

# 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**  
 $\lambda$  (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

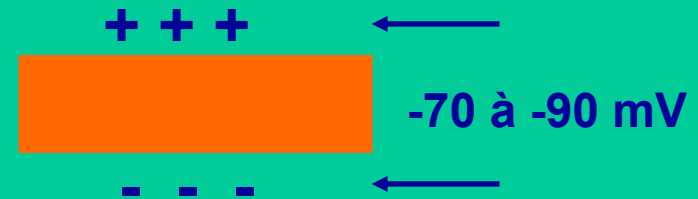
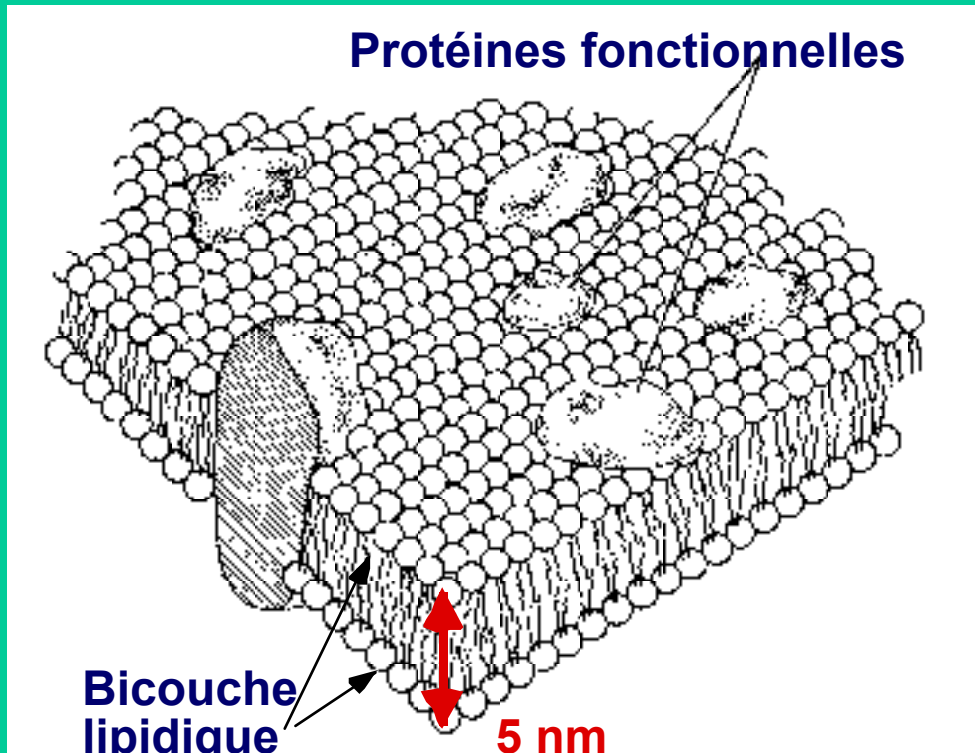
- sur les membranes cellulaires et leurs phénomènes électriques  
(mécanismes de l'excitabilité cellulaire)
- avec les mécanismes de transduction de l'information  
exemple du calcium
- sur les particules mobilisables



---

**S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004**

# Interaction sur les membranes cellulaires et leurs phénomènes électriques

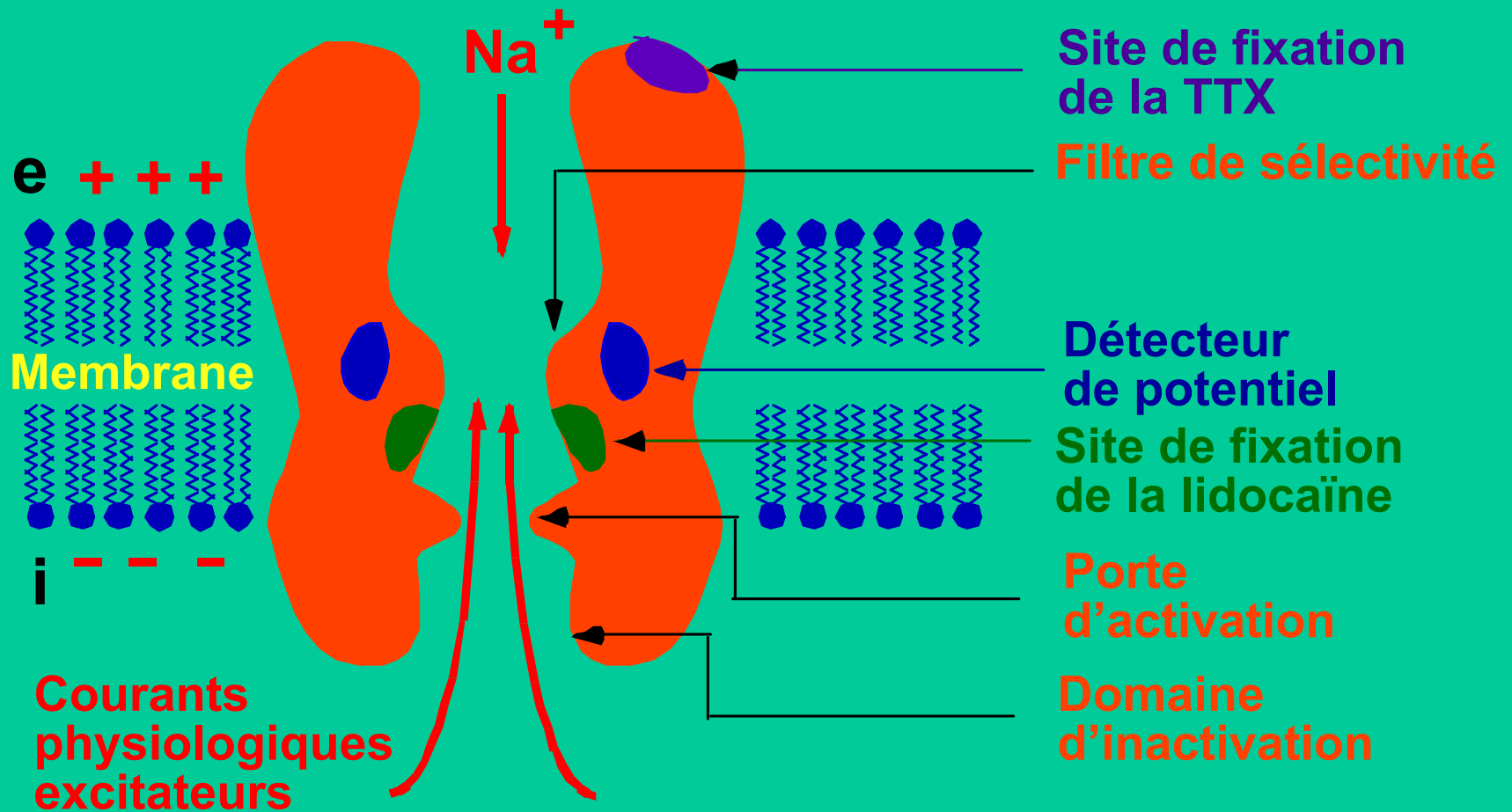


**Un champ de 10 kV/m  
produit sur la membrane  
une ddp ~ 50 000 fois plus  
faible que son pot de repos**

**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  $\mu$ 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  $\mu$ 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 ( $\text{dB/dt}$ ) de très fortes valeurs (des dizaines à des centaines de  $\text{Teslas.s}^{-1}$ )



