

Les données actuelles sur les effets biologiques des champs de très basse fréquence

par

Henri BRUGÈRE

**Unité de Physiologie -Thérapeutique, ENV,
94704 Maisons-Alfort cedex 04**



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Définition des effets biologiques par rapport aux effets sanitaires

Effets biologiques:

effets pouvant être décrits des conditions expérimentales sur des modèles de complexité variable (de la fraction subcellulaire à l'organisme entier).

Effets sur la santé:

effet s'exerçant sur des organismes humains ou animaux causant un préjudice sous la forme d'une maladie, ou dans le cas des animaux d'élevage, d'une baisse des productions.



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

EXPOSITION
> seuil

Champ
E ou H
(grandeur
mesurable)

INTERACTION
PRIMAIRE
=
TRANSDUCTION

Modifie
molécules
membranes
courants
ions
etc..

TRAITEMENT
DU SIGNAL
CELLULAIRE

Cascade
transmission
ou
amplification
du signal

EFFETS
BIOLOGIQUES

Modification
des
fonctions
cellulaires
et / ou
systémiques

DYSFONCTION
CELLULAIRE

Effets
défavorables

EFFETS
SUR LA
SANTÉ

Maladie

les modifications induites peuvent
donner lieu à adaptation, réversibilité,
ou poursuivre vers l'induction d'effets
sanitaires

Conception des effets biologiques et sanitaires
des CEM comme dépendant d'une chaîne d'étapes successives

(Valberg, 1997)



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Champs électriques / magnétiques de très basse fréquence

= **Extremely Low Frequency**

= **E.L.F.**

Fréquences de 0 à 300 Hz

Longueurs d'ondes de 1000 km pour 300 Hz

de 6000 km pour 50 Hz



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Intérêt de la connaissance des effets biologiques :

Description en regard des valeurs de champs
Connaître la "dose" pour déterminer la sécurité

Connaître les interactions des CEM sur le vivant
Connaître les mécanismes d'interactions

.... mais existe-t-il des effets biologiques des ELF ?



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Existe-t-il des effets biologiques des ELF ?

La question des énergies mises en jeu !!!

Les E.L.F. ne rayonnent pas d'énergie

Que peut-il résulter de l'influence exercée dans la zone où les champs sont de forte valeur ?



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Longueur d'onde
 λ (m)

Energie photonique
(eV)

Rayons X mous	$1,2 \cdot 10^{-9}$	1000
Lumière visible	$0,5 \cdot 10^{-6}$	2,5
Infrarouge lointain	$30 \cdot 10^{-6}$	0,04
Radar	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Télévision Radio (exemple: 240 MHz)	1,2	$1 \cdot 10^{-6}$
Ligne HT 60 Hz	5 000 000	$1 \cdot 10^{-12}$

Energie des ELF comparée à celle des autres CEM



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Flux d'énergie rayonné par :

le soleil à midi

$$1400 \text{ W / m}^2$$

la lune (pleine lune)

$$2 \cdot 10^{-3} \text{ W / m}^2$$

Un appareil électrique produisant

- un champ E de 1 kV / m

- un champ M de 0,1 mT

$$2 \cdot 10^{-8} \text{ W / m}^2$$

X 700 000

X 100 000



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Energie rayonnée par 100 m de ligne de 500 MW : 1.10^{-5} W

Métabolisme basal humain : 100 W

Métabolisme humain (exercice):..... 800 W

Energie transférée à l'Homme:..... 5.10^{-8} W

Elévation thermique (Homme) :..... $1,5.10^{-8}$ °C/jour

**Energie mise en jeu par les champs E et M
par rapport à l'énergie métabolique de l'Homme**



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Définition des effets thermiques et non thermiques

Effets thermiques:

effets biologiques ou sanitaires dépendants de l'élévation de température consécutive à l'action d'un CEM (par exemple par agitation des molécules d'eau, ou effet Joule). Ils sont reproductibles sur un modèle inanimé.

Effets non thermiques:

effets biologiques ou sanitaires indépendants d'une élévation de température. Ils peuvent résulter de l'action des courants induits par les CEM sur des structures sensibles (par exemple des neurones).

Du fait des énergies mises en jeu, les effets des CEM de très basse fréquence (ELF) ne peuvent être des effets thermiques.



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

On peut donc s'attendre à ce que :

- les E.L.F. ne produisent pas d'effet thermique**
- s'ils ont des effets biologiques
ceux-ci résultent d'effets non thermiques**

La question des interactions garde toute sa pertinence !



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

1 mm d'eau	10^{10}
Activation d'un cil de l'oreille interne	1
Ouverture d'un mécanorécepteur couplé à 1 canal ionique	14
Molécule chargée (10 +) d'une cellule de la membrane au potentiel de repos (50 mV)	16
Force de liaison d'un ligand à un récepteur protéique	90
Force produite par le flagelle des bactéries	100
Action d'un champ (1000 V/m) sur 1 molécule chargée (10 charges +) ..	$6 \cdot 10^{-11}$
Action d'un champ 0,1 milliT 60Hz sur 1 molécule membranaire	$2 \cdot 10^{-5}$
Action d'un champ 0,1 milliT 60Hz sur 1 molécule en déplacement..... (10 charges +)	$1 \cdot 10^{-7}$

Forces produites par les CEM 50/60 Hz

(1 pN = 10^{-12} N)



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Dans la perspective d'effets athermiques, retenir que:

- le champ E, "déformable", ne pénètre pas la matière vivante et se limite à la zone de surface

- le champ M, n'est pas arrêté par la plupart des matériaux inertes ni par les organismes vivants.

Dans les organismes vivants il ne rencontre pratiquement pas d'éléments (organes, cellules, organelles) présentant des propriétés magnétiques.

A priori, seule la magnétite peut constituer une "cible" quand elle existe.

La question des interactions devra aussi être conforme avec les potentialités d'action de chaque type de champ



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

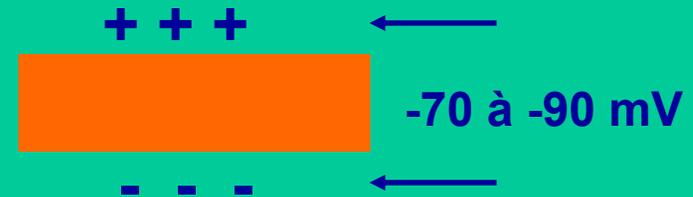
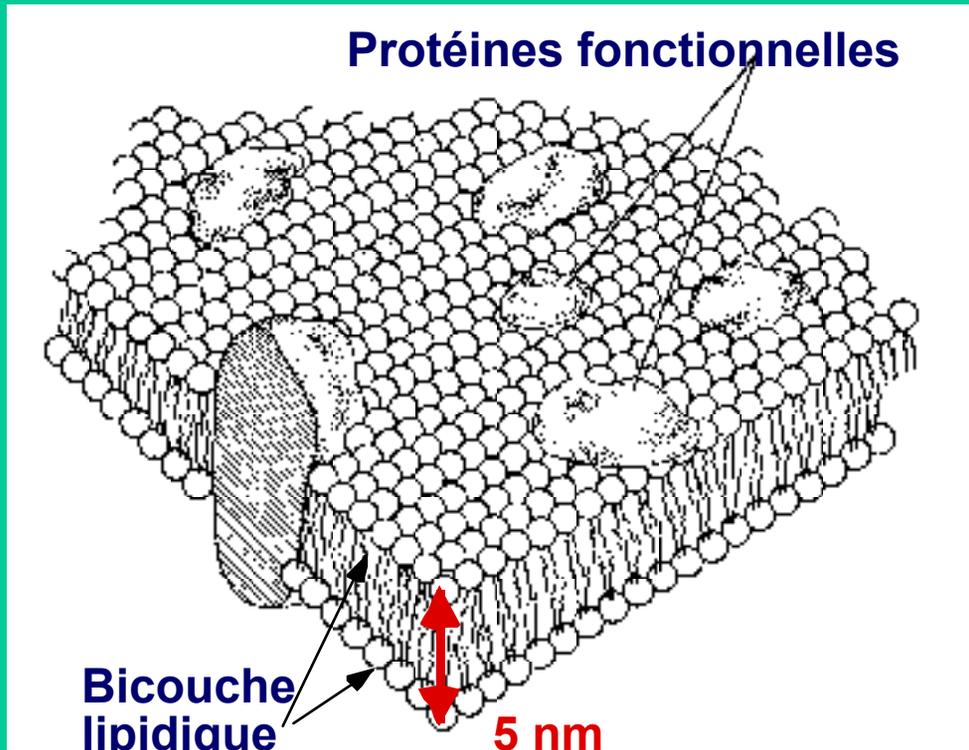
Interactions

- sur les membranes cellulaires et leurs phénomènes électriques (mécanismes de l'excitabilité cellulaire)
- avec les mécanismes de transduction de l'information exemple du calcium
- sur les particules mobilisables



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Interaction sur les membranes cellulaires et leurs phénomènes électriques

