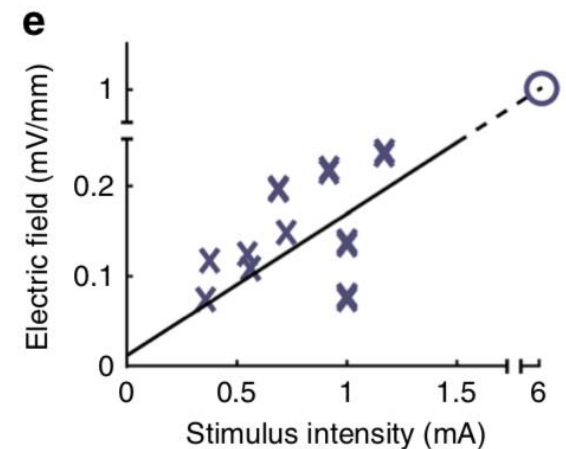
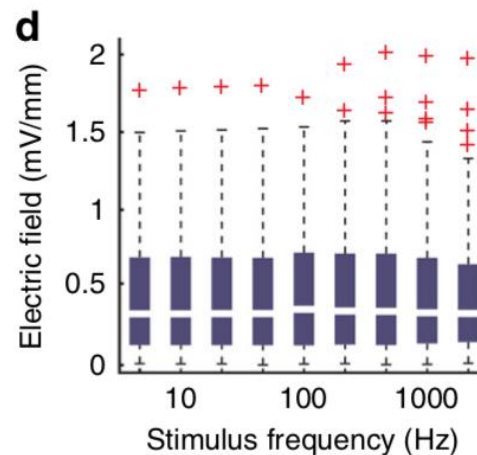
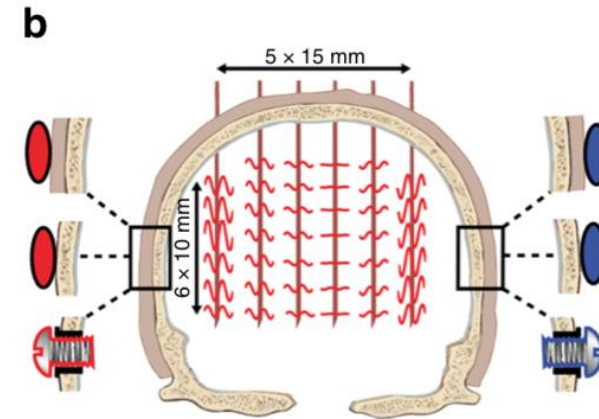
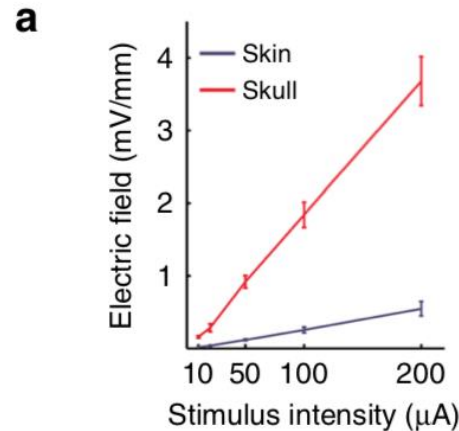
Brain Stimulation (2009) 2, 215-28



BRAIN
STIMULATION
www.brainstimjml.com

Role of cortical cell type and morphology in subthreshold and suprathreshold uniform electric field stimulation *in vitro*

Thomas Radman, PhD^a, Raddy L. Ramos, PhD^{b,c}, Joshua C. Brumberg, PhD^c, Marom Bikson, PhD^a



Quelques montages utilisés en tDCS/tACS

NEWS FEATURE

SOURCE: M. A. NITSCH ET AL. *BRAIN STIM.* 1, 206-223 (2008)

