Magnétisme - Electromagnétisme

D^re^ Colette Boëx, PhD, Ingénieur biomédical
Neurologie, HUG et Faculté de médecine

Figures principalement issues de :
- "Physics for scientists and engineers, with modern physics", D.C. Giancoli, Eds Prentice Hall

Magnétisme

- Grèce, Asie mineure, région Magnesia
  des rochers s'attirent: pierre d'aimant, magnétite (Fe_3O_4)
  Thalès de Milet (Grec, 625-547 avant JC)

- Chine, observation de la directivité d'un métal chauffé puis refroidit lentement, invention de la boussole
  ~1000 avant JC ?

- Boussole utilisée pour la navigation
  XIième S

- W. Gilbert, Londres, 1600
  - « De Magnete »
    identifia le magnétisme induit, les pôles N et S,
    la Terre est elle-même magnétique

Le courant électrique produit un champ magnétique et exerce une force sur un aimant

1829 H.C. Oersted (1777-1851, Copenhague)
Premier lien établit entre électricité et magnétisme

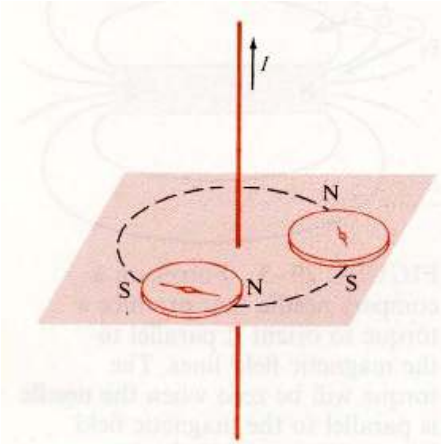


FIGURE 29–6 Deflection of a compass needle near a current-carrying wire, showing the presence and direction of the magnetic field.

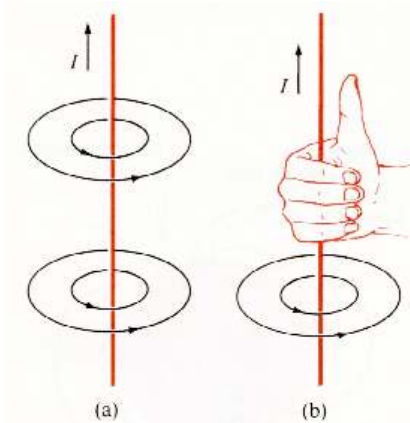
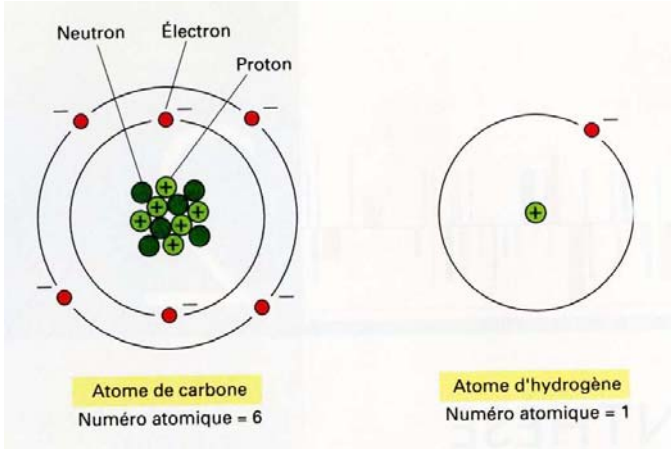


FIGURE 29–7 (a) Magnetic field lines around a straight wire. (b) Right-hand rule for remembering the direction of the magnetic field: when the thumb points in the direction of the conventional current, the fingers wrapped around the wire point in the direction of the magnetic field.

Origine électronique du magnétisme

- Les électrons par leur déplaçant sur leur orbite présentent un petit moment magnétique orbital perpendiculaire à leur orbite

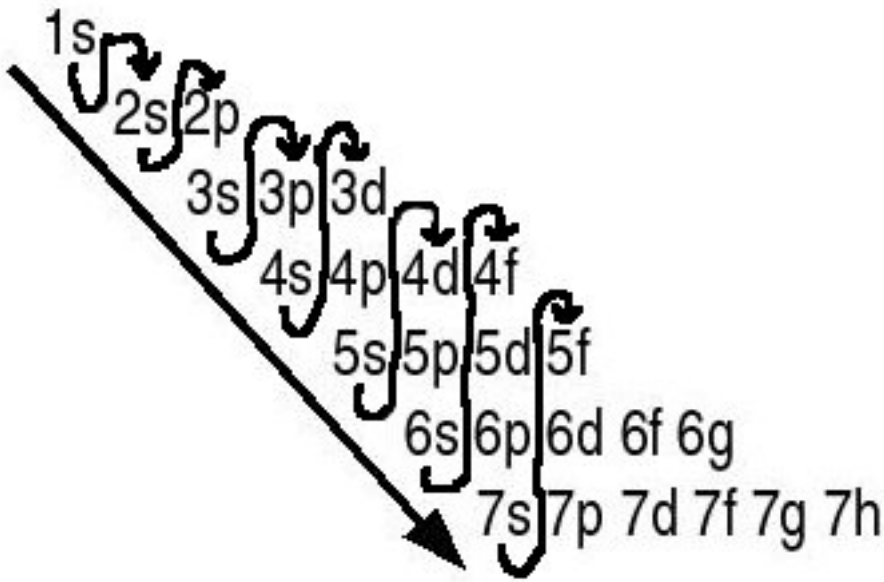


- Les électrons tournent également sur eux-mêmes et présentent un autre petit moment magnétique dit de spin
  - Spin : caractéristique intrinsèque d'une particule (en plus de la masse, de la charge électrique)
  - Classe mathématiquement la manière dont une particule se transforme lorsqu'il est en rotation
  - ~toute petite boussole orientée spécifiquement pour chaque électron

Configuration électronique des éléments

- Z : Nombre atomique = somme des « e »
- nx^e

n : numéro de la couche
x : nom de la sous-couche
s : max 2 électrons
p : max 6 électrons
d : max 10 électrons
f : max 14 électrons
g : max 18 électrons
e : nombre d'électrons dans la sous-couche



Règle de Klechkowski

- Importance de l'arrangement des électrons dans la couche externe

Periodic Table of the Elements[§]

Symbol — Cl 17 — Atomic number
Atomic mass[§] — 35.453
3p⁵ — Electron configuration