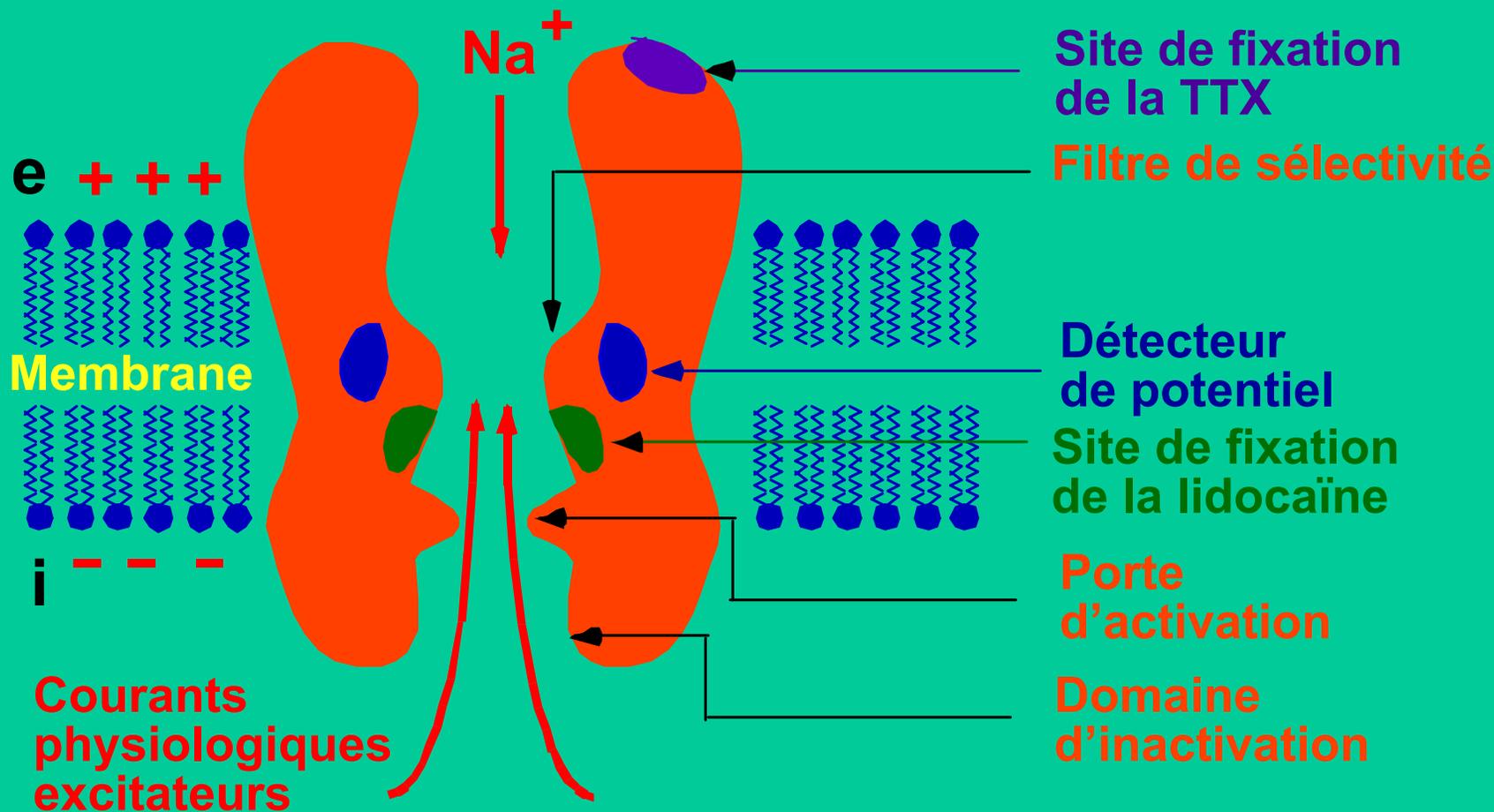


**Un champ de 10 kV/m
produit sur la membrane
une ddp ~ 50 000 fois plus
faible que son pot de repos**

**Les membranes cellulaires maintiennent
une différence de potentiel de -70 à -90 mV**



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004



Un exemple de canal ionique commandé par tension: l'électrorécepteur sodium



Cœur

Le déterminisme de l'activité cardiaque dépend de phénomènes électriques

L'activité cardiaque est-elle modifiée par les CEM de très basse fréquence ?

=

Les CEM de très basse fréquence produisent-ils des troubles du rythme?



Cœur

KORPINEN L., PARTANEN J. et UUSITALO A. :

Influence of 50 Hz electric and magnetic fields on the human heart.
Bioelectromagnetics, 1993, 14 : 329-340.

Enregistrements par holters chez 27 travailleurs de l'électricité et un nombre égal de volontaires

Champs E -> 10,21 kV/m

Champs M -> 15,43 μ T

KORPINEN L. et PARTANEN J. :

Influence of 50 Hz electric and magnetic fields on the pulse rate of human heart.
Bioelectromagnetics, 1994, 15: 503-512.

Enregistrements par holters chez 41 volontaires

Enregistrement aussi de Pression artérielle et EEG

Champs E -> 4,3 kV/m

Champs M -> 6,6 μ T

Les mêmes sujets sont enregistrés par périodes dans le champ et en dehors.



Systeme nerveux

Les CEM peuvent-ils modifier l'activité des neurones ?

- soit des neurones centraux**
- soit des neurones périphériques**



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Système nerveux

Les CEM peuvent-ils modifier l'activité des neurones ?

- soit des neurones centraux
- soit des neurones périphériques

La réponse est affirmative, mais

- les paramètres des champs (magnétiques) nécessaires pour obtenir une réponse fixent l'ordre de grandeur de l'aptitude des neurones à réagir
- les champs produisant ces effets sont si intenses qu'ils ne peuvent être obtenus que sous forme d'impulsions (dB/dt) de très fortes valeurs (des dizaines à des centaines de $Teslas.s^{-1}$)

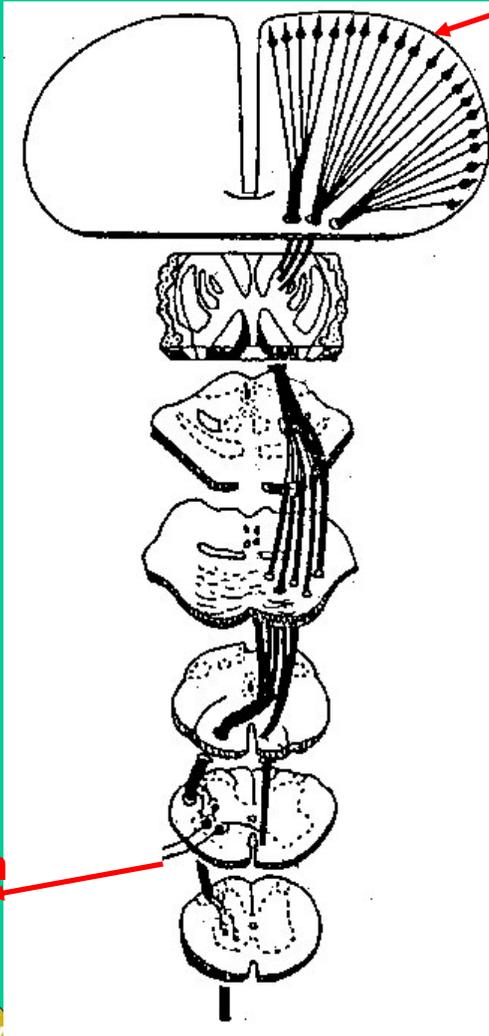


S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Neurones centraux

Hémisphère
cérébral gauche

Stimulation

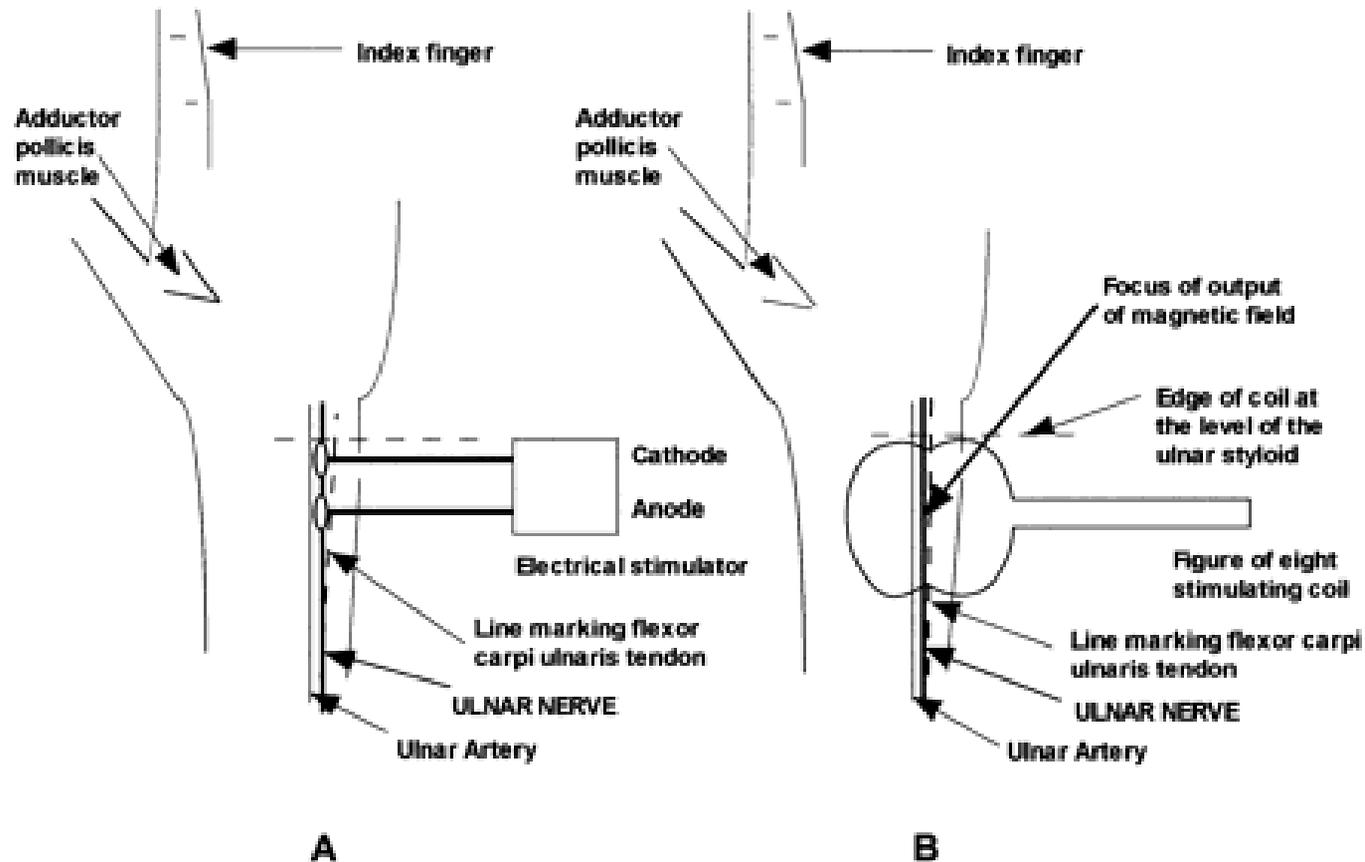


vers les
muscles
de la main
droite



Stimulation transcrânienne de neurones moteurs
S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Neurones périphériques