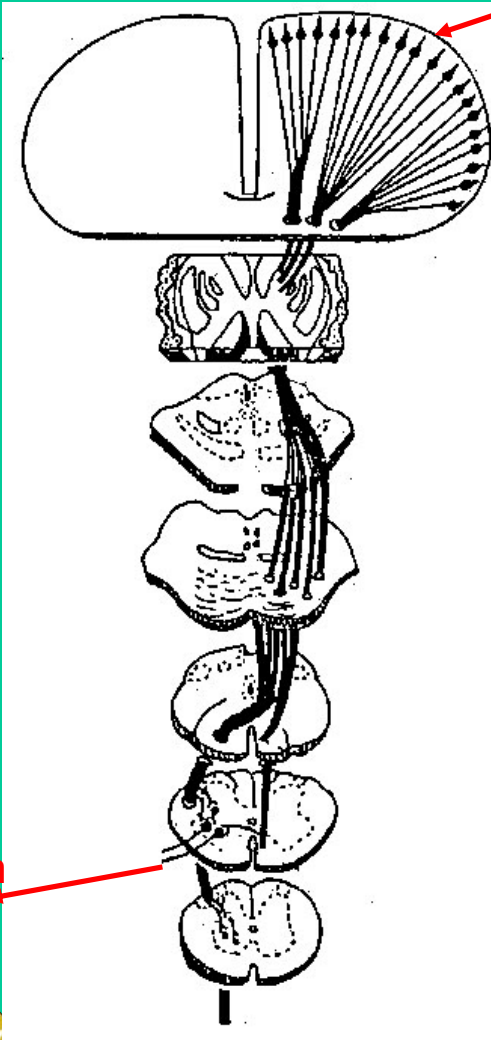
---

S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

# Neurones centraux

Hémisphère  
cérébral gauche

Stimulation

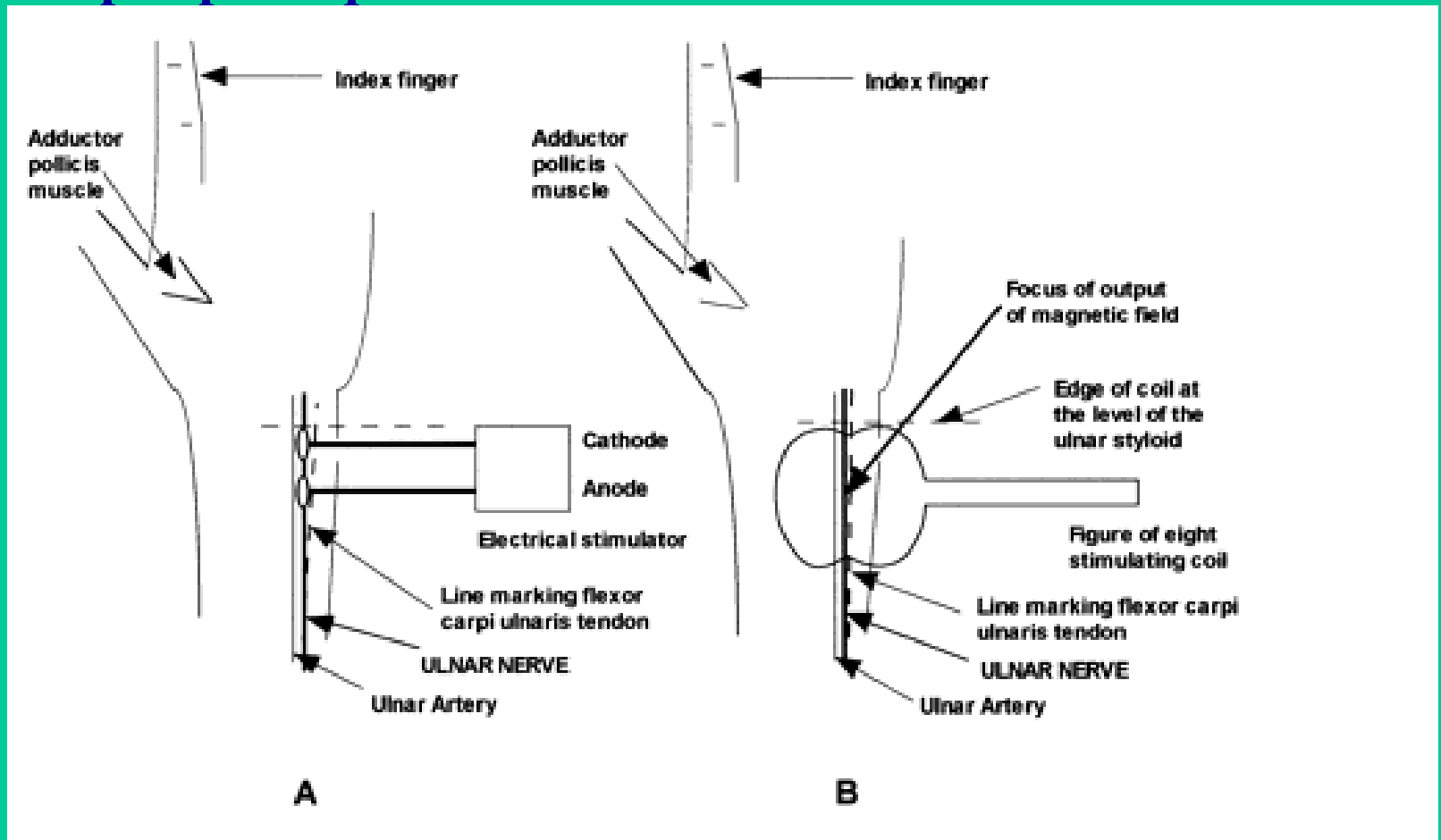


vers les  
muscles  
de la main  
droite



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

# Neurones périphériques



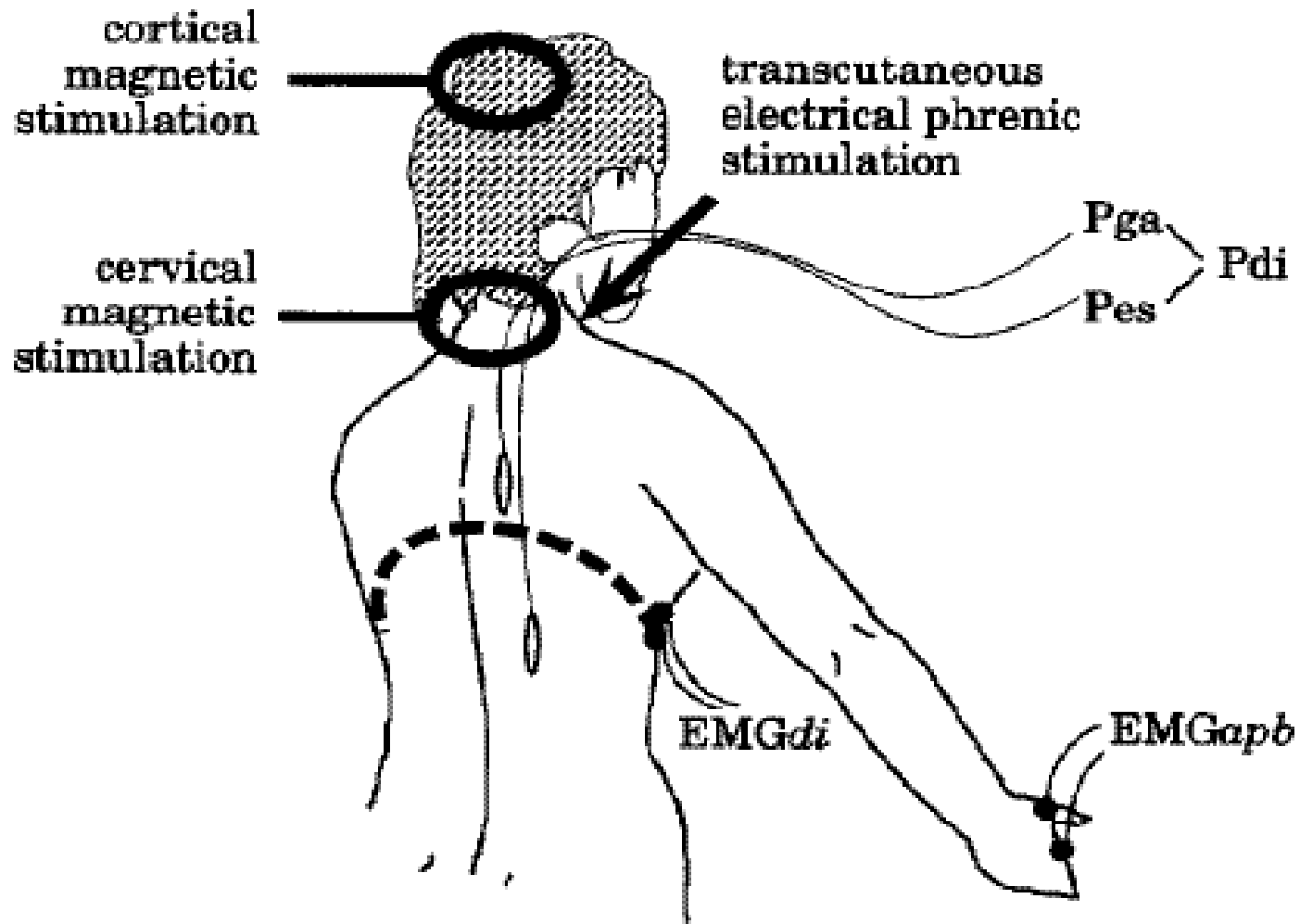
**Stimulation magnétique d'un nerf périphérique (B), comparé à la stimulation électrique**