Group I	Group II	Transition elements										Group III	Group IV	Group V	Group VI	Group VII	Group 0
H 1 1.0079 $1s^1$																	He 2 4.0026 $1s^2$
Li 3 6.94 $2s^1$	Be 4 9.01218 $2s^2$											B 5 10.81 $2p^1$	C 6 12.011 $2p^2$	N 7 14.0067 $2p^3$	O 8 15.9994 $2p^4$	F 9 18.9984 $2p^5$	Ne 10 20.17 $2p^6$
Na 11 22.9898 $3s^1$	Mg 12 24.305 $3s^2$											Al 13 26.9815 $3p^1$	Si 14 28.0855 $3p^2$	P 15 30.9738 $3p^3$	S 16 32.06 $3p^4$	Cl 17 35.453 $3p^5$	Ar 18 39.948 $3p^6$
K 19 39.0983 $4s^1$	Ca 20 40.08 $4s^2$	Sc 21 44.9559 $3d^1 4s^2$	Ti 22 47.90 $3d^2 4s^2$	V 23 50.9415 $3d^3 4s^2$	Cr 24 51.996 $3d^5 4s^1$	Mn 25 54.9380 $3d^5 4s^2$	Fe 26 55.847 $3d^6 4s^2$	Co 27 58.9332 $3d^7 4s^2$	Ni 28 58.71 $3d^8 4s^2$	Cu 29 63.546 $3d^{10} 4s^1$	Zn 30 65.38 $3d^{10} 4s^2$	Ga 31 69.735 $4p^1$	Ge 32 72.59 $4p^2$	As 33 74.9216 $4p^3$	Se 34 78.96 $4p^4$	Br 35 79.904 $4p^5$	Kr 36 83.80 $4p^6$
Rb 37 85.467 $5s^1$	Sr 38 87.62 $5s^2$	Y 39 88.9059 $4d^1 5s^2$	Zr 40 91.22 $4d^2 5s^2$	Nb 41 92.9064 $4d^4 5s^1$	Mo 42 95.94 $4d^5 5s^1$	Tc 43 98.9062 $4d^5 5s^2$	Ru 44 101.07 $4d^7 5s^1$	Rh 45 102.906 $4d^8 5s^1$	Pd 46 106.4 $4d^{10} 5s^0$	Ag 47 107.868 $4d^{10} 5s^1$	Cd 48 112.41 $4d^{10} 5s^2$	In 49 114.82 $5p^1$	Sn 50 118.69 $5p^2$	Sb 51 121.75 $5p^3$	Te 52 127.60 $5p^4$	I 53 126.90 $5p^5$	Xe 54 131.30 $5p^6$
Cs 55 132.905 $6s^1$	Ba 56 137.33 $6s^2$	57–71†	Hf 72 178.49 $5d^2 6s^2$	Ta 73 180.947 $5d^3 6s^2$	W 74 183.85 $5d^4 6s^2$	Re 75 186.207 $5d^5 6s^2$	Os 76 190.2 $5d^6 6s^2$	Ir 77 192.22 $5d^7 6s^2$	Pt 78 195.09 $5d^9 6s^1$	Au 79 196.966 $5d^{10} 6s^1$	Hg 80 200.59 $5d^{10} 6s^2$	Tl 81 204.37 $6p^1$	Pb 82 207.2 $6p^2$	Bi 83 208.980 $6p^3$	Po 84 (209) $6p^4$	At 85 (210) $6p^5$	Rn 86 (222) $6p^6$
Fr 87 (223) $7s^1$	Ra 88 226.025 $7s^2$	89–103‡	Rf 104 (261) $6d^2 7s^2$	Ha 105 (260) $6d^3 7s^2$	106 (263)	107 (262)	108 (265)	109 (266)									

† Lanthanide series

La 57 139.906 $5d^1 6s^2$	Ce 58 140.12 $5d^1 4f^1 6s^2$	Pr 59 140.908 $4f^3 6s^2$	Nd 60 144.24 $4f^4 6s^2$	Pm 61 (145) $4f^5 6s^2$	Sm 62 150.4 $4f^6 6s^2$	Eu 63 151.96 $4f^7 6s^2$	Gd 64 157.25 $5d^1 4f^7 6s^2$	Tb 65 158.925 $5d^1 4f^8 6s^2$	Dy 66 162.50 $4f^{10} 6s^2$	Ho 67 164.930 $4f^{11} 6s^2$	Er 68 167.26 $4f^{12} 6s^2$	Tm 69 168.934 $4f^{13} 6s^2$	Yb 70 173.04 $4f^{14} 6s^2$	Lu 71 174.967 $5d^1 4f^{14} 6s^2$

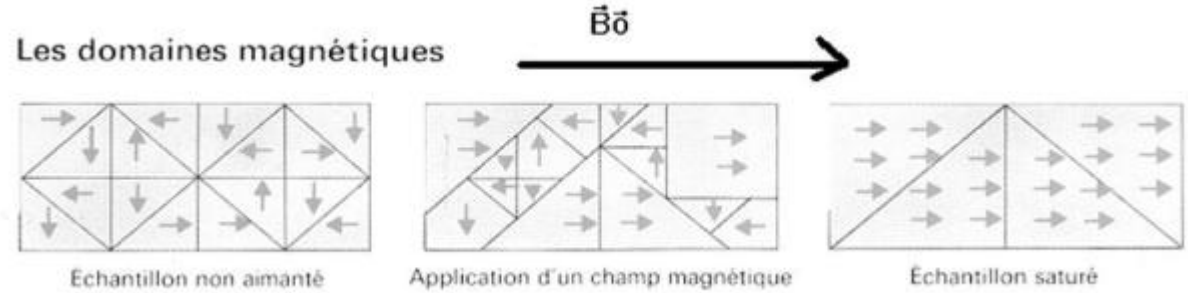
‡ Actinide series

Ac 89 (227) $6d^1 7s^2$	Th 90 232.038 $6d^2 7s^2$	Pa 91 231.036 $5f^2 6d^1 7s^2$	U 92 238.029 $5f^3 6d^1 7s^2$	Np 93 237.048 $5f^5 6d^0 7s^2$	Pu 94 (244) $5f^6 6d^0 7s^2$	Am 95 (243) $5f^7 6d^0 7s^2$	Cm 96 (247) $5f^7 6d^1 7s^2$	Bk 97 (247) $5f^8 6d^1 7s^2$	Cf 98 (251) $5f^{10} 6d^0 7s^2$	Es 99 (253) $5f^{11} 6d^0 7s^2$	Fm 100 (257) $5f^{12} 6d^0 7s^2$	Md 101 (258) $5f^{13} 6d^0 7s^2$	No 102 (259) $6d^0 7s^2$	Lr 103 (260) $7s^2 7p^1$

§ Atomic mass values averaged over isotopes in percentages they occur on earth's surface. For many unstable elements, mass number of the most stable known isotope is given in parentheses.