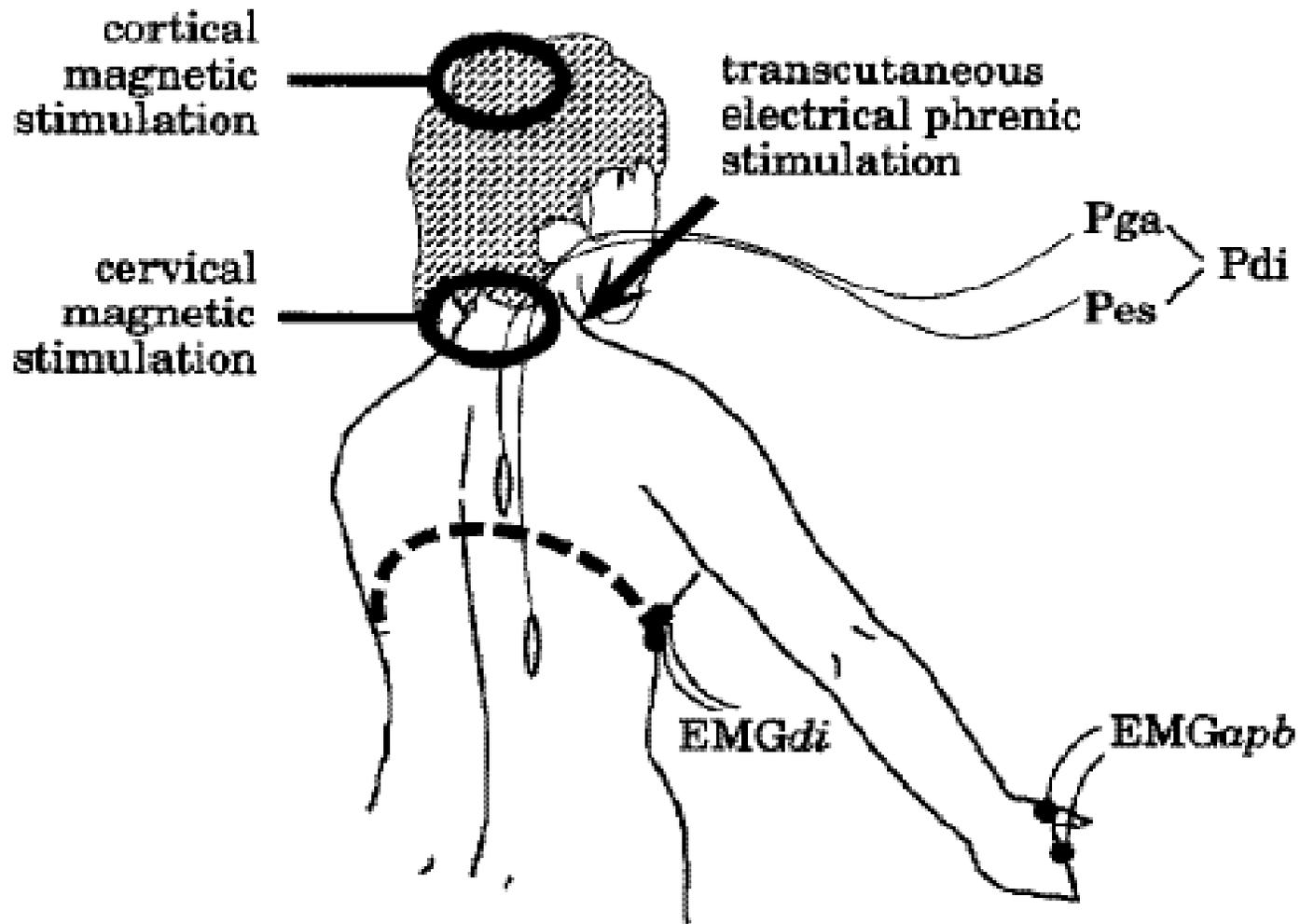
Stimulation magnétique d'un nerf périphérique (B), comparé à la stimulation électrique

(Harris M.L. and al., 2000)



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Neurones périphériques



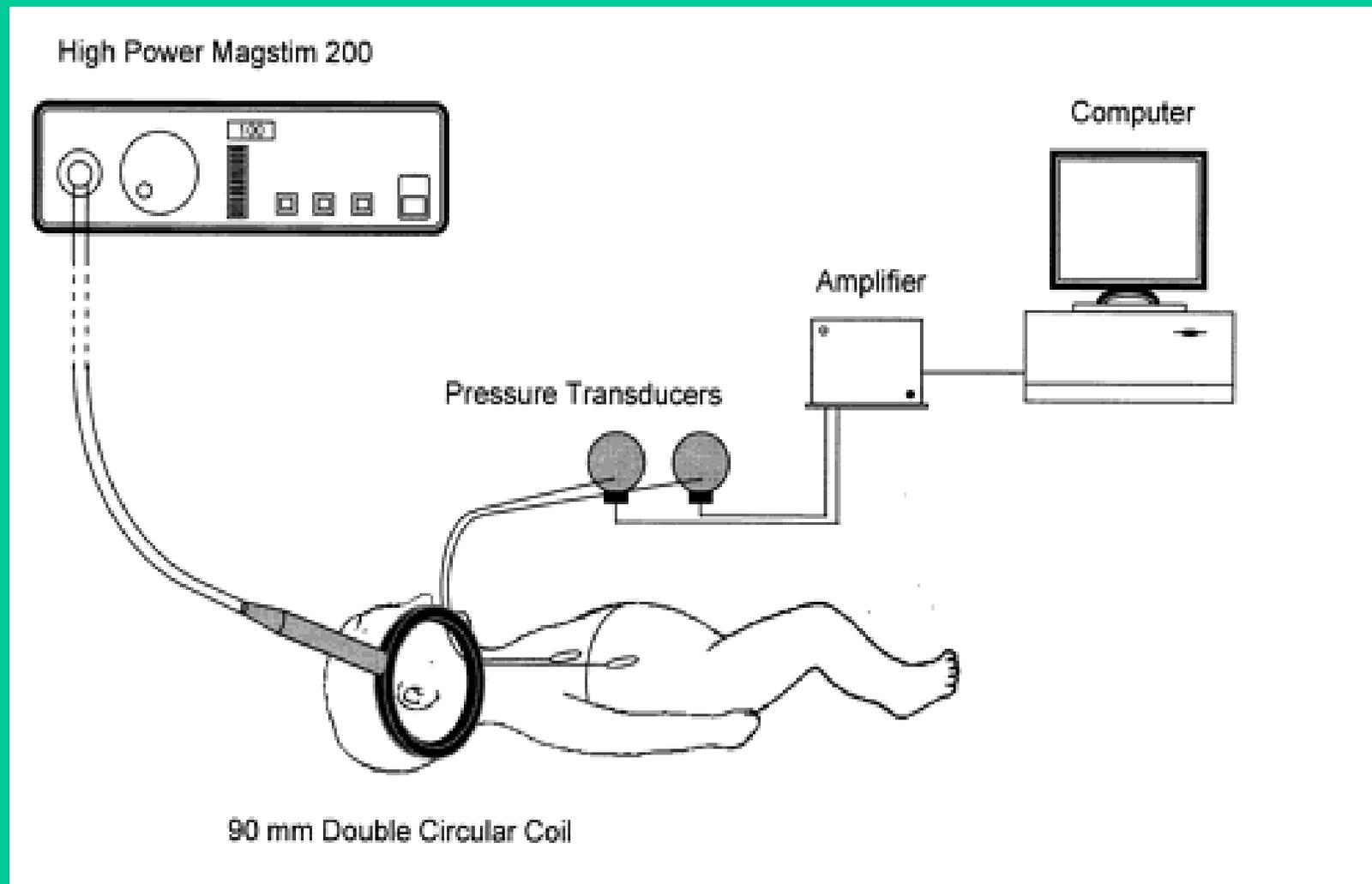
Stimulation magnétique des nerfs phréniques

(Similowski T. and al., 1996)

S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004



Neurones périphériques



Stimulation magnétique des nerfs phréniques

(Rafferty G.F. et al., 2000)