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

**S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004**



# Neurones périphériques



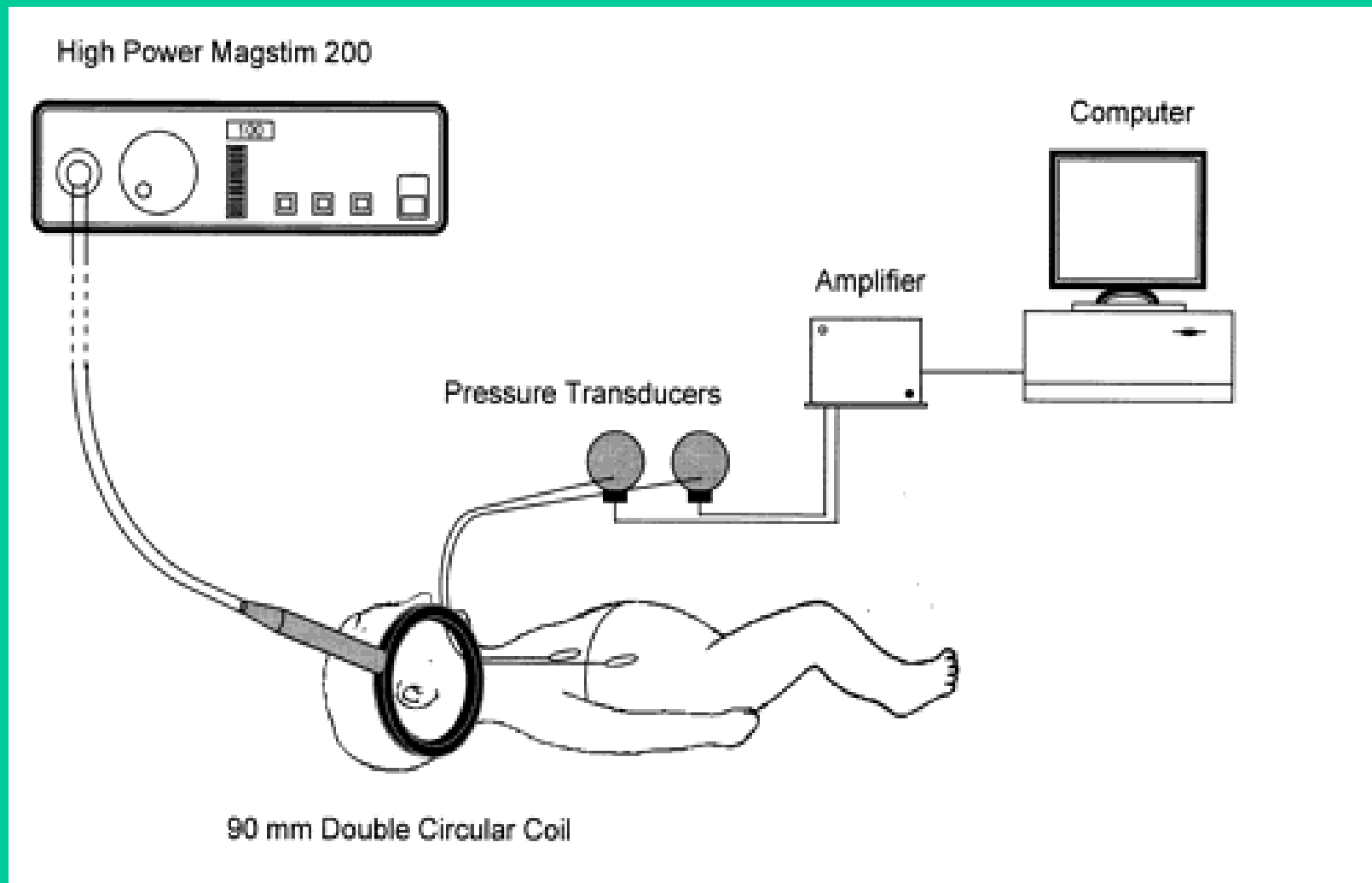
## Stimulation magnétique des nerfs phréniques

*(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**

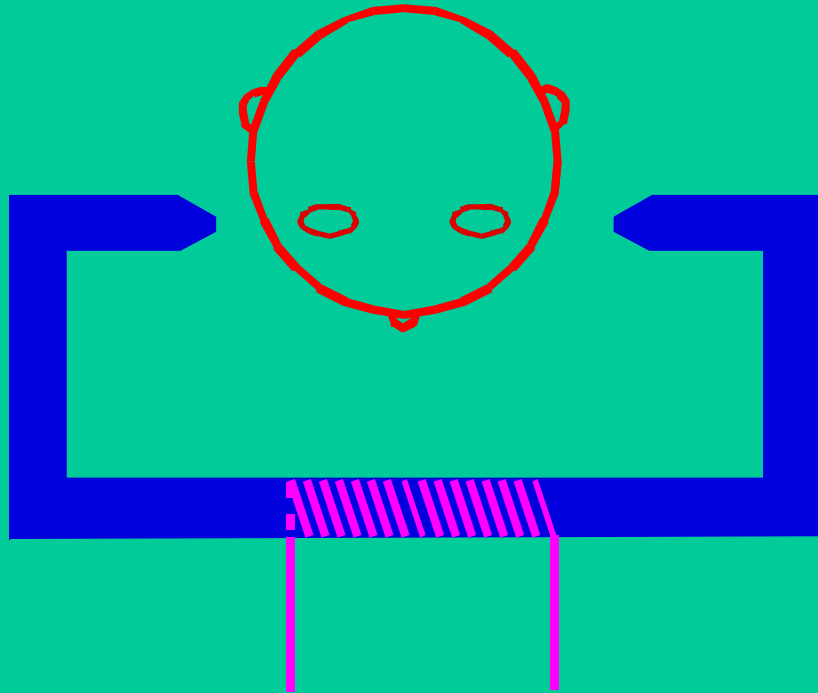


---

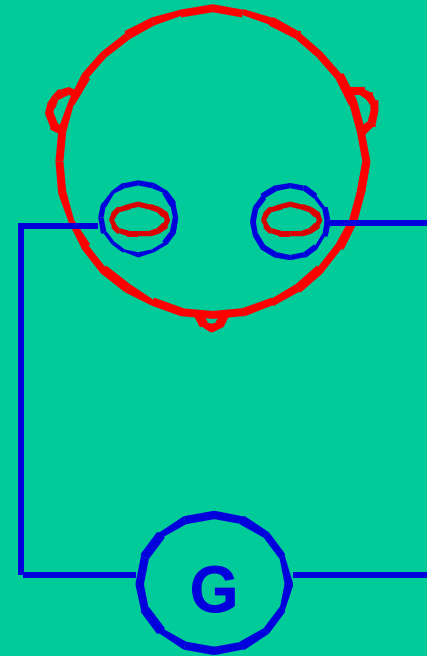
**S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004**