Domaines dans les matériaux ferromagnétiques

- Un matériau ferromagnétique est fait de petites régions ~ 1mm^3, chaque domaine (de Weiss) se comporte comme un petit aimant
  - Fer non magnétisé : ces petits domaines s'orientent aléatoirement : effet magnétique nul
  - Fer magnétisé : ces petits domaines s'orientent préférentiellement dans une direction
- Cause l'attraction métaux magnétiques par les aimants



http://castel52.free.fr/ **© Vincent Argenton - David Charbit - Xavier Magnien - PSTE 2005-2006**

- Un matériau ferromagnétique se dilate moins que les autres matériaux

Matériaux ferromagnétiques

- Matériaux magnétiques doux
  - Ex. Fer, ferrites, acier de fer, nickel, …
  - Matériaux capables de conserver une aimantation importante même après la suppression du champ magnétique extérieur

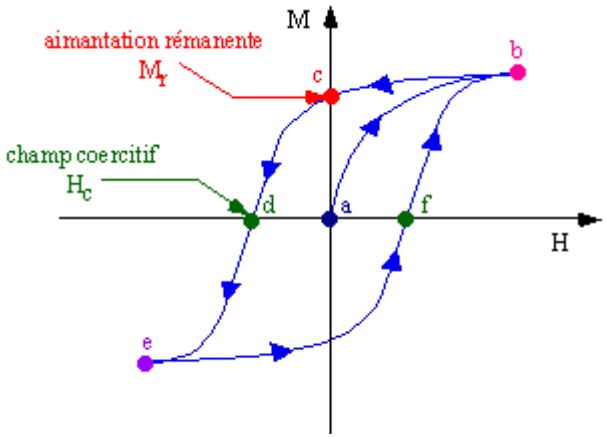
  Mais
  - Cette aimantation disparaît facilement soit par l’application d’un champ magnétique inverse, soit par augmentation de la température (température de Curie, ex. Fer : 770°C)

Aimants permanents

- Matériau magnétique dur
  - Capteurs
  - Gadgets
  - Alliages Fe-Co-Ni – Terres rares

Matériaux ferromagnétiques

- Matériaux magnétiques durs
  - Magnétite, aciers particuliers
  - Nécessite un très fort champ magnétique pour atteindre la saturation magnétique
  - Aimantation ~permanente
  - Hystérésis : un aimant peut être fait à partir d'un matériau ferromagnétique non aimanté



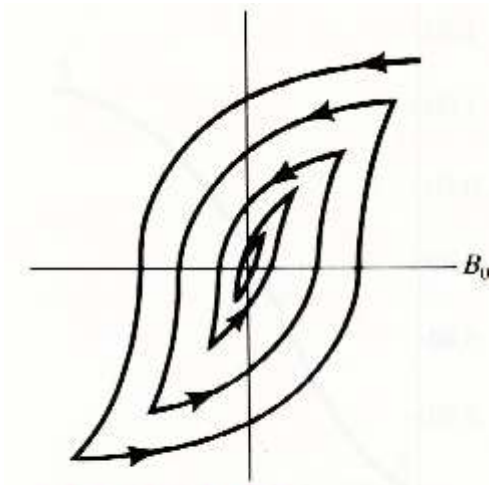


FIGURE 30–23 Successive hysteresis loops during demagnetization.

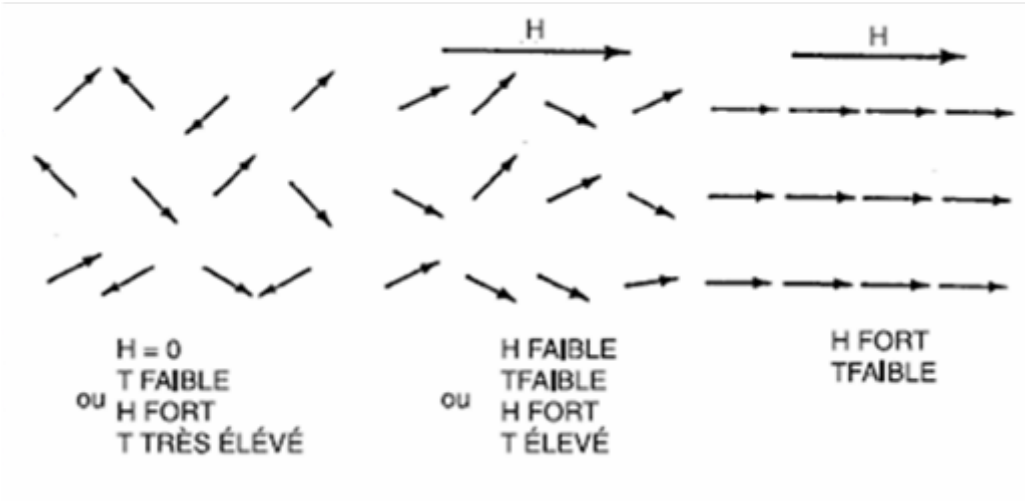
© Vincent Argenton - David Charbit - Xavier Magnien -

Matériaux antiferromagnétisme

- Les atomes s’organisent en deux sous réseaux dont les moments magnétiques sont de sens opposé, produisant un champ magnétique global nul
- Généralement observé à basse température (température de Néel)

Matériaux paramagnétiques

- Ex. aluminium, platine, manganèse, gneiss, …
- Moment magnétique résultant est nul, mais le moment magnétique des atomes du matériau s'oriente dans le sens du champ magnétique appliqué et le renforce
- Susceptibilité magnétique > 0 mais faible en comparaison aux matériaux ferromagnétiques
- Leur aimantation disparaît dès que le champ magnétique appliqué est supprimé
- Le paramagnétisme diminue avec la température (agitation thermique désoriente les dipôles magnétiques élémentaires)