S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004



Organes des sens

Œil et vision

Peau et sensibilité cutanée

Réactions, modifications comportementales

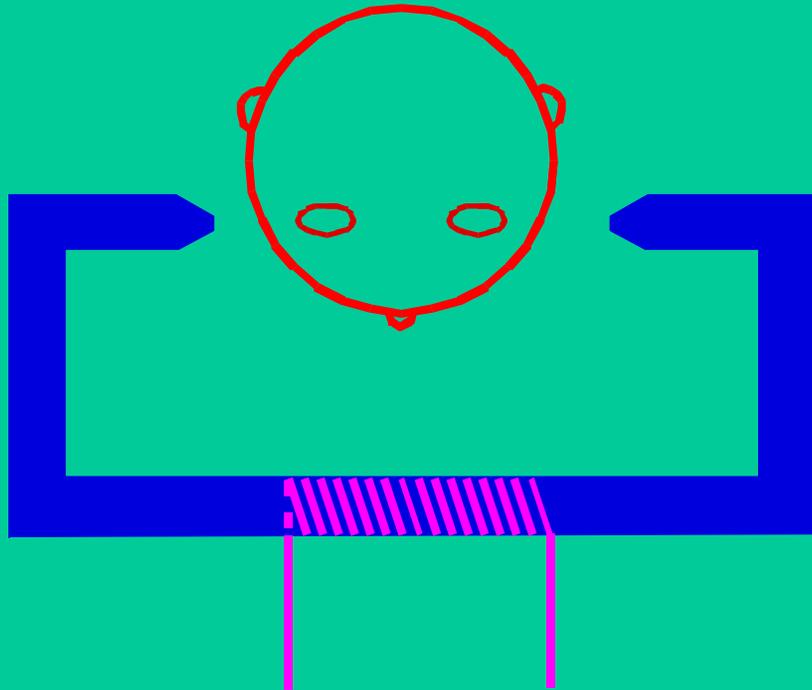
Perception du champ M



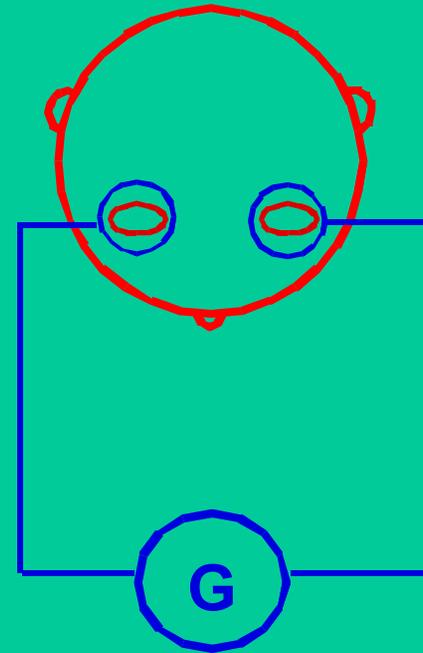
S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Organes des sens: œil et vision

*Obtention de
magnétosphères*



*Obtention
d'électrophosphères*

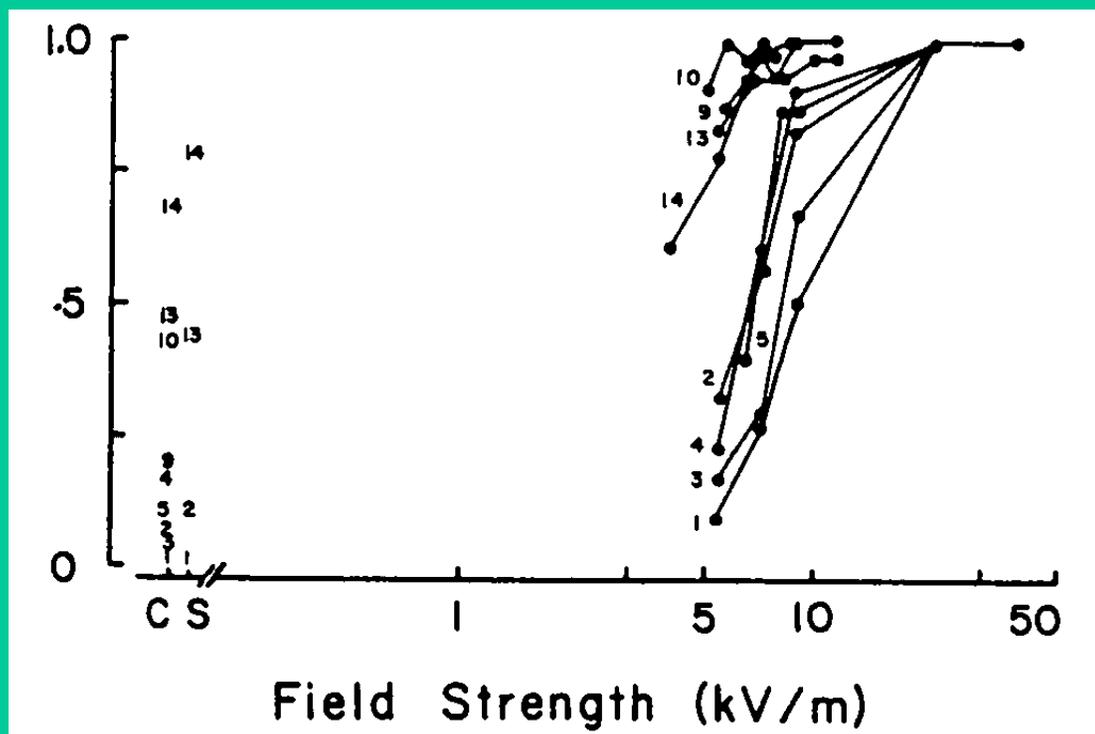


(Taki et al, 2003)



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

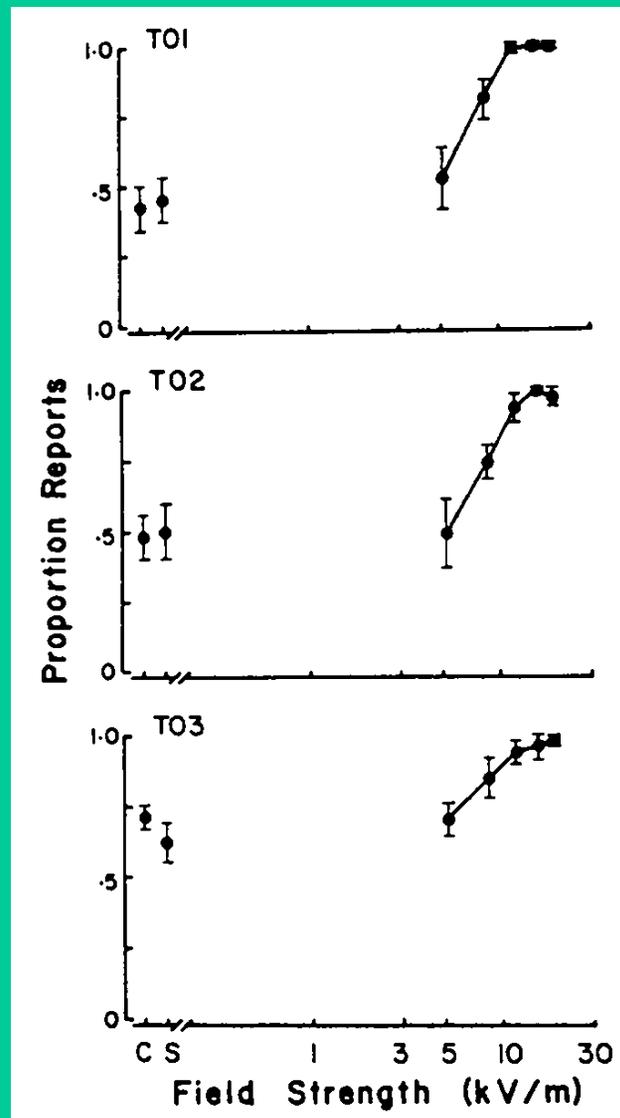
Peau, tact et perception du champ E



Essais sur le même rat

Seuil de perception du champ E:
étude chez le rat conditionné

(Stern S et al, 1983)

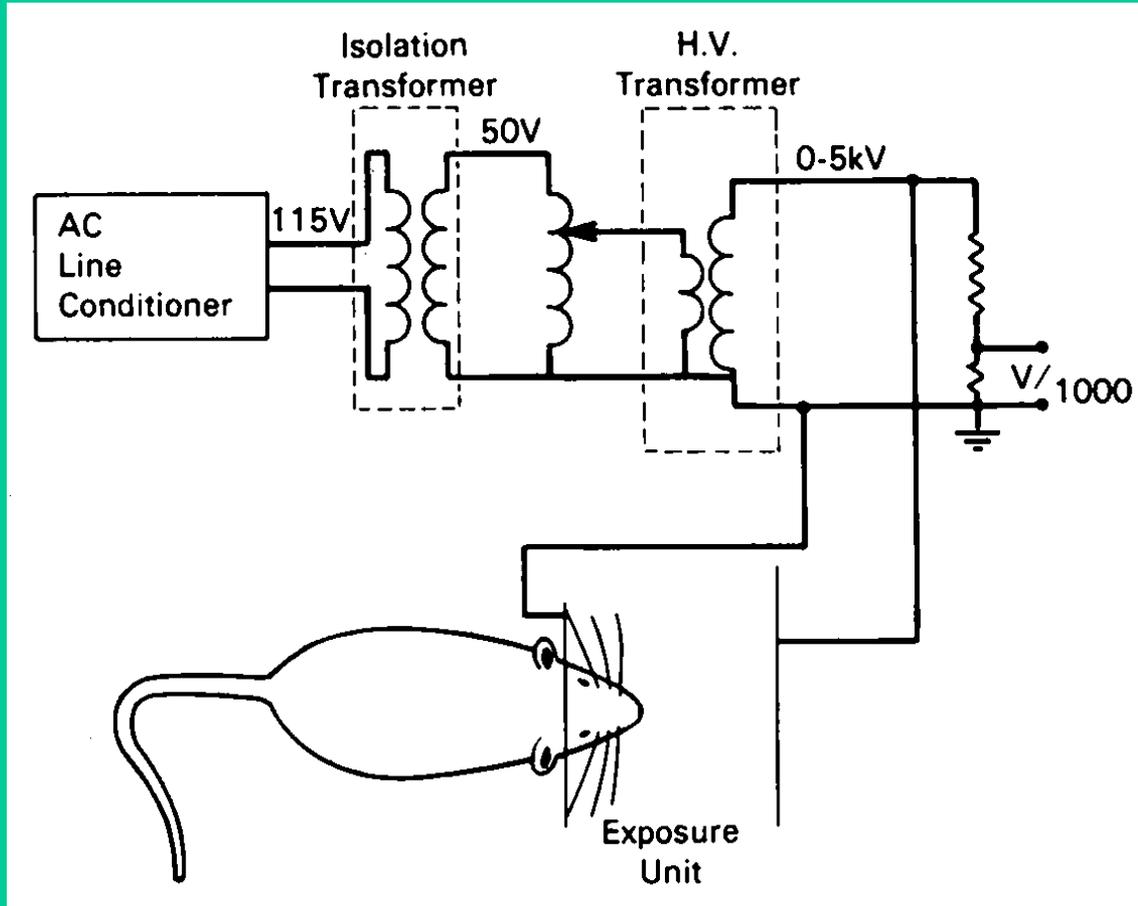


Moyennes pour 3 rats



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Peau, tact et perception du champ E