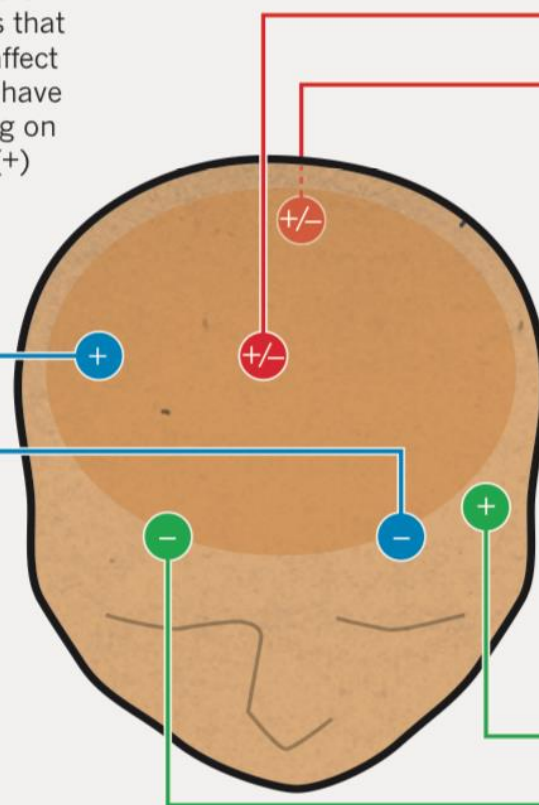
WIRED UP

In transcranial direct-current stimulation, electrodes placed on the scalp deliver low currents that can penetrate the skull and affect brain tissue. Differing effects have been documented, depending on the placement of the anode (+) and cathode (-).

MOTOR CONTROL

Anodal stimulation over the motor cortex on the side of the brain affected by stroke has been shown to improve movement for arms and hands.

- Up to 4 milliamps for as long as 20 minutes.



VISUAL PERCEPTION

Alterations in visual perception have been noted under both cathodal and anodal stimulation of the occipital lobes.

- Up to 2 milliamps for as long as 15 minutes.