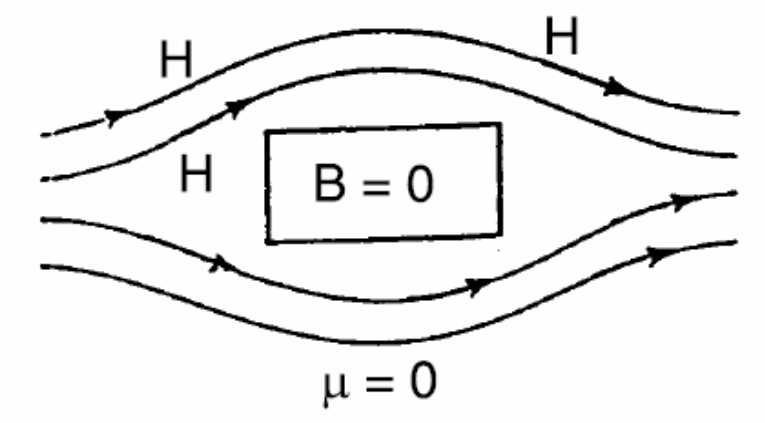


Matériaux diamagnétiques

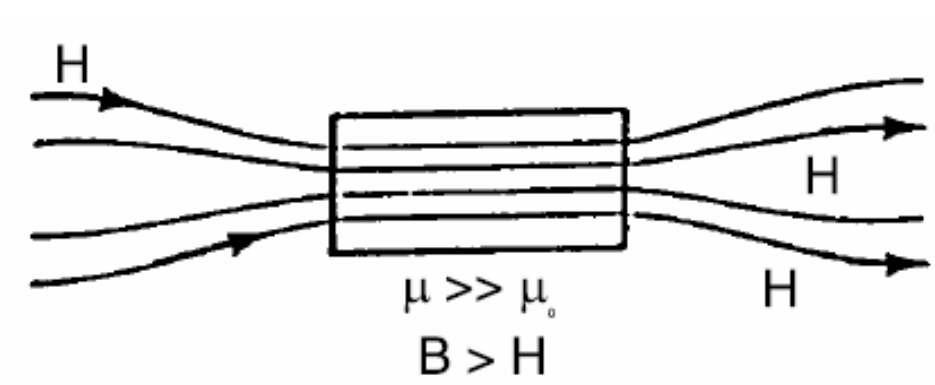
- Ex. Cuivre, zinc, argent, eau, quartz, diamant, marbre, gypse, supraconducteurs, …
- Moment magnétique résultant nul
- Ne s’aimante pas et plus précisément s’aimantent faiblement dans le sens opposé au champ magnétique appliqué (susceptibilité magnétique < 0). Cet effet s’annule dès que le champ magnétique extérieur est supprimé
- Grande résistance aux lignes de champs magnétiques

Champ magnétique H et induction magnétique B

- $B = \mu * H$
  - B : champ magnétique induit (Tesla; 1 Gauss = 1.10^{-4} T)
  - μ : perméabilité magnétique du matériau en Henry/mètre
  - H : excitation magnétique H, $A.m^2$



Matériau diamagnétique



Matériau Ferromagnétique

Champ magnétique terrestre

- Produit par le déplacement du noyau externe (principalement fer et nickel en fusion) qui représente une gigantesque dynamo
- Équivalent à un immense aimant droit 50 μT (ou 0.5 G)

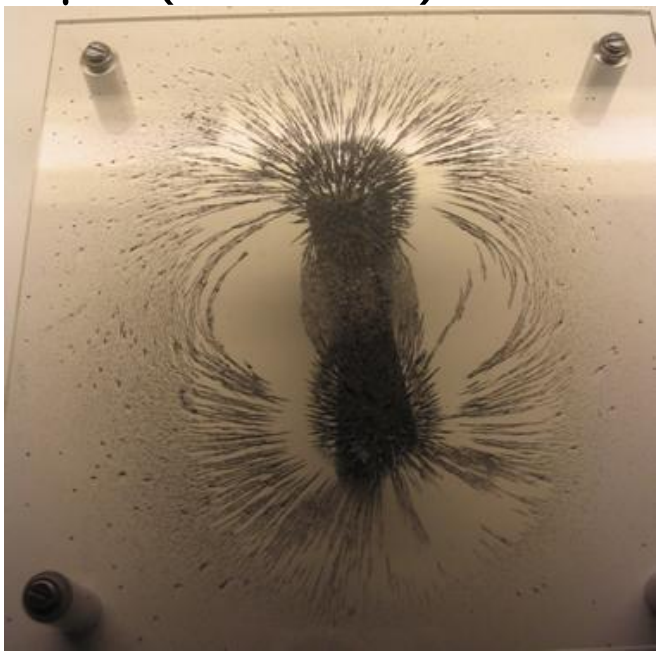


Illustration des lignes de champs
http://castel52.free.fr/

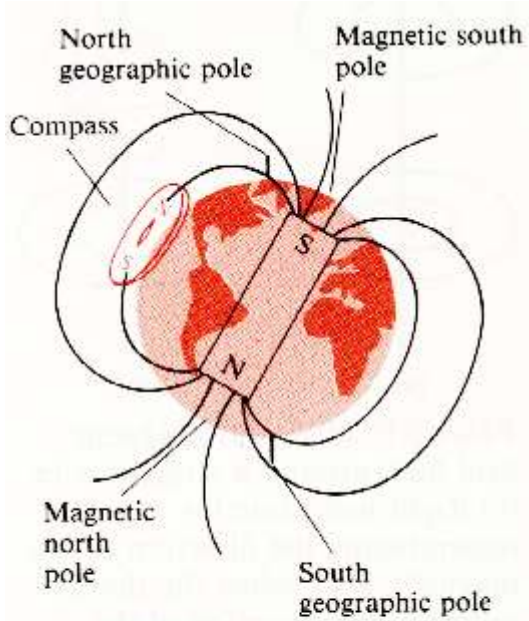


FIGURE 29–4 The earth acts like a huge magnet with its magnetic south pole near the geographic north pole.

© Vincent Argenton - David Charbit - Xavier Magnien - PSTE 2005-2006

Le courant électrique produit un champ magnétique et exerce une force sur un aimant

1829 H.C. Oersted (1777-1851, Copenhague)
Premier lien établit entre électricité et magnétisme

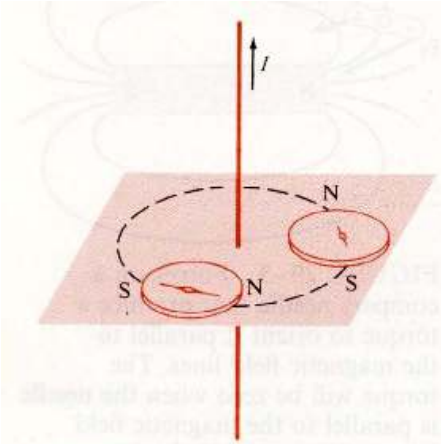


FIGURE 29–6 Deflection of a compass needle near a current-carrying wire, showing the presence and direction of the magnetic field.