50 kV/m

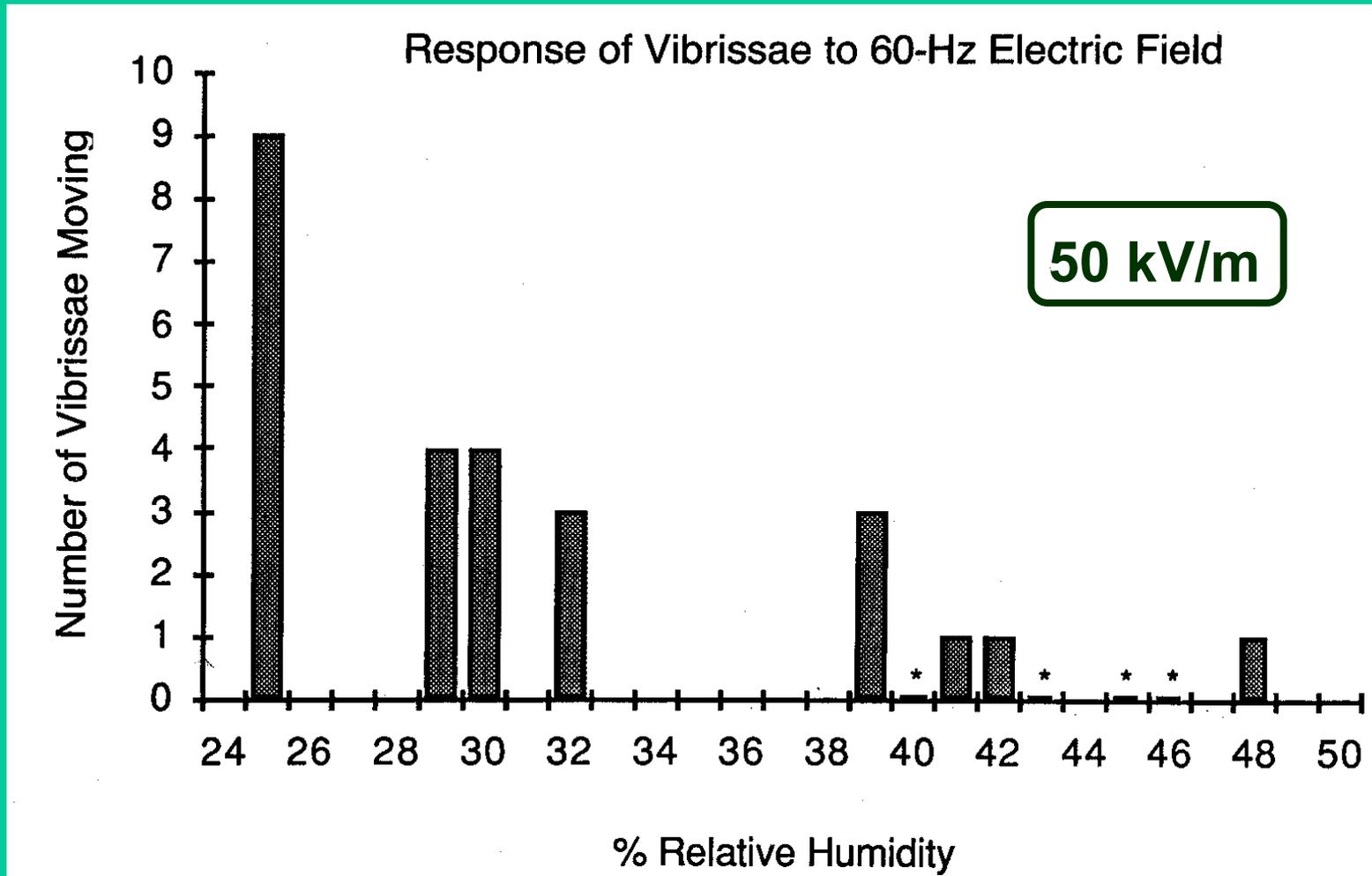
Exposition des vibrisses du rat sous 50 kV/m

(Weigel et Lundstrom, 1987)



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Peau, tact et perception du champ E



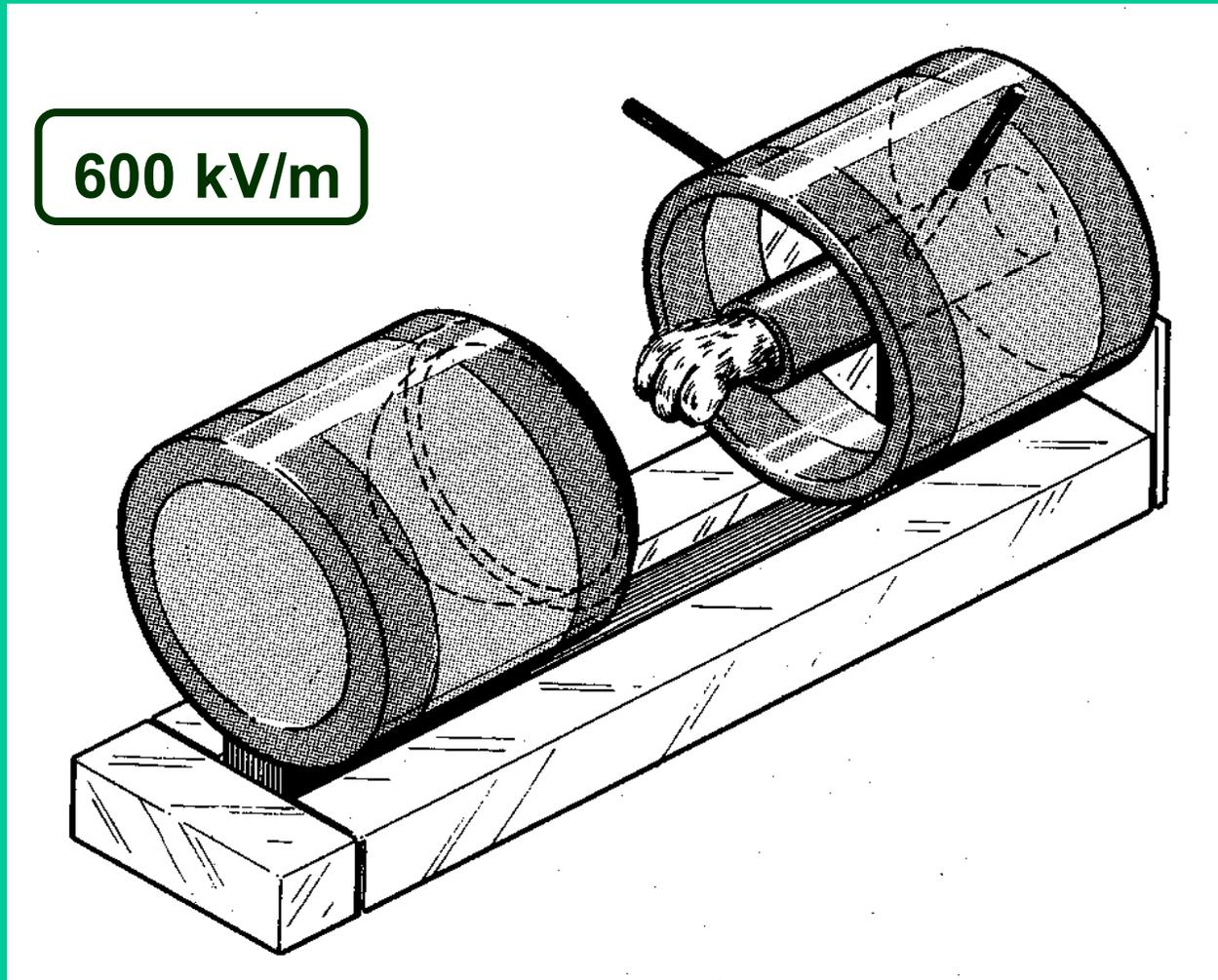
Exposition des vibrissae du rat sous 50 kV/m

(Weigel et Lundstrom, 1987)



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Peau, tact et perception du champ E