WORKING MEMORY

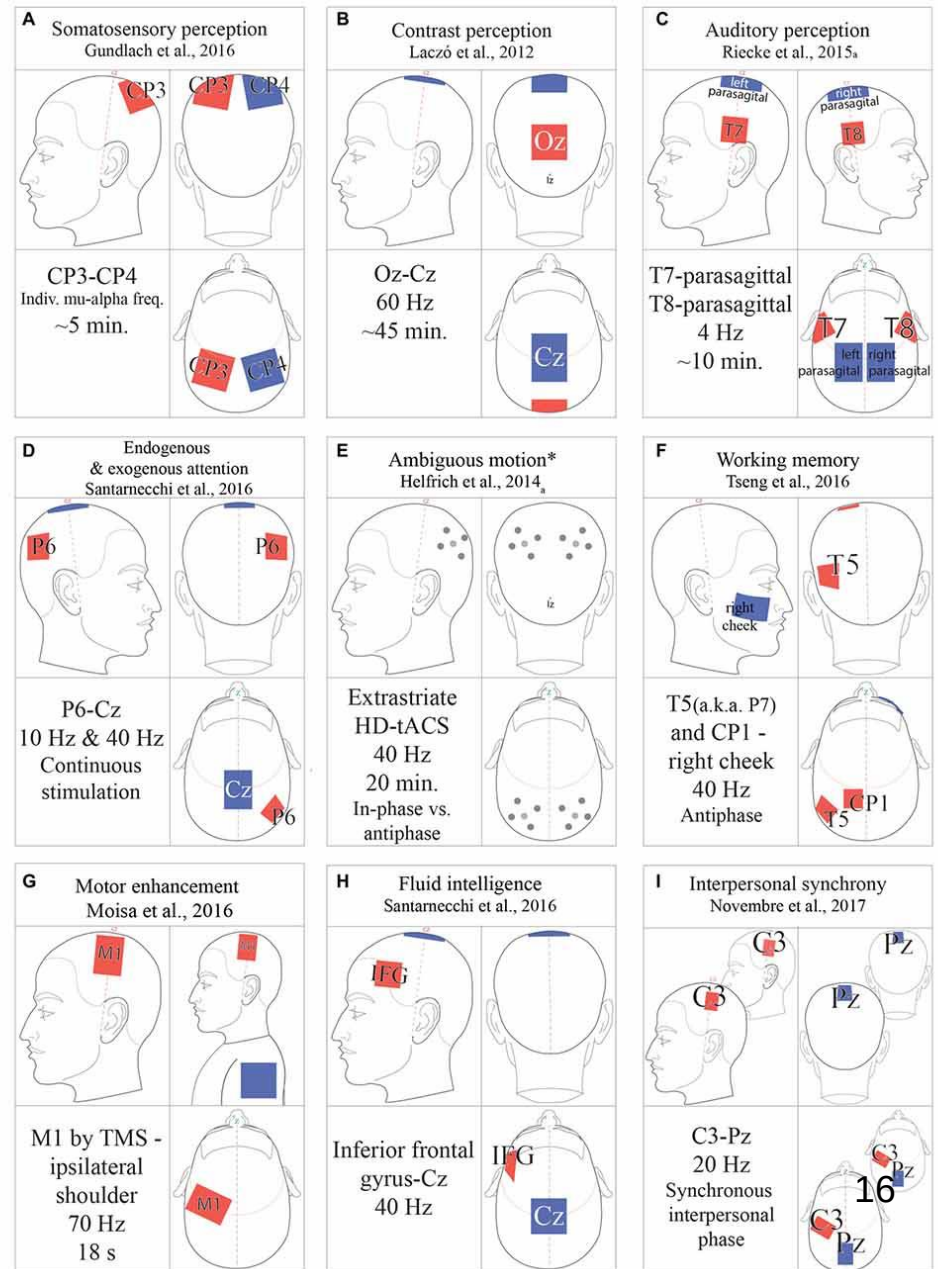
Anodal stimulation of the dorsolateral prefrontal cortex has been associated with improved working memory and verbal fluency.