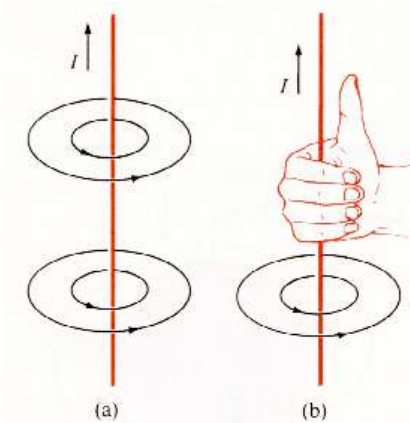


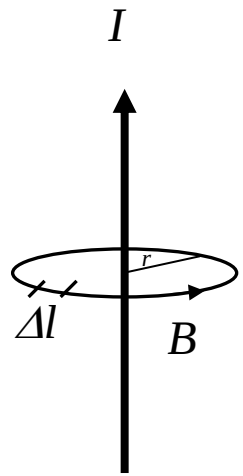
FIGURE 29–7 (a) Magnetic field lines around a straight wire. (b) Right-hand rule for remembering the direction of the magnetic field: when the thumb points in the direction of the conventional current, the fingers wrapped around the wire point in the direction of the magnetic field.

Champ magnétique B – Loi d'Ampère

- Loi d'Ampère (A.M. Ampère 1775-1836)

$$\int \vec{B}.d\vec{l} = \mu_0 I$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$



B : champ magnétique, Testa

μ_0 : perméabilité du vide : $4\pi.10^{-7}$ T.m.A^{-1}

(ne pas confondre avec moment magnétique)

r : mètre

I : Ampère

Force électromagnétique – Force de Lorentz

~1895 Lorentz : dans un champ magnétique, à l'échelle microscopique, une force s'exerce sur les charges en mouvement (Prix Nobel en 1902)

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

q : charge électrique (Coulomb)

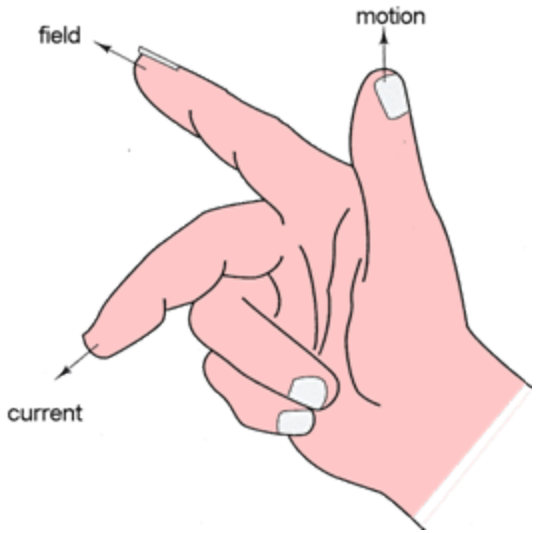
f : force électromagnétique (Newton)

B : champ magnétique (Tesla)

v : vitesse de déplacement de la charge, $m.s^{-1}$

E : champs électrique, $V.m^{-1}$

$\wedge$: produit vectoriel



Force de Laplace

$\vec{B}$: champ magnétique, Testa

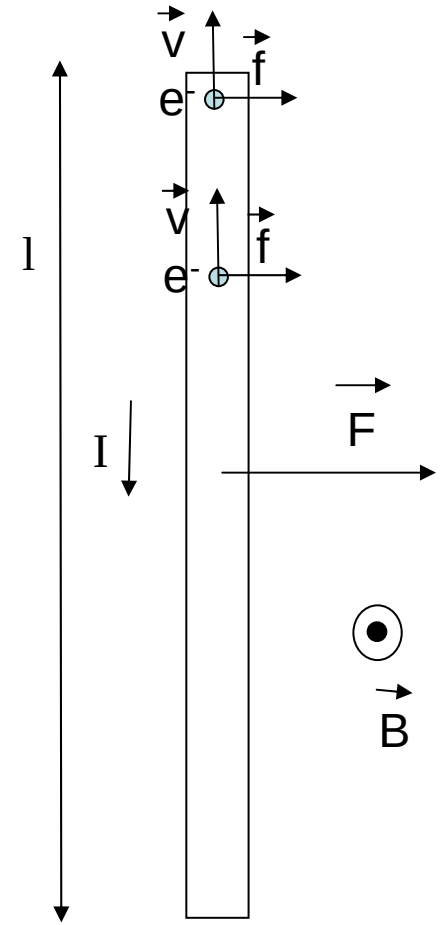
l : longueur du conducteur, mètre

I : Intensité électrique, Ampère

e^- : électrons libres (nombre N) de charge e :-1.6.10^{-19} C

Norme : f = |qvBsinθ|

$$\vec{f} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$



Chaque électron subit la force de Lorentz, résultant en une force de Laplace appliquée au conducteur