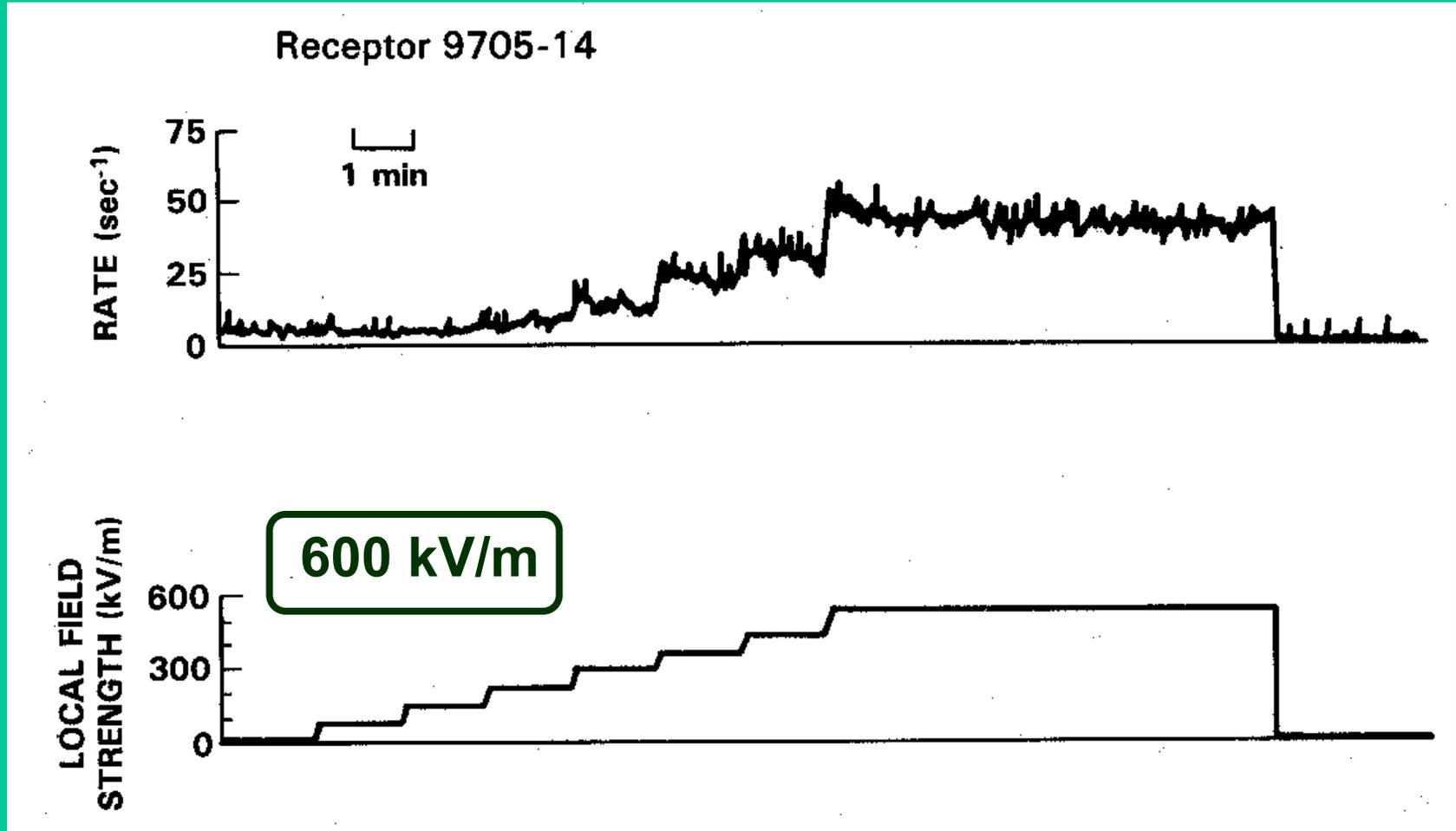


Exposition des poils du chat sous 600 kV/m
(Weigel et al. , 1987)



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

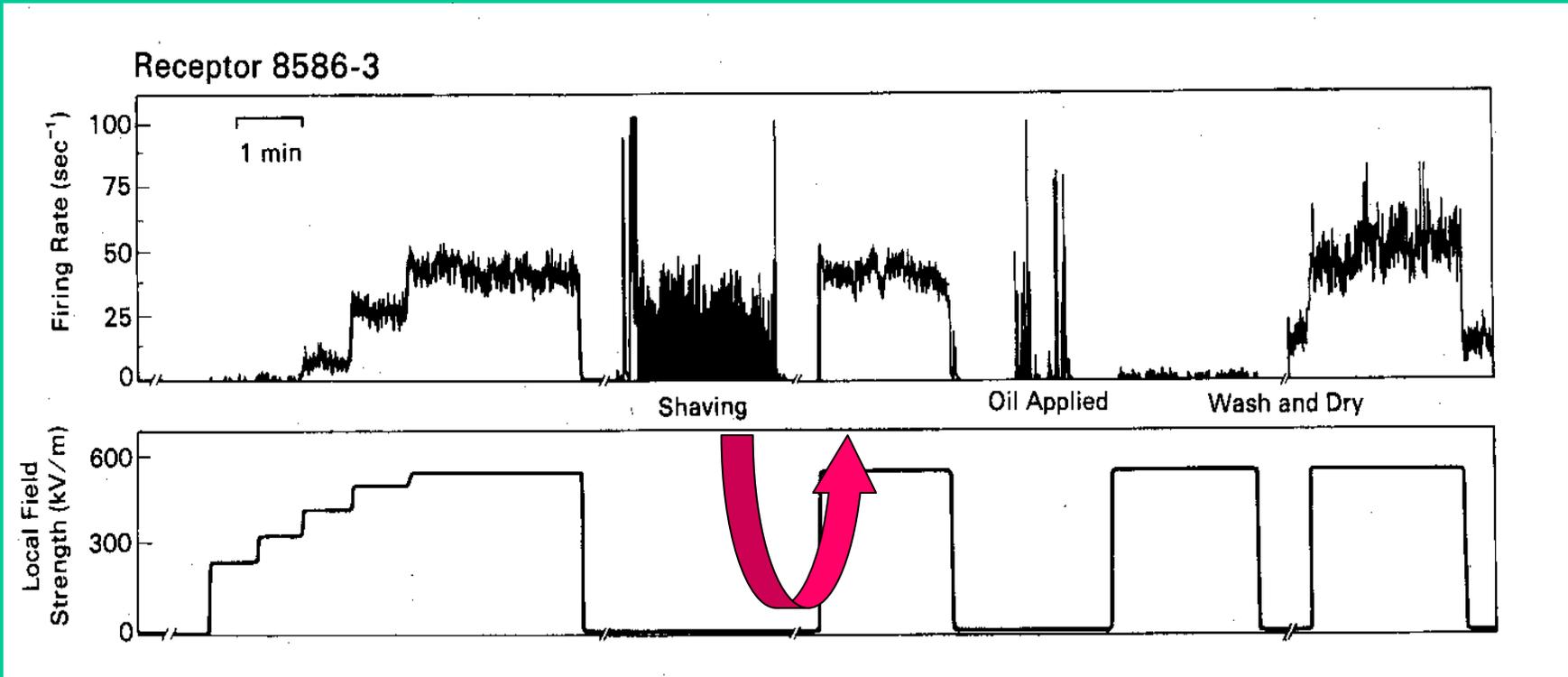
Peau, tact et perception du champ E



Exposition des poils du chat sous 600 kV/m
(Weigel et al. , 1987)



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004



Etat initial

Rasage

Peau
rasée

Huile

Lavage et séchage

Exposition des poils du chat sous 600 kV/m

(Weigel et al. , 1987)



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Interactions avec les mécanismes de transduction de l'information

L'hypothèse peut être faite que les champs E et/ ou M interagissent avec les mécanismes de transduction de l'information, par exemple en modifiant la configuration de protéines

- la conformation d'enzymes
- la forme de récepteurs membranaires
- des canaux membranaires

La cible principale serait la membrane plasmique
secondairement des membranes d'organelles intracellulaires

(les effets sur les membranes des organelles intracellulaires sont moins plausibles du fait de la résistance de la membrane plasmique)



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Interactions avec les mécanismes de transduction de l'information un exemple: le calcium

Des mouvements de calcium ont été depuis longtemps présentés
comme des mécanismes possibles de l'action des CEM

- efflux de calcium sur des explants de cerveau de poulet
- entrée de calcium les lymphocytes maintenus in vitro
- mobilité des diatomées, dépendante de $[Ca^{2+}]$ du milieu

Ces mouvements de calcium ont servi de base à des hypothèses
d'interaction non reconnues, en particulier les mécanismes dits
"de résonance".

Quel que soit le mécanisme, l'essentiel est d'observer les faits
et de les reproduire.



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Interactions avec les mécanismes de transduction de l'information un exemple: le calcium

CLARKSON N., DAVIES M.S. and DIXEY R. :

Diatom motility : the search for indépendant replication of biological effects of extremely low-frequency electromagnetic fields.

Int. J. Radiat. Biol., 1999, 75(3) : 387-392.

MADEC F. and al. :

Effects of ELF and static magnetic fields on calcium oscillations in islets of Langerhans.

Bioelectrochemistry, 2003, 60 ; 73-80.



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Interactions avec les mécanismes de transduction de l'information un exemple: le calcium

OBO M. and al. :

Effect of magnetic field exposure on calcium channel currents
using patch clamp* technique.

Bioelectromagnetics, 2002, 23 : 306-314.

(*Cellules PC-12D : ϕ de phéochromocytome de rat)



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Interactions sur les particules mobilisables