- Up to 2 milliamps for as long as 20 minutes.

Dosimétrie

Transcranial Alternating Current Stimulation (tACS) Mechanisms and Protocols

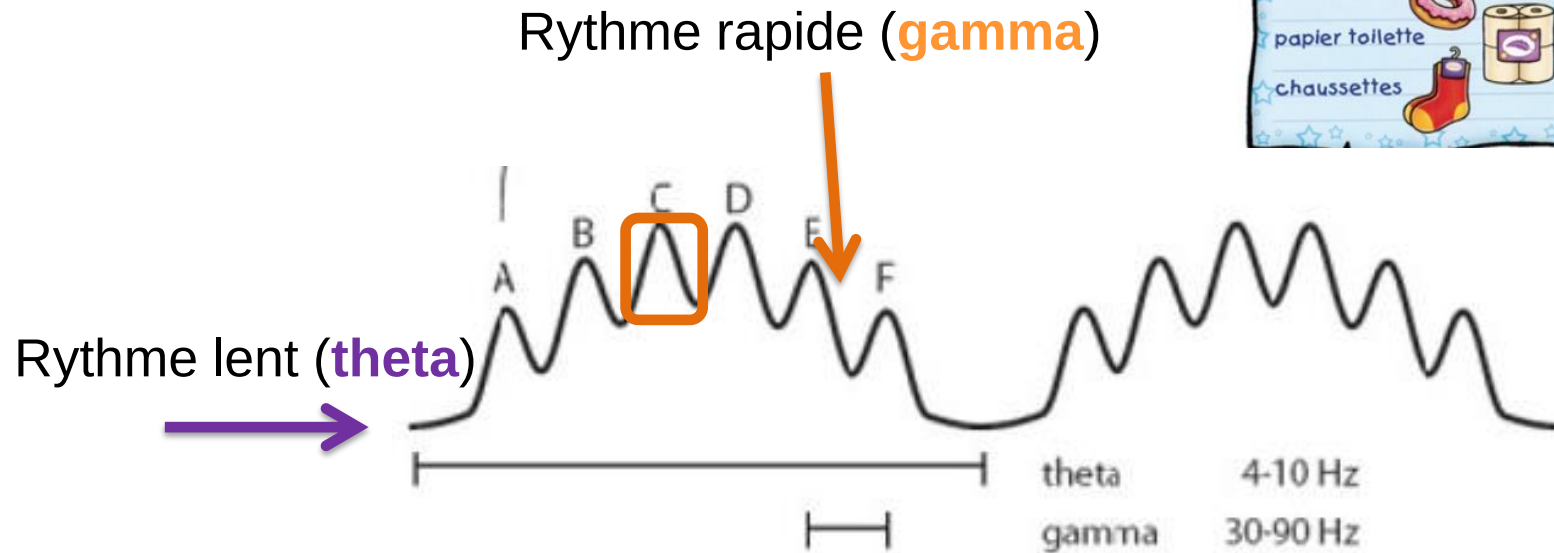
Amir V. Tavakoli^{1,2*} and Kyongsik Yun^{1,3,4}