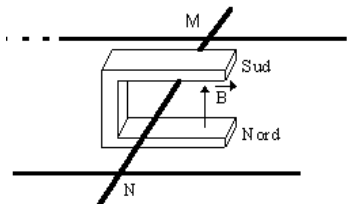
$F = Nf = NevB$

$I = |Q|/\Delta t$ $\quad |Q| = N.e$ $\quad \Delta t = l/v$

$Il = Nev$

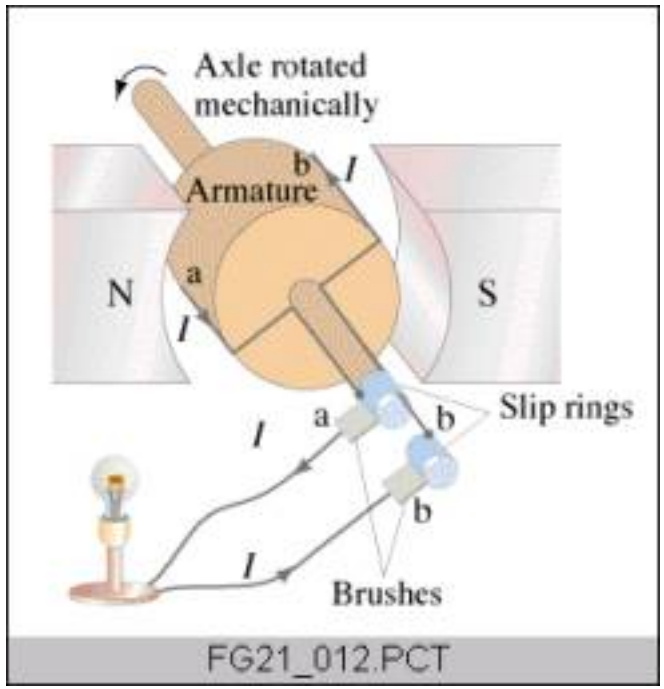
$F = IlB$

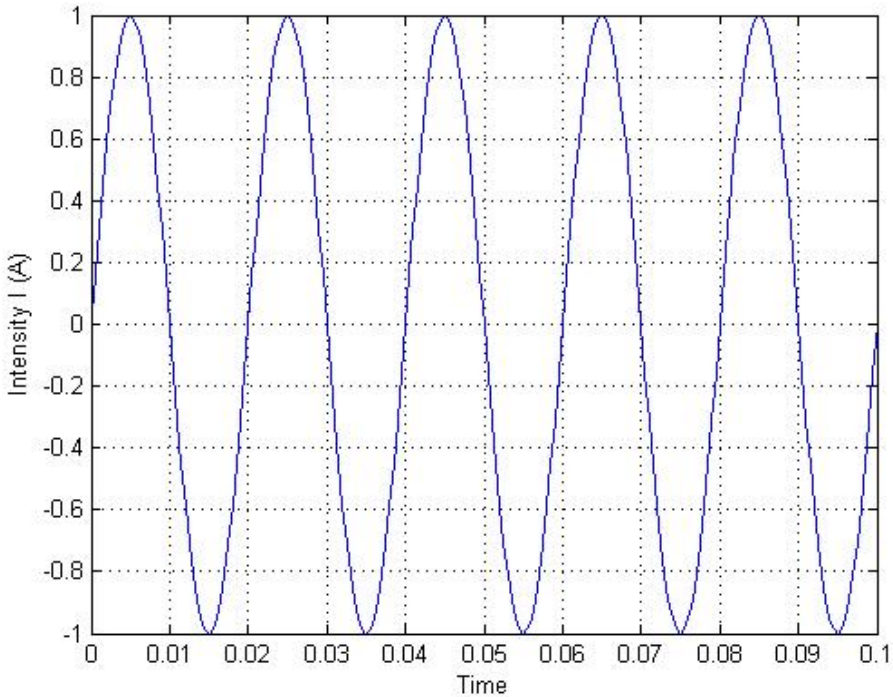
$$\vec{F} = I.d\vec{l} \wedge \vec{B}$$



Un conducteur mis en mouvement dans un champ magnétique est traversé par un courant : générateur courant alternatif (ex. dynamo)

ex. 50 Hz, 220V





http://physics.usc.edu/～bars/135/LectureNotes/EMinduction.html

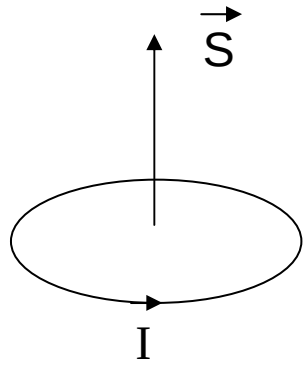
Flux magnétique, force électromotrice induite et Loi de Faraday

- Flux magnétique Φ_B [Weber, Wb = T.m^2]

$$\Phi_B = \int \vec{B}.d\vec{S}$$

B : champ magnétique ou intensité de flux

Le flux varie si B varie en intensité ou en direction, si la surface change.



- Loi de Faraday de l'induction
  - La variation du flux magnétique à travers une surface entourée par un conducteur induit une force électromotrice *(ε)*
  - Cette force électromotrice *(ε)* est proportionnelle au taux de changement du flux magnétique Φ_B

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} \qquad \text{[Volt]}$$

  - La force électromotrice *(ε)* induite produit toujours un courant dont le champ magnétique induit s'opposera au flux magnétique original (Loi de Lenz)

Utilisation de la loi de Faraday : transformateur de courant ac

- Dans un circuit contenant N spires

$$\varepsilon = -N.\frac{d\Phi_B}{dt}$$

- Principe du transformateur 220 spires 6 spires (220v vs 6v)

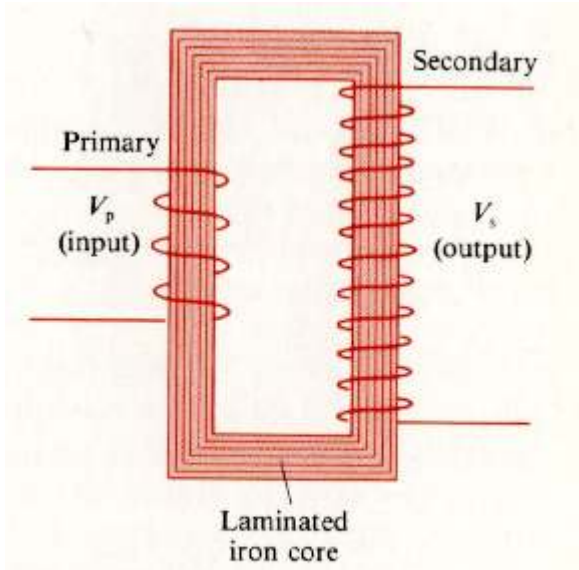


FIGURE 31–13 Step-up transformer ($N_p = 4$, $N_s = 12$).

Le galvanomètre (ex. voltmètre)

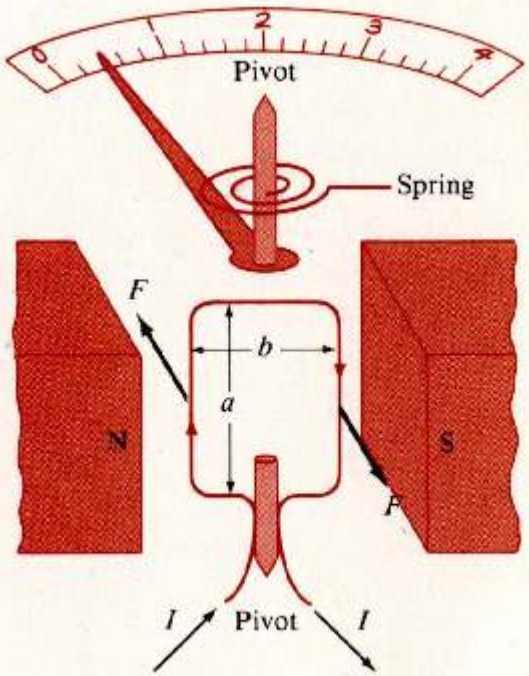


FIGURE 29–16 Galvanometer.

Hautparleur

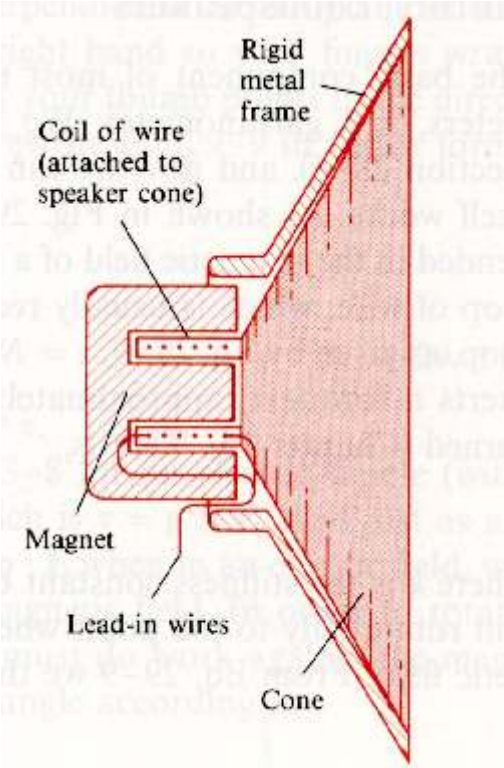


FIGURE 29–21 Loudspeaker.