# Organes des sens: œil et vision

*Obtention de  
magnétosphères*



*Obtention  
d'électrophosphères*

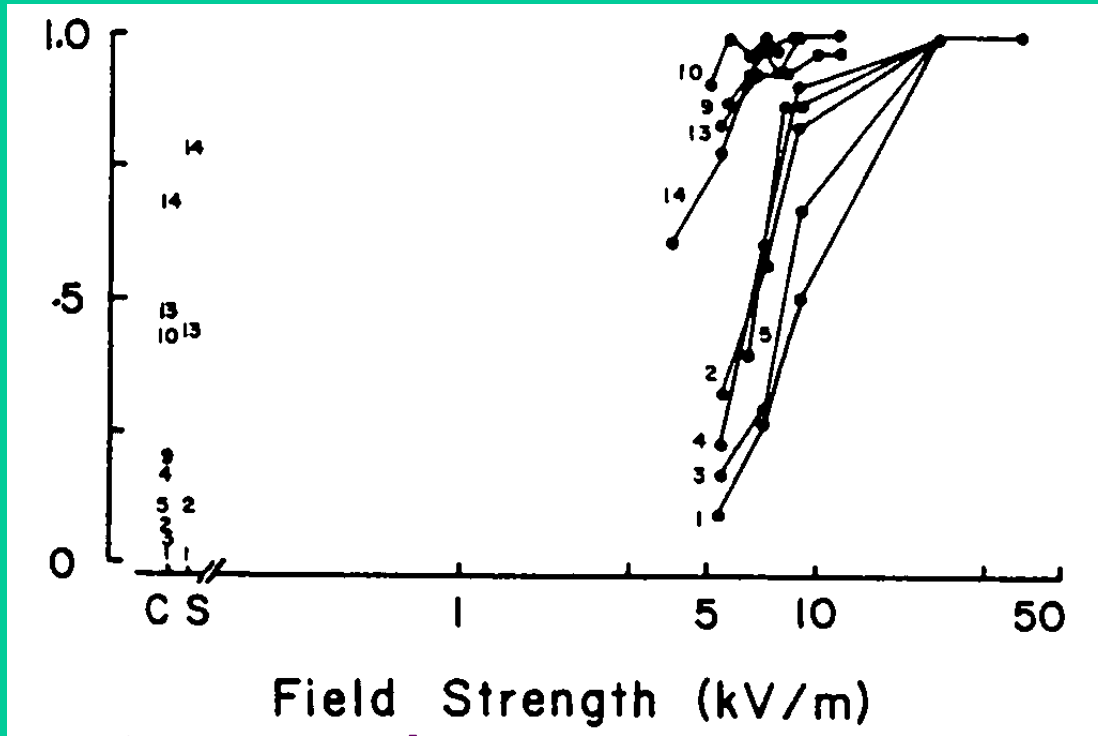


*(Taki et al, 2003)*



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

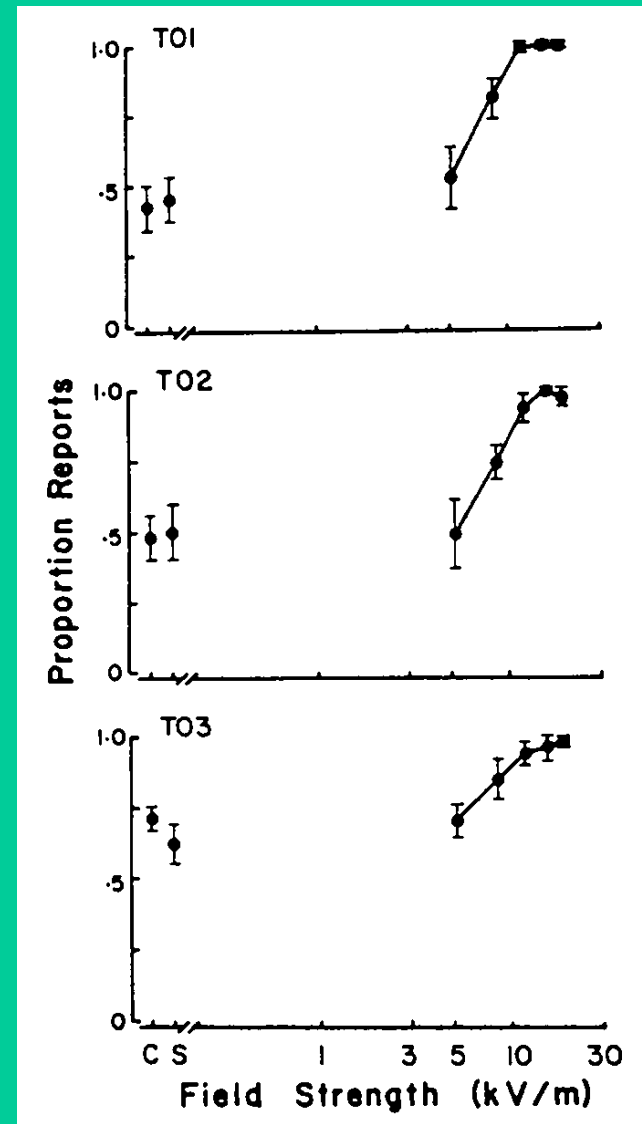
# Peau, tact et perception du champ E



Essais sur le même rat

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

(Stern S et al, 1983)