3 – Application: la mémoire de travail

La mémoire de travail

Exemple de la **mémoire de travail**:
retenir **quelques items** d'une liste...



➔ Les résultats actuels que l'on peut retenir **autant d'items** en mémoire que d'**oscillations gamma par cycle**! Que se passe-t-il si l'on **stimule** à ces fréquences précises?

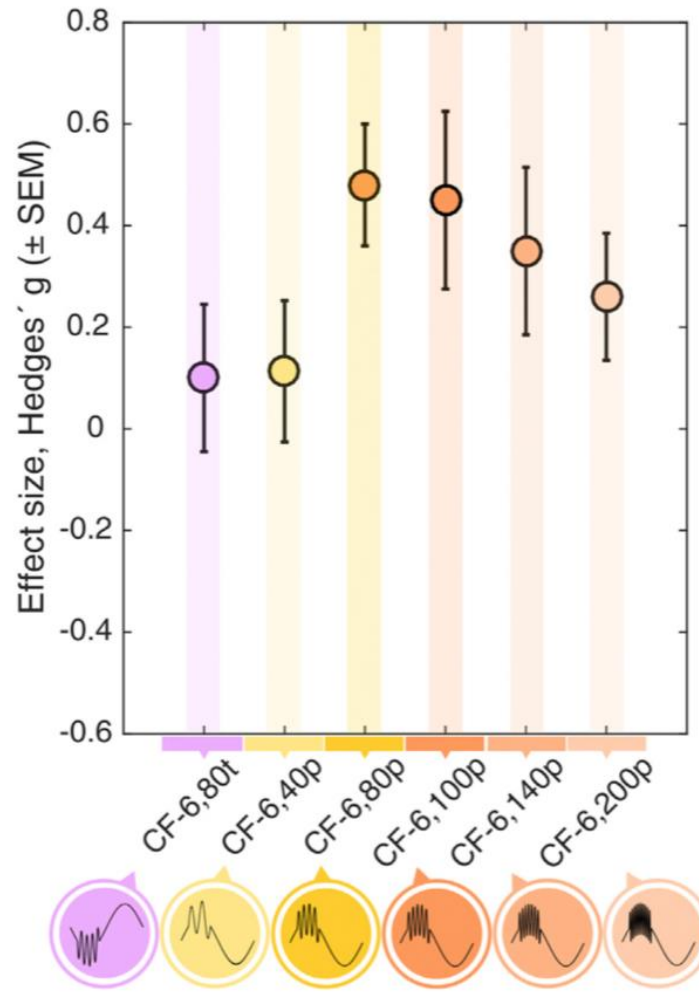
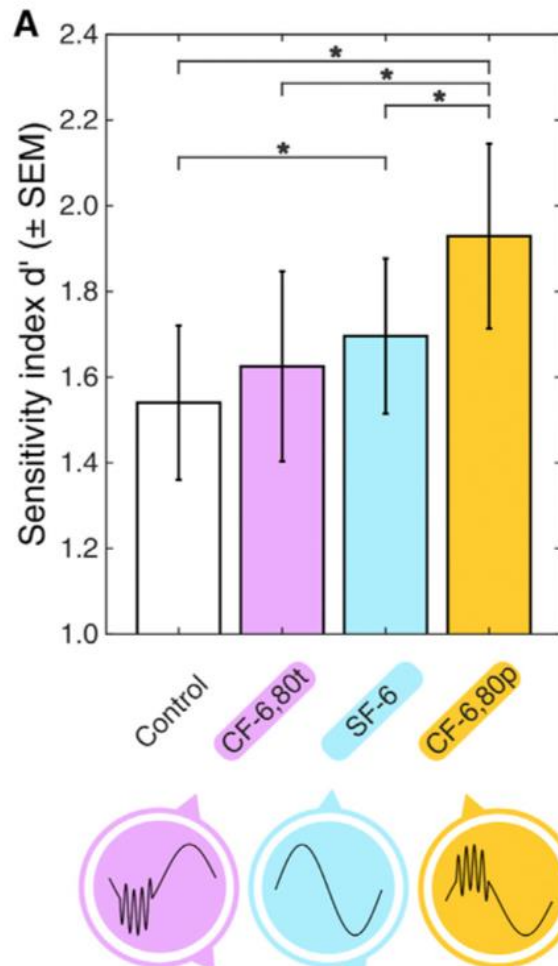
Amélioration de la mémoire de travail par tACS (Ex 1)