Spectroscopie de masse

Initialement par JJ Thomson

Tube cathodique

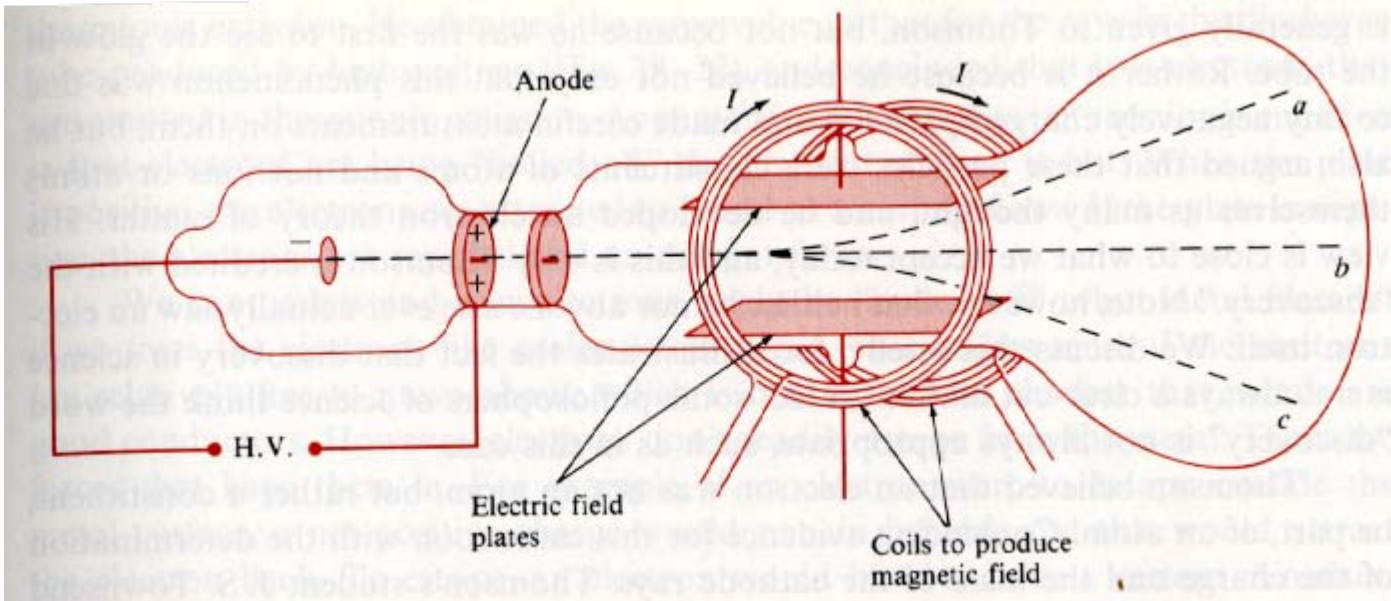


FIGURE 29–24 Cathode rays deflected by electric and magnetic fields.

Inductance

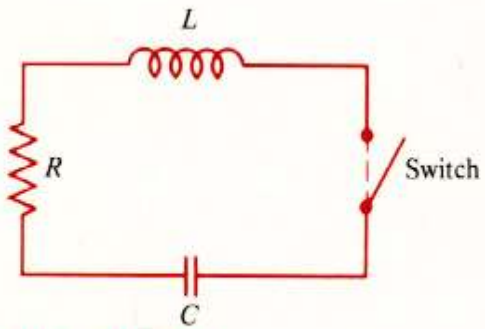


FIGURE 32–7 An *LRC* circuit.

32–6 *LC* Oscillations with Resistance (*LRC* Circuit)

The *LC* circuit discussed in the previous section is an idealization. There is always some resistance *R* in any circuit, and so we now discuss such an *LRC* circuit, Fig. 32–7.

Suppose again that the capacitor is initially given a charge Q_0 and the switch is closed at $t = 0$. Since there is now a resistance in the circuit, we expect some of the energy to be converted to thermal energy, and so we don't expect undamped oscillations as in a pure *LC* circuit. Indeed, if we use Kirchhoff's loop rule around this circuit, we obtain

$$L\frac{dI}{dt} + IR + \frac{Q}{C} = 0,$$

Lecteurs, enregistreurs de bandes magnétiques

- Champ induit dans l’entrefer, tension induite, lue, amplifiée, moment magnétique d’une couche de matière magnétique

- Disque dur
  (alliage à base de fer de quelques couches atomiques)
  - 0 : non aimanté
  - 1 : aimanté

Equations de Maxwell

- Les équations de Maxwell permettent la découverte des ondes hertziennes (Hertz), à l'origine de la radiotechnique.