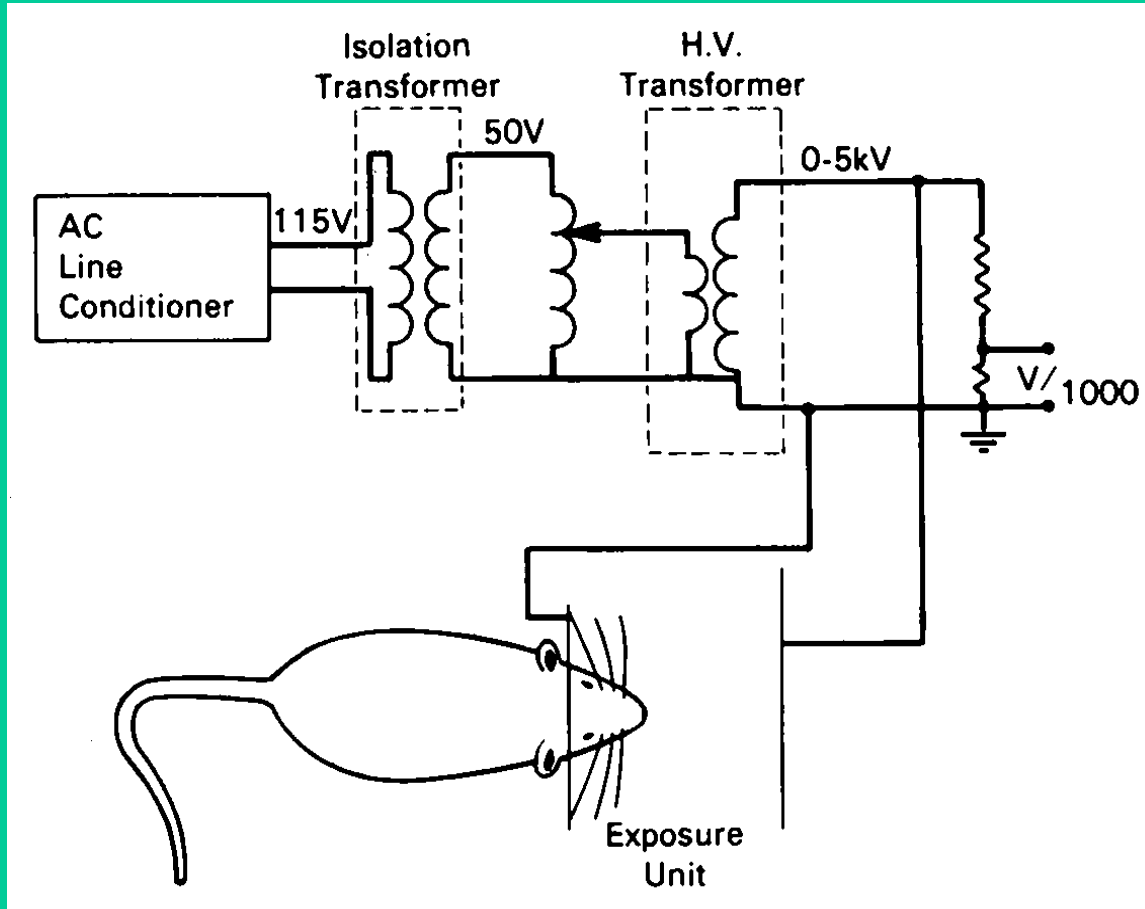


Moyennes pour 3 rats



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

# Peau, tact et perception du champ E



50 kV/m

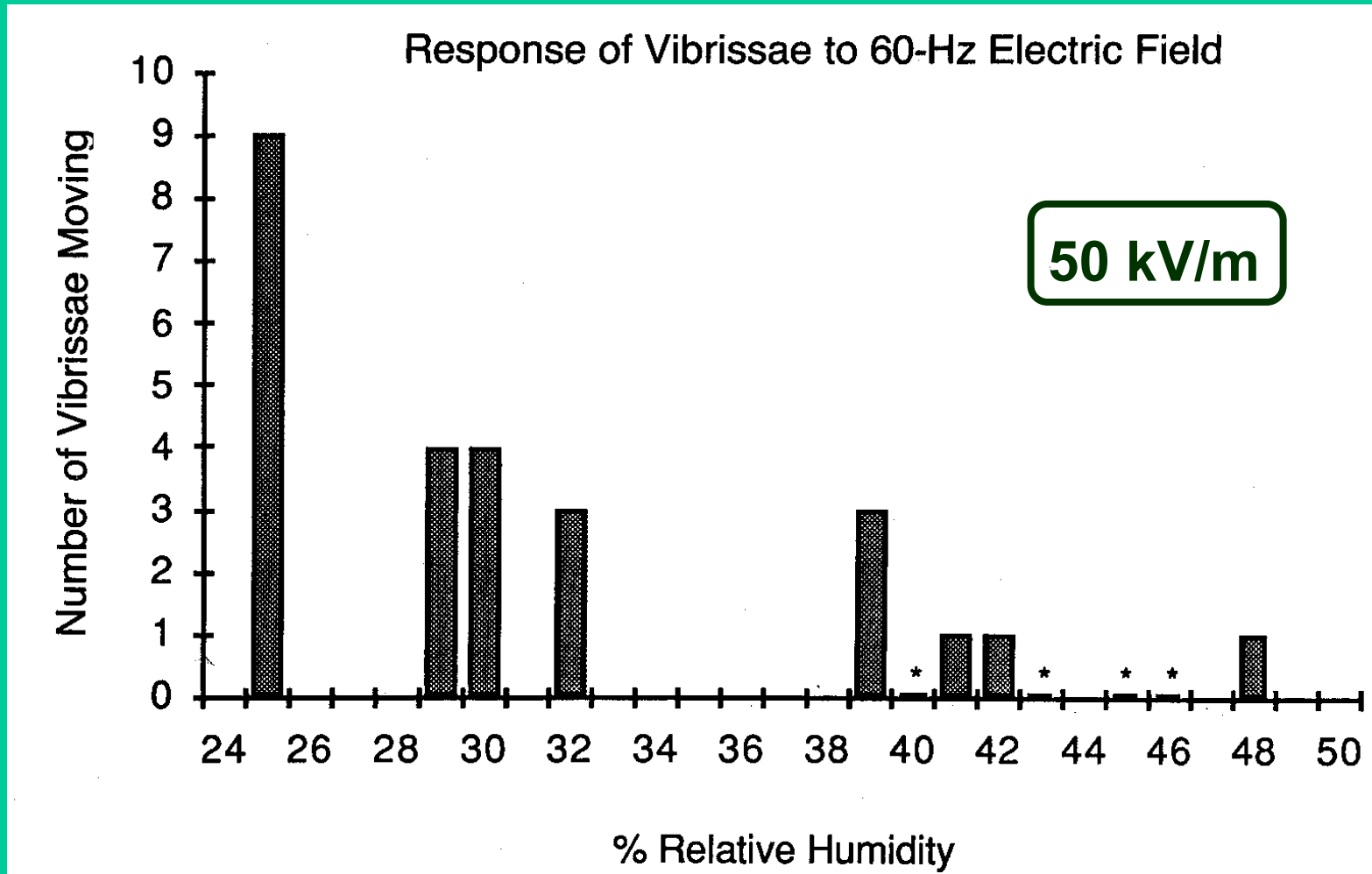
Exposition des vibrisses du rat sous 50 kV/m

*(Weigel et Lundstrom , 1987)*



S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

# Peau, tact et perception du champ E



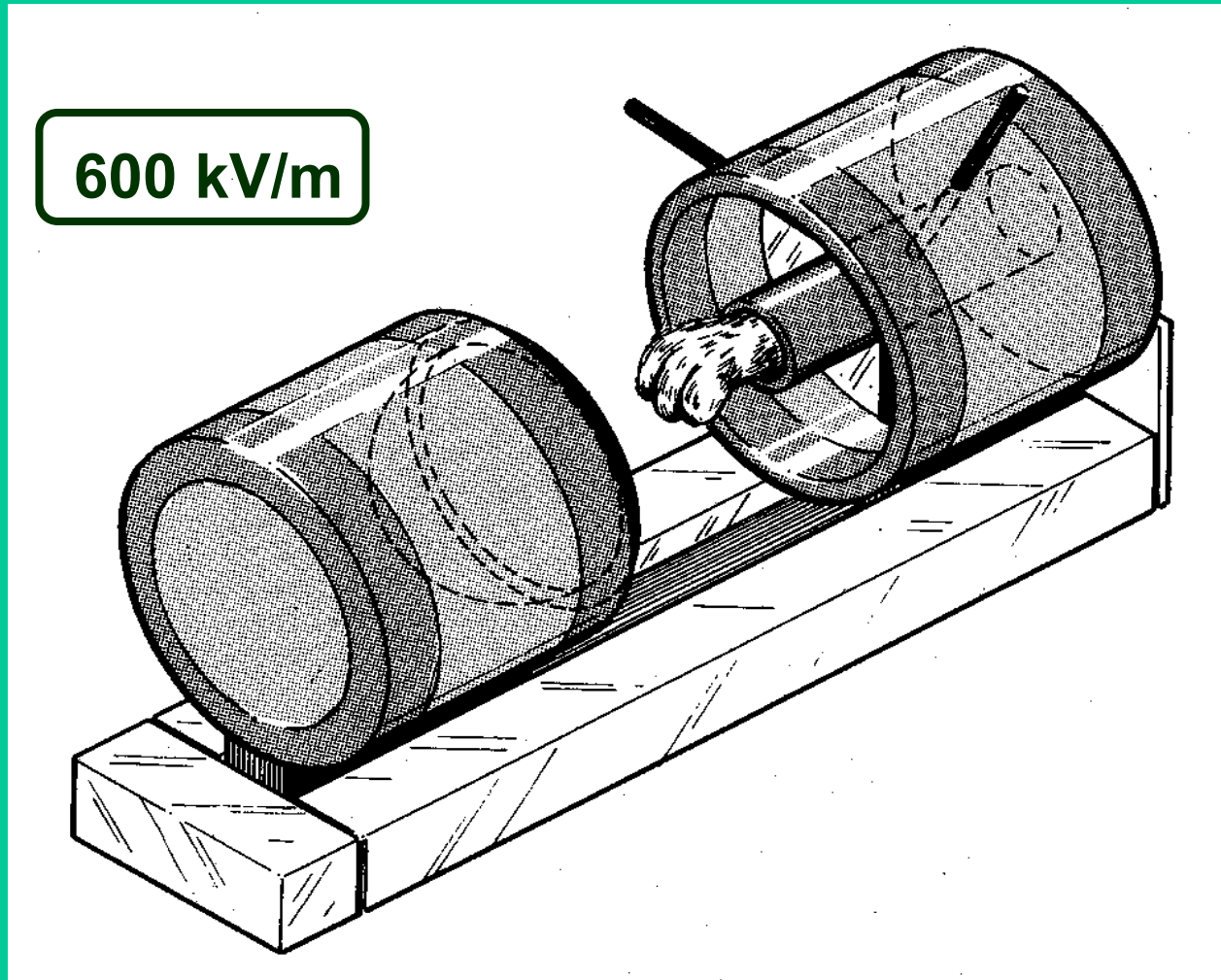
**Exposition des vibrissae du rat sous 50 kV/m**