Article



Current Biology

Spatial Working Memory in Humans Depends on Theta and High Gamma Synchronization in the Prefrontal Cortex

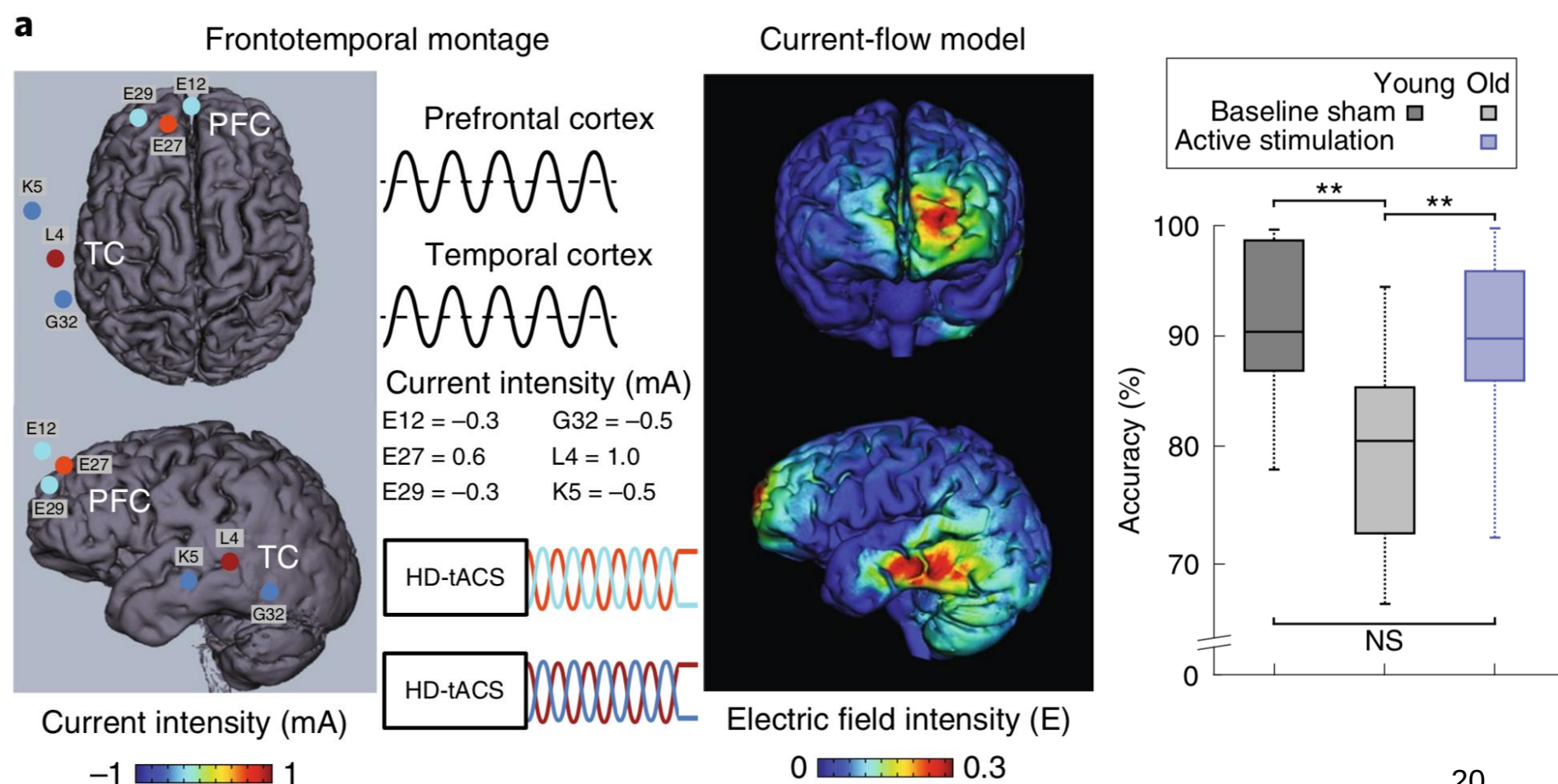


Amélioration de la mémoire de travail par tACS (Ex 2)