La question posée est celle

de la sensibilité aux champs M

dont le corollaire est la perception
du champ magnétique terrestre

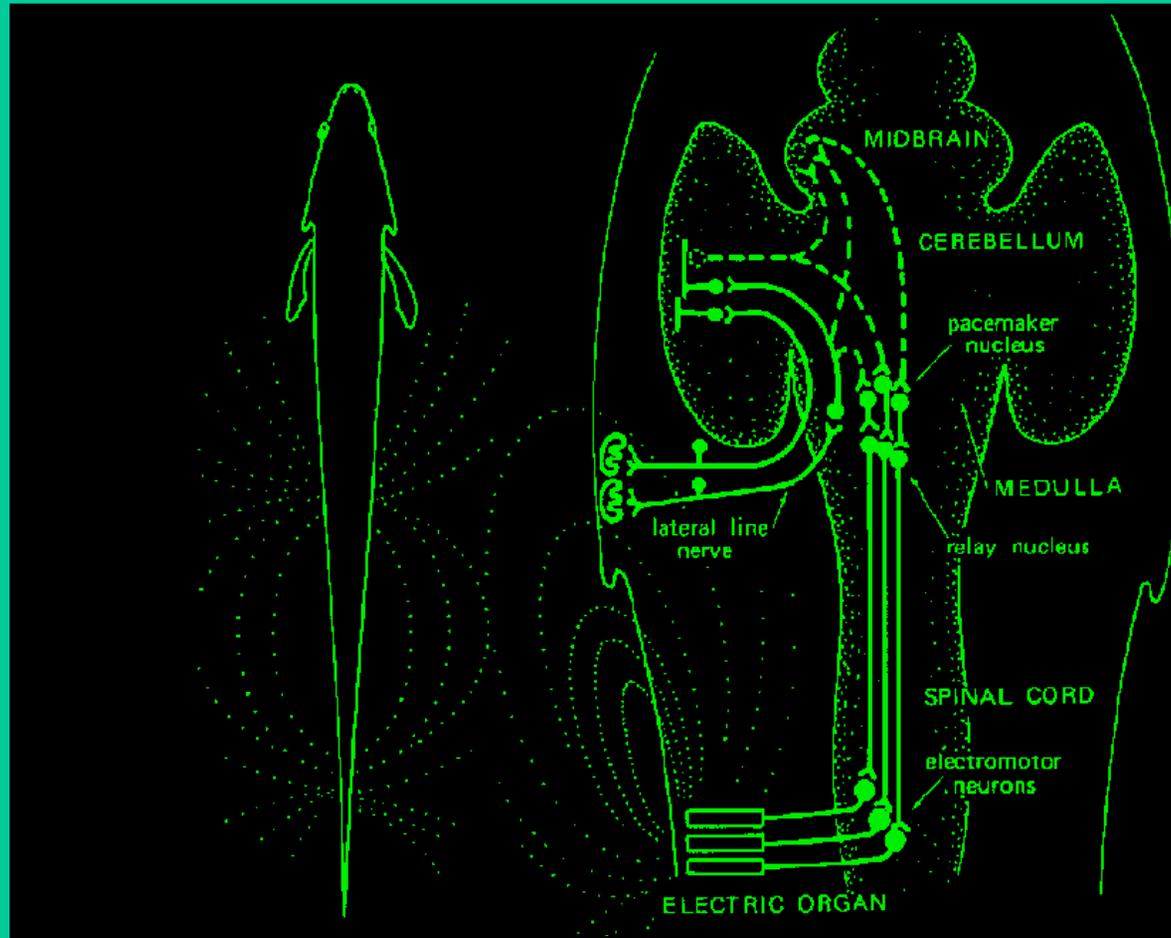
la présence d'une magnétosensibilité pourrait fournir une base
à une action des champs, y compris pour la santé

Paradoxalement la perception du champ M est établie, au mieux,
par un mécanisme **d'électrosensibilité**

Secondairement, la présence de **magnétite** dans quelques groupes
soulève la question d'une **magnétosensibilité directe**

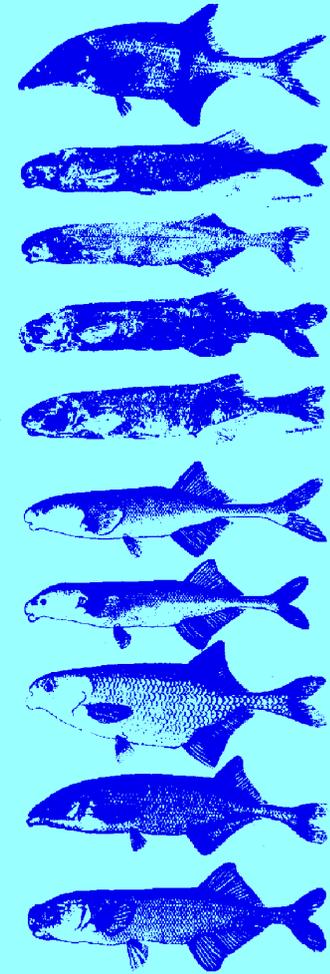
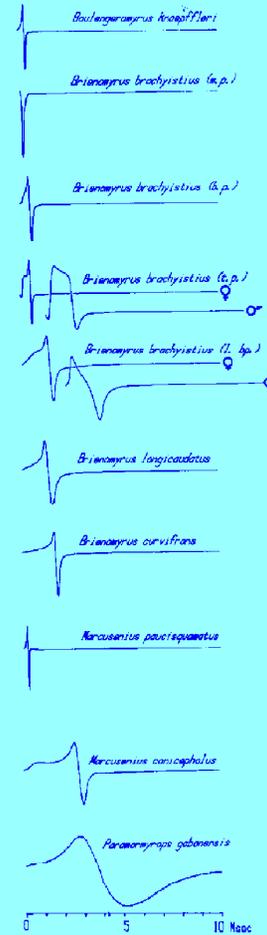
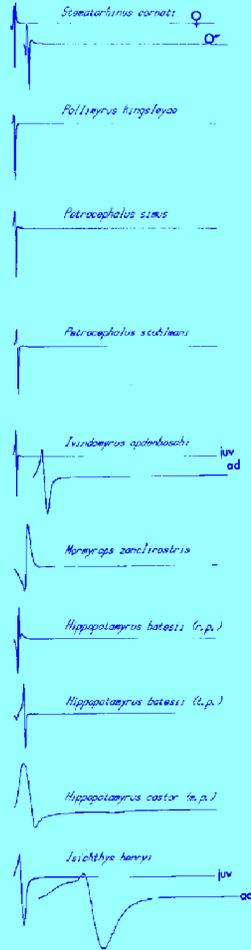
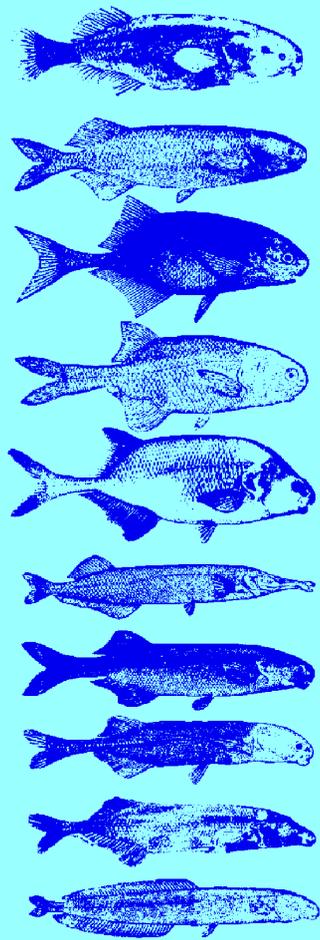


S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004



Organe électrique et électro-récepteurs
des poissons



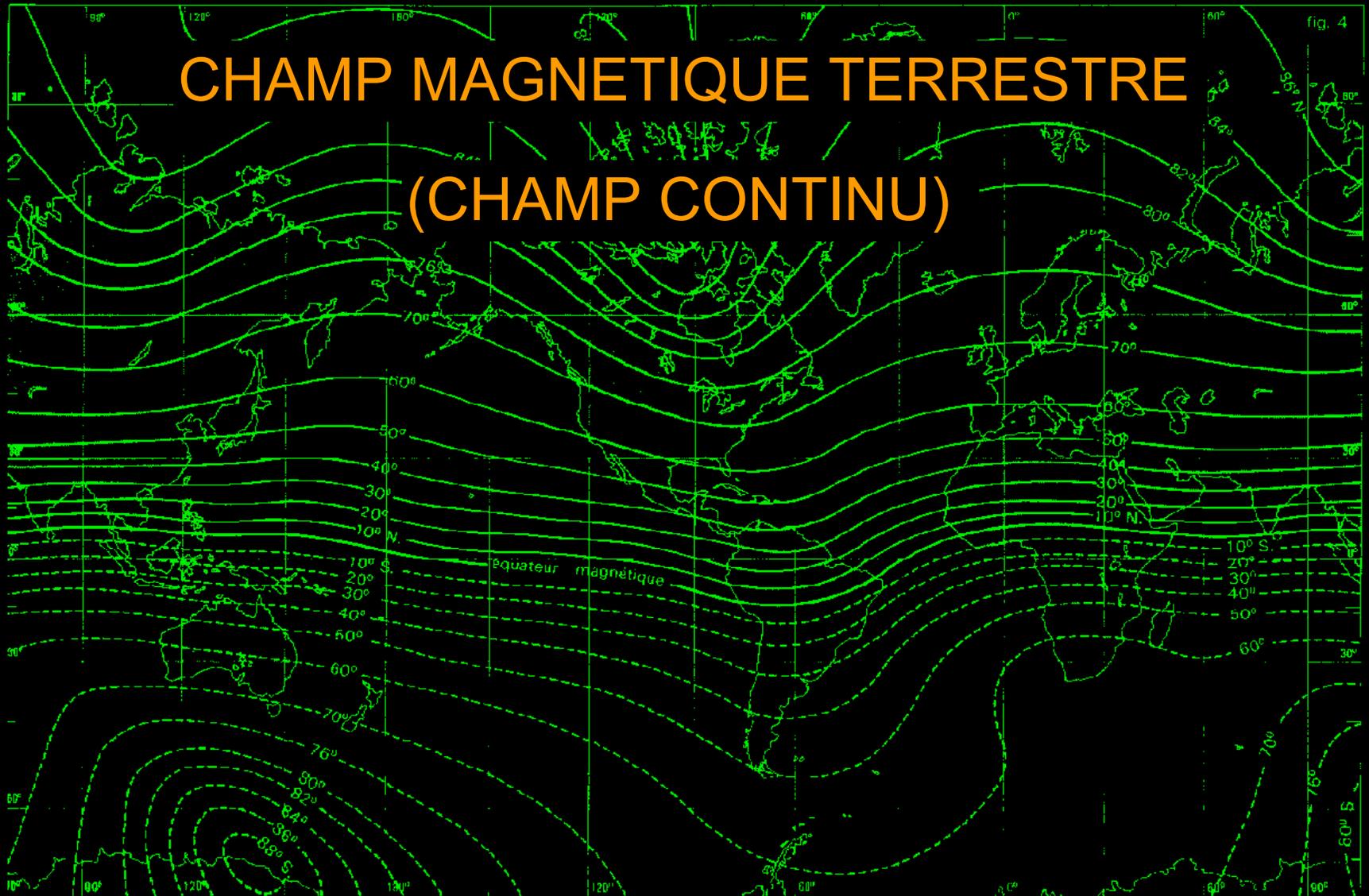


Poissons électriques de la rivière Ivindo (Gabon)