*(Weigel et Lundstrom, 1987)*



**S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004**

# Peau, tact et perception du champ E

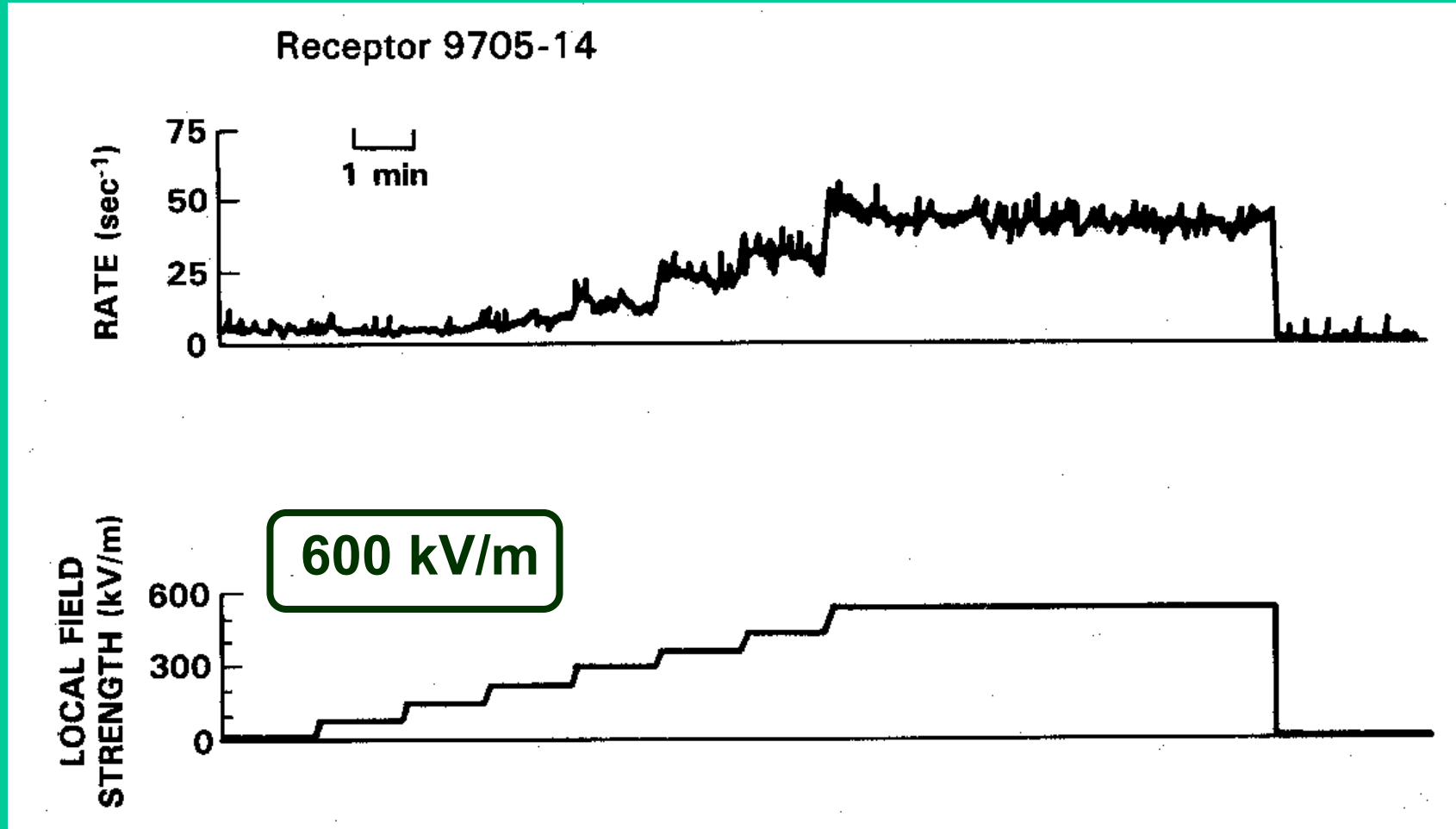


**Exposition des poils du chat sous 600 kV/m**  
*(Weigel et al. , 1987)*



**S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004**

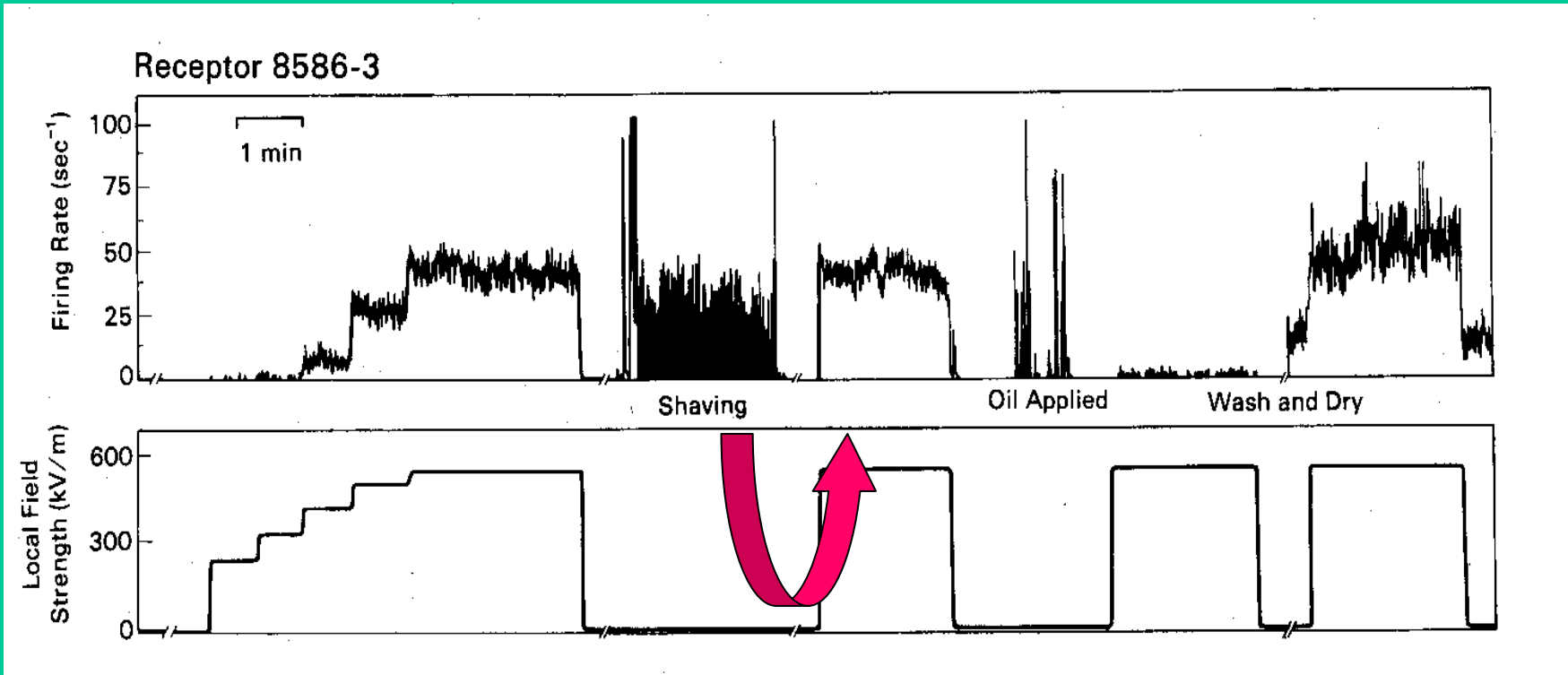
# Peau, tact et perception du champ E



**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 :  $\phi$  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

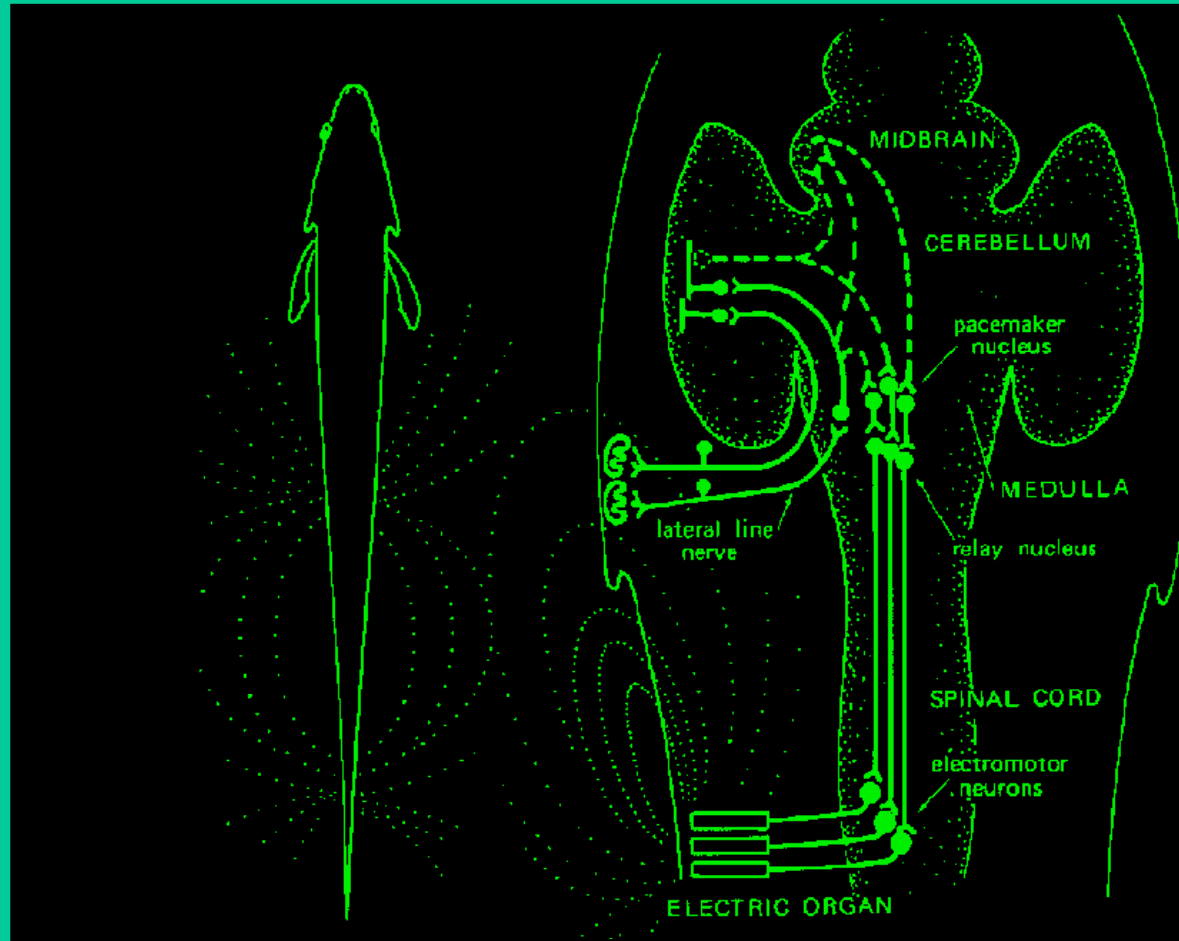
Paradoxalement la perception du champ M est établie, au mieux,  
par un mécanisme **d'électrosensibilité**

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



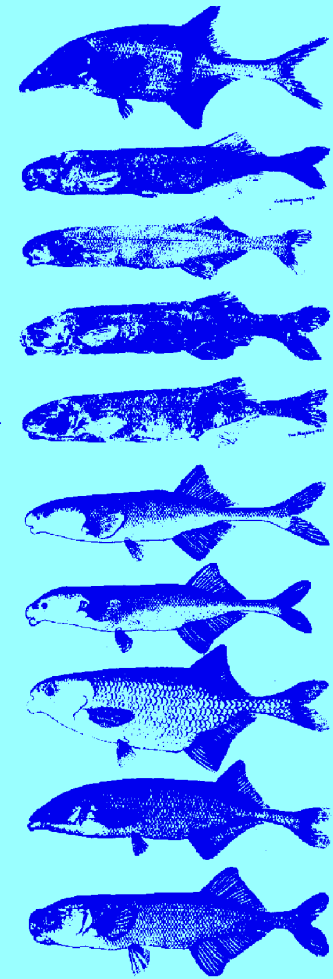
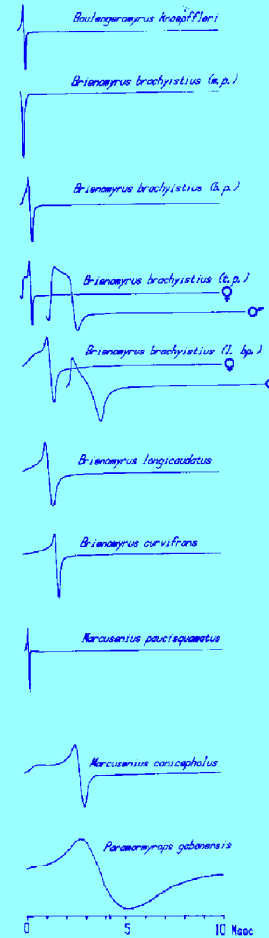
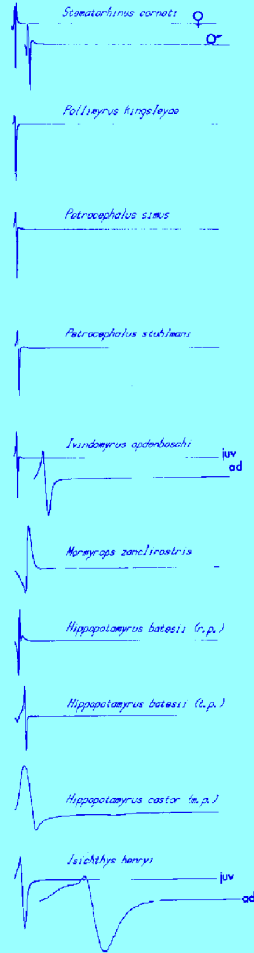
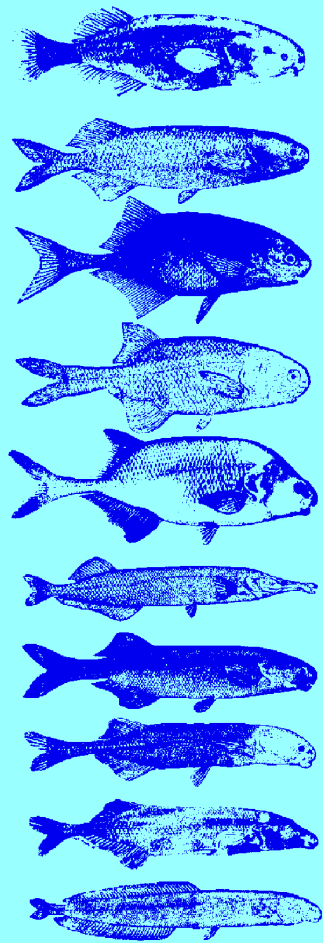
---