Working memory revived in older adults by synchronizing rhythmic brain circuits

nature
neuroscience

Robert M. G. Reinhart[✉] and John A. Nguyen

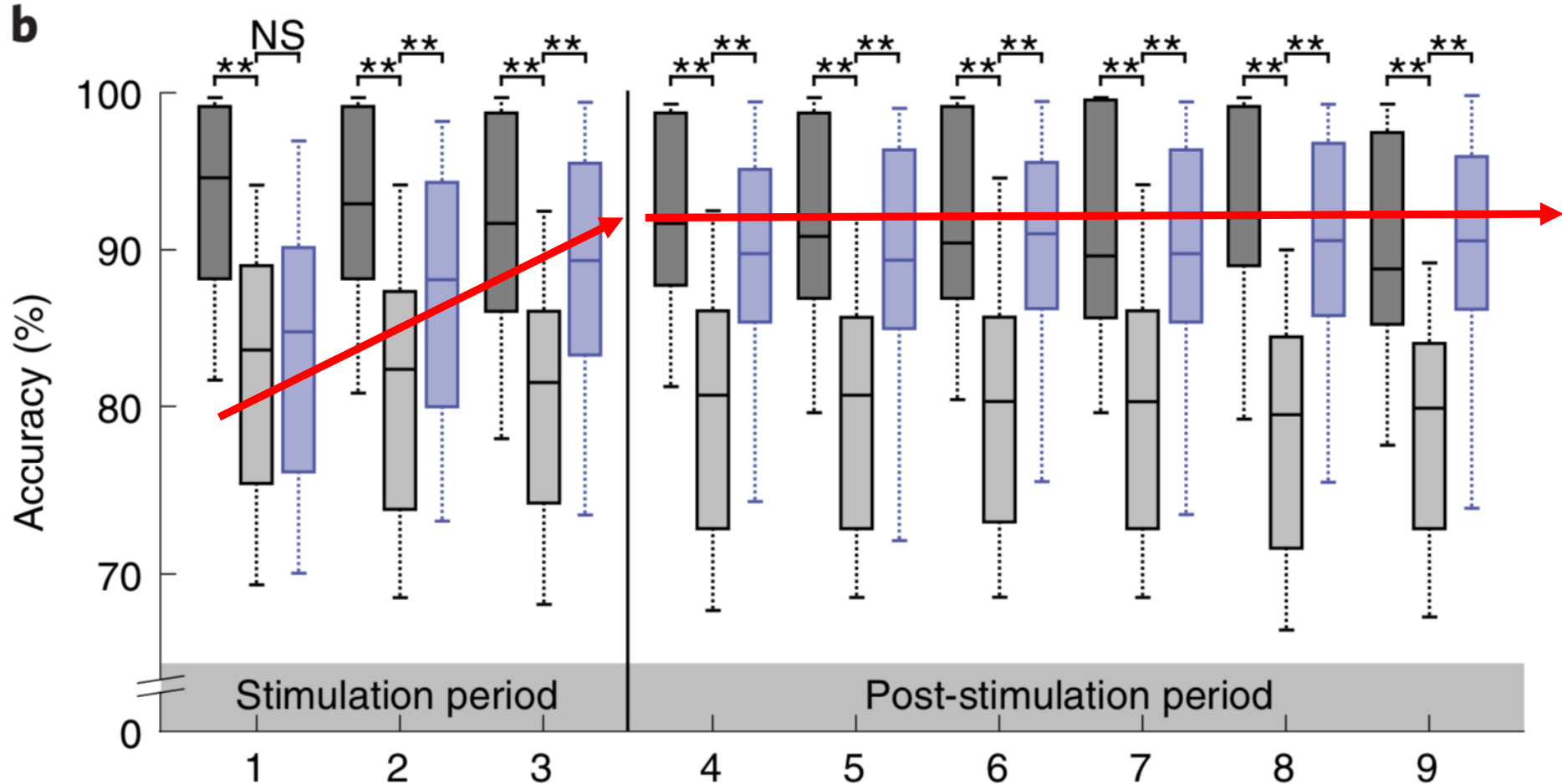


Amélioration de la mémoire de travail par tACS (Ex 2)