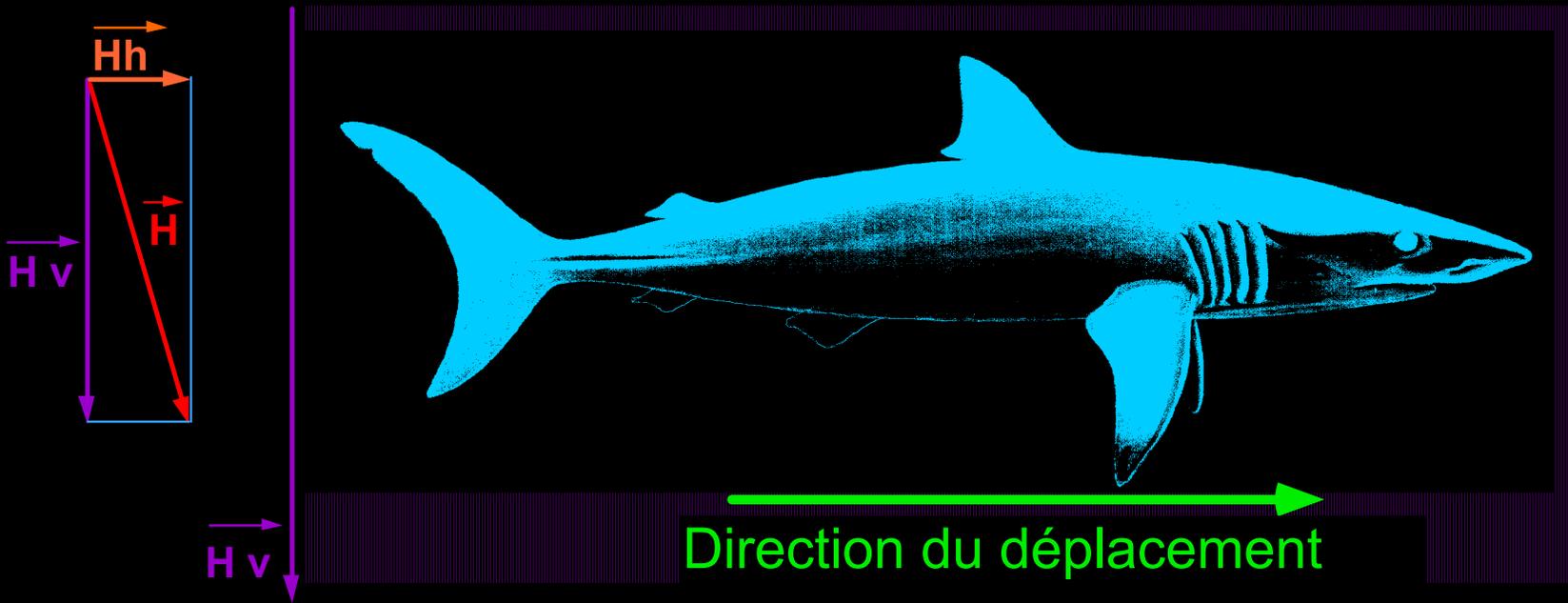


S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

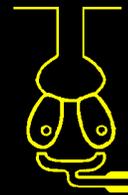
CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE (CHAMP CONTINU)



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004



H_v = Composante verticale
du champ terrestre

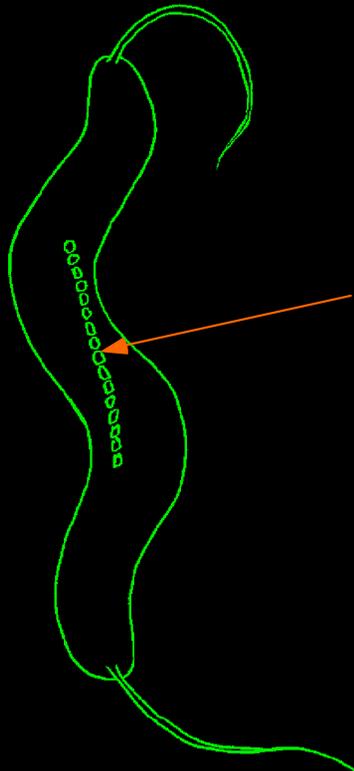


Récepteurs électriques
(Ampoules de LORENZINI)

Perception du champ magnétique terrestre
par l'intermédiaire d'électrorécepteurs



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004



**Chaine de magnétosomes
(cristaux de magnétite)**

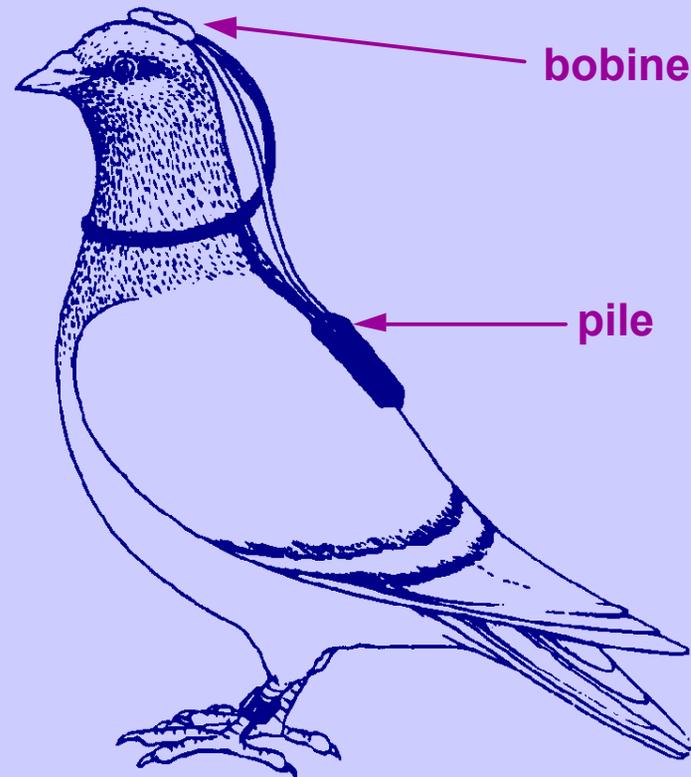
Une bactérie magnétotactique :
Aquaspirillum magnetotacticum



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Interactions sur les particules mobilisables

magnétite, magnétosensibilité



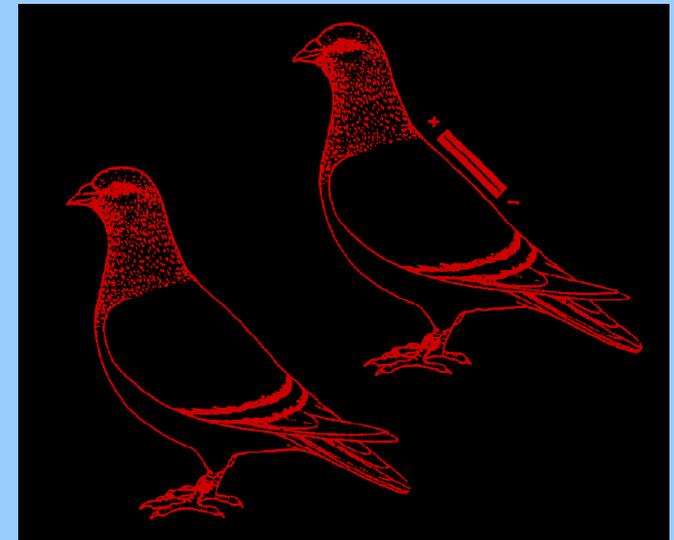
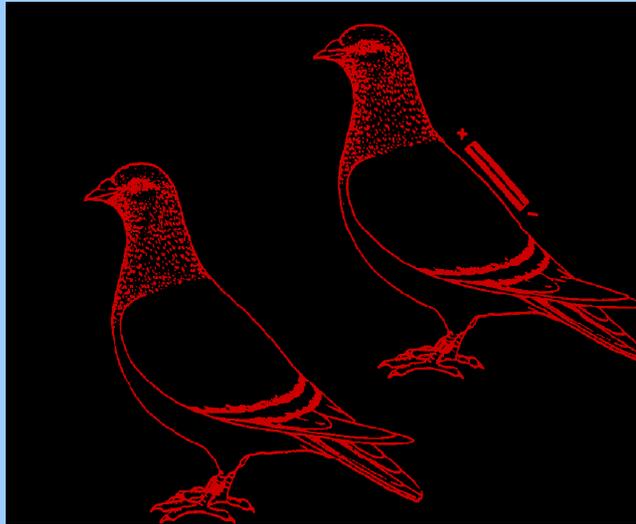
Pigeon porteur d'une bobine de Helmholtz



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Interactions sur les particules mobilisables

magnétite, magnétosensibilité



La pose d'un aimant ne modifie pas le retour au pigeonnier par temps ensoleillé, mais le perturbe par temps couvert



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Champ magnétique externe : 0,1 mT

Champ électrique interne : 4×10^{-5} V / m

	Champ électrique (V / m)	Courant induit (mA / m ²)	Champ membranaire (V / m)	Force sur 10 charges (pN)
corps	$4,8 \cdot 10^{-3}$	1,2	14,4	$2,3 \cdot 10^{-5}$
cœur	$4 \cdot 10^{-3}$	0,2	3,0	$4,8 \cdot 10^{-6}$
cellule	$2 \cdot 10^{-7}$	0,01	$6 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$
canal	$1 \cdot 10^{-10}$			

Force sur une particule de $0,2 \mu\text{m}$: 2 pN

Dépôt d'énergie : $1,3 \cdot 10^{-10}$ W / kg
(métabolisme basal # 1,0 W / kg)

Effets internes dus à des champs M de 50/60 Hz



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

Conclusion

le nombre de faits biologiques validés et dignes d'être considérés comme des "effets biologiques" des CEM dans la gamme des ELF reste très limité

on rappellera

- la perception du champ E
- l'existence des magnétophosphènes
- divers mécanismes de sensibilité aux champs électriques rencontrés chez les poissons.

une sensibilité magnétique reposant sur la mobilisation de particules de magnétite est plausible dans certains groupes (oiseaux), mais sa validation formelle souffre encore de carences importantes.



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004