S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004



Organe électrique et électro-récepteurs  
des poissons



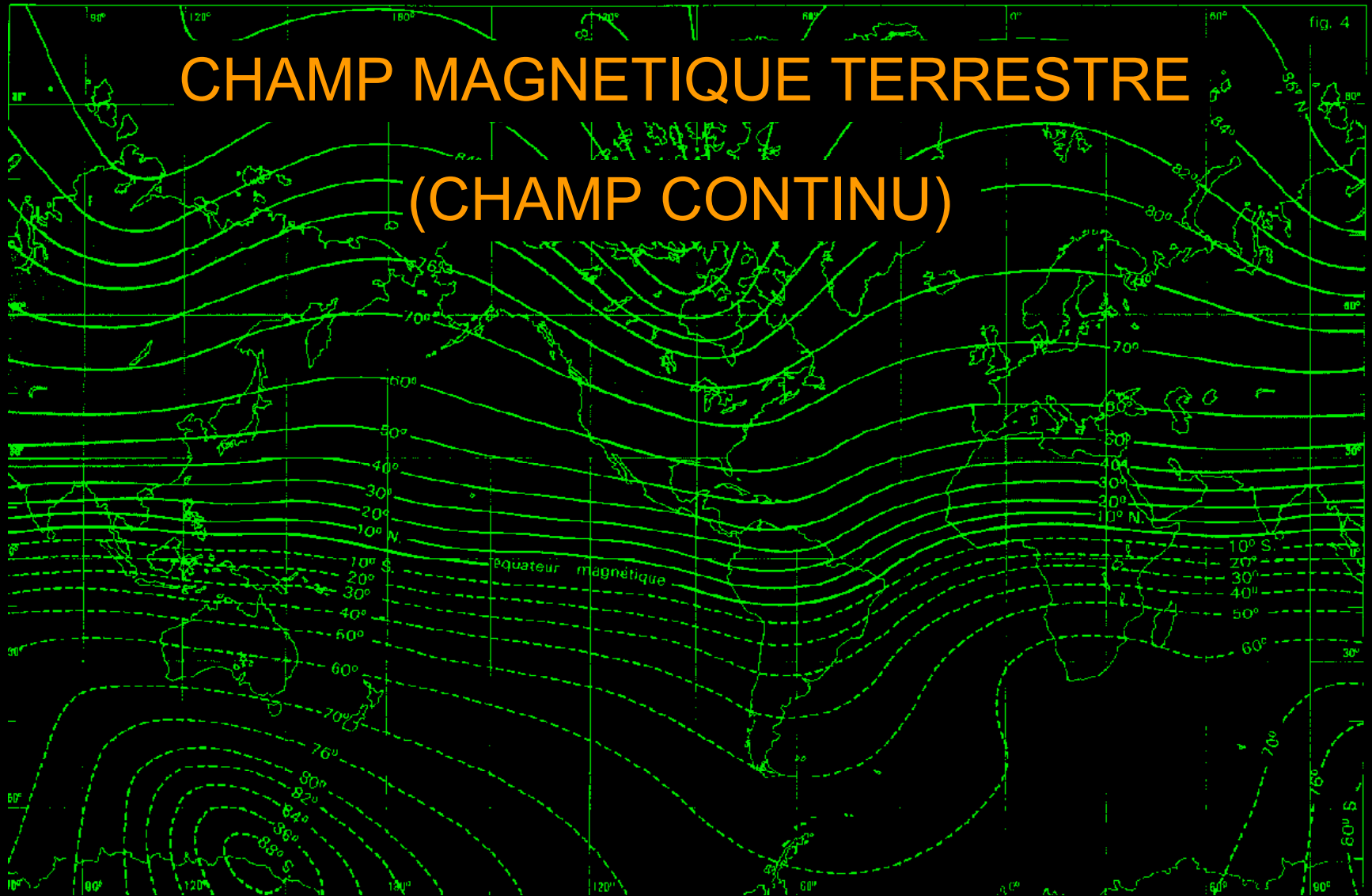


## Poissons électriques de la rivière Ivindo (Gabon)



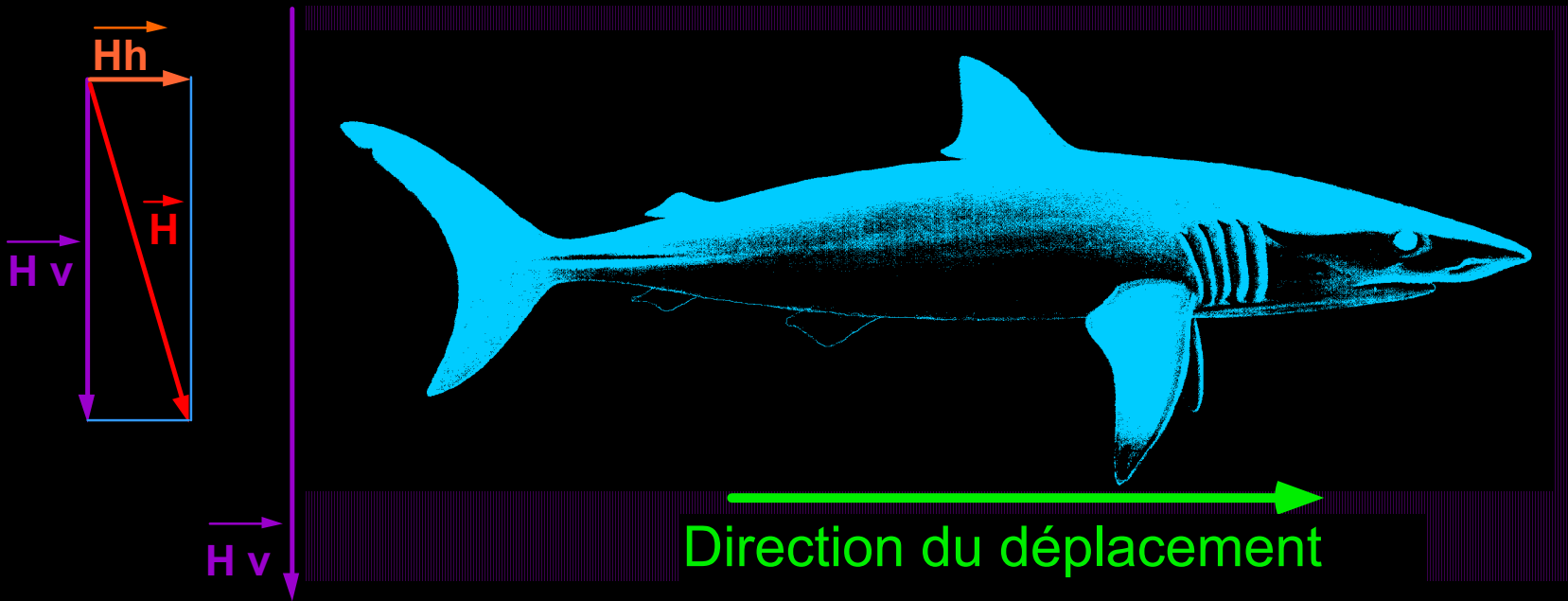
S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004

# CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE (CHAMP CONTINU)

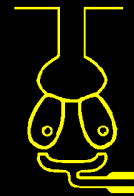


S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004





$H_v$  = Composante verticale  
du champ terrestre

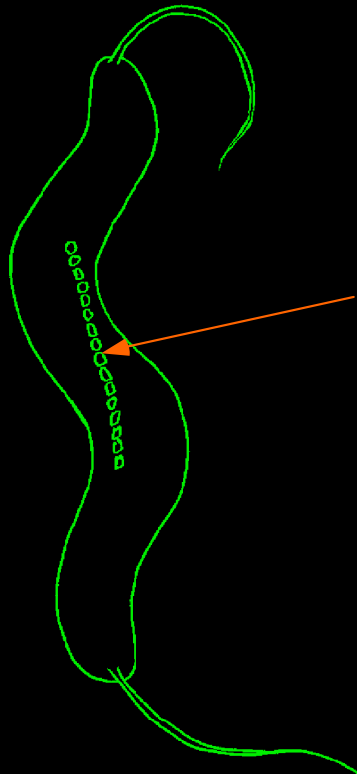


Récepteurs électriques  
(Ampoules de LORENZINI)

## 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)**

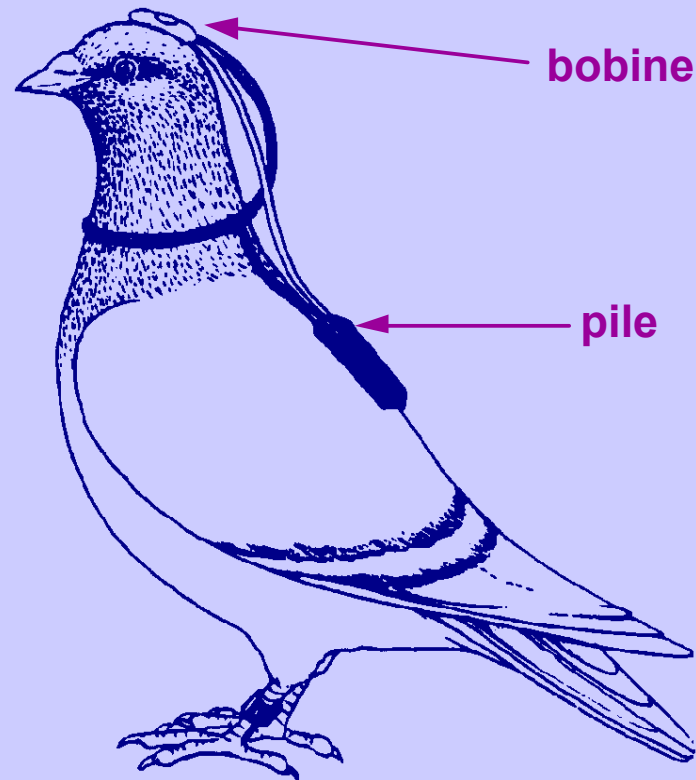
**Une bactérie magnétotactique :**  
*Aquaspirillum magnetotacticum*



**S.F.R.P. Paris, le 15 décembre 2004**

# Interactions sur les particules mobilisables

## magnétite, magnétosensibilité



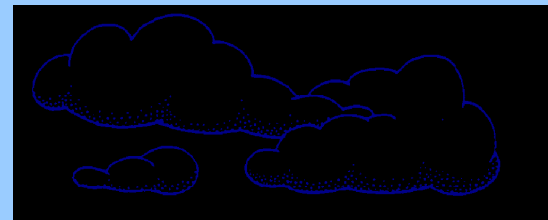
Pigeon porteur d'une bobine de Helmholtz



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 :  $4 \times 10^{-5}$  V / m

	Champ électrique (V / m)	Courant induit (mA / m <sup>2</sup> )	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