Working memory revived in older adults by synchronizing rhythmic brain circuits

nature
neuroscience

Robert M. G. Reinhart* and John A. Nguyen

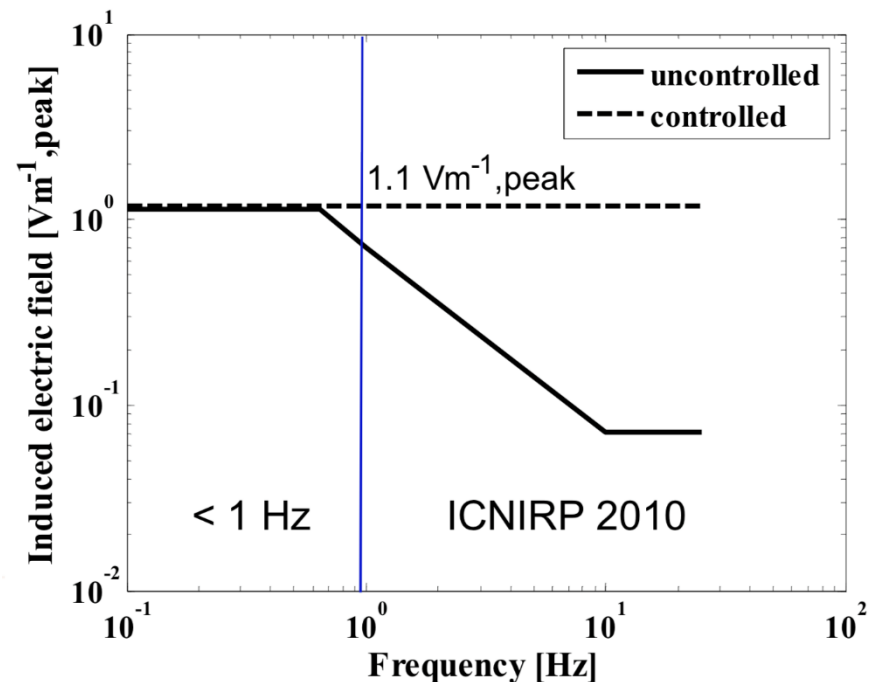


4 – Quelles implications pour les normes d'exposition aux CEM?

Normes d'exposition ICNIRP/IEEE



A Reaction	B Locus	C Threshold $E_{ot}(50\%)$ (V/m, rms)	D Adverse mult. (F_a)	E Prob. mult. (F_p)	F Safety factor (F_s)		G Basic restrictions (E_{ob})	
					General public	Contr. environ	General public (V/m, rms)	Contr. environ. (V/m, rms)
Synapse alter.	Brain	0.053	1.0	0.333	0.333	1.000	5.89×10^{-3}	1.77×10^{-2}
10- μ m neuron excite	Brain	8.70	1.0	0.333	0.333	1.000	0.970	2.90
20- μ m neuron pain	Body	4.35 (percept.)	1.45 (pain)	0.333	0.333	1.000	0.700	2.10
20- μ m neuron pain	Hands, feet, wrists, ankles	4.35 (percept.)	1.45 (pain)	0.333	1.000	1.000	2.10	2.10

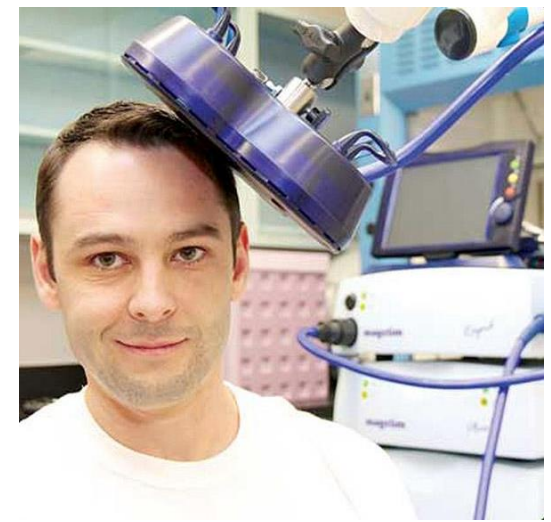


Implications: normes d'exposition ICNIRP/IEEE

- ➔ **Nécessité d'une revue exhaustive** de cette littérature pour informer les normes IEEE/ICNIRP, qui jusqu'à présent ne l'ont pas intégrée (études récentes)
- ➔ Difficulté: **grande diversité** des études tDCS/tACS, tranches, *in vivo*, humain; nombreux montages différents, intensité, repos/tâches cognitives...
- ➔ Le domaine de la stimulation électrique transcrânienne pourrait renforcer les normes existantes en **clarifiant la base des effets biologiques et de leurs mécanismes**

Conclusion et quelques perspectives...

- ➔ Les **mécanismes d'action** de la tDCS/tACS restent encore mal compris, mais des effets **robustes** ont été mis en évidence
- ➔ Les champs électriques induits *in situ* sont de l'ordre de < 1 V/m
- ➔ Des applications **existantes et validées** (mémoire de travail, épilepsie pharmaco-résistante,) et **en cours d'investigation** (Parkinson, dépression, douleur, troubles du sommeil...)
- ➔ Expérimentation délicate car plusieurs **biais** possibles qui doivent être contrôlés (condition « sham », taille d'échantillon, artefacts sur les signaux électrophysiologiques)
- ➔ La littérature tDCS/tACS devrait permettre de contribuer aux **normes internationales** d'exposition aux CEM



Merci pour votre attention!
julien.modolo@inserm.fr