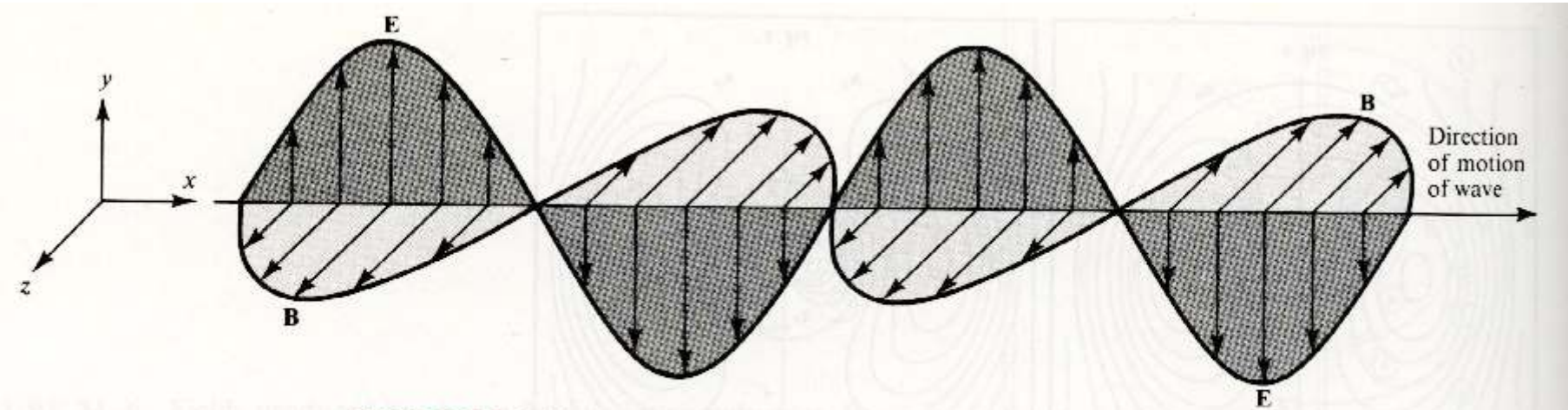
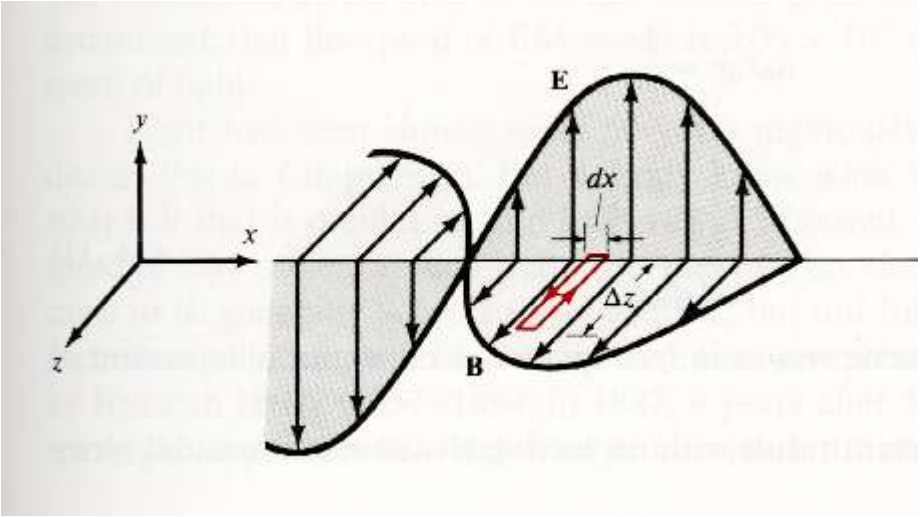


FIGURE 34–10 Electric and magnetic field strengths in an electromagnetic wave. **E** and **B** are at right angles to each other. The entire pattern moves in a direction perpendicular to both **E** and **B**.

Equations de Maxwell



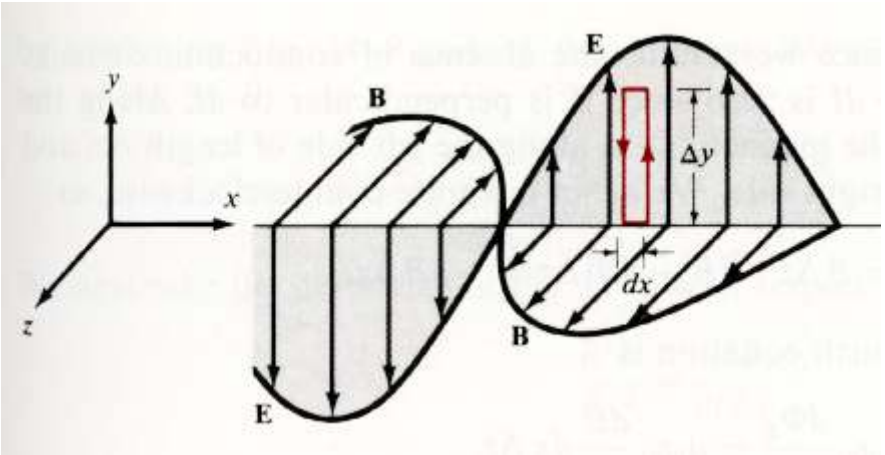


TABLE 34–1
Maxwell's equations in free space

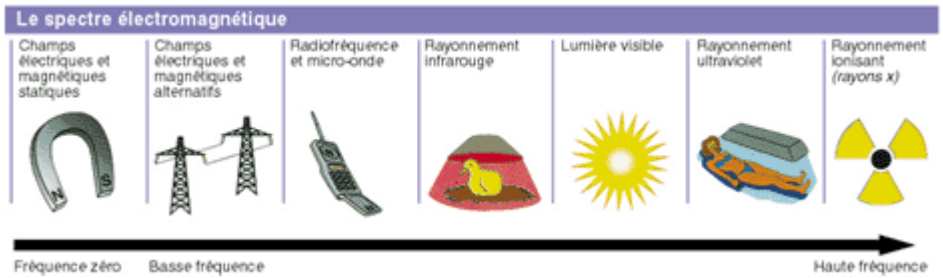
Integral form	Differential form
$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\varepsilon_0}$	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$
$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$

Onde électromagnétiques

Longueur d'onde, fréquence et énergie d'une onde électromagnétique

Les **ondes électromagnétiques**, dont la lumière est un exemple, sont une forme d'**énergi**e. La quantité d'énergie contenue dans une onde dépend de la **fréquence** et de la **longueur d'onde**. Plus la longueur d'onde est courte, plus la fréquence est élevée et plus l'énergie de l'onde électromagnétique est élevée.

Les **propriétés** des ondes électromagnétiques diffèrent selon la **quantité d'énergie** possédée.
Les ondes électromagnétiques dont la fréquence est supérieure à **10^{15} Hz** ont une énergie suffisante pour casser les liaisons chimiques et **ioniser** les molécules. Ces ondes électromagnétiques sont appelées " **rayonnements ionisants** ". Il s'agit des **rayons cosmique**s, des **rayons gamma** et des **rayons X**.
Les ondes électromagnétiques de fréquence inférieure à **10^{15} Hz** n'ont pas l'énergie suffisante pour briser les liaisons chimiques. Elles sont appelées " **rayonnements non ionisants** ". Il s'agit des **rayons UV**, de la **lumière visibl**e, des **radiofréquences** et des **basses et extrêmement basses fréquences**. Les rayons UV sont situés à la **frontière de l'ionisation**.



http://www.bbemg.ulg.ac.be/FR/2Notions/spectreem.html

Ondes électromagnétiques

Fréquence	Gamme	Exemples d'applications
0 Hz	Champs statiques	Electricité statique
3-300 Hz	Extrêmement basses fréquences (ELF)	Réseau électrique et électroménager
300 Hz à 30 kHz	Fréquences intermédiaires	Ecrans vidéo, chauffage par induction
30 kHz à 300 GHz	Radiofréquences	Radiodiffusion, télédiffusion, téléphone mobile, four à micro-ondes, radars, co
300 GHz à 385 THz	Infrarouge	Détecteurs anti-vol, Télécommandes
385 THz à 750 THz	Visible	Soleil, lasers
750 THz à 3 PHz	Ultraviolet	Soleil, photothérapie
3 PHz à 30 PHz	Rayons X	Radiologie
Au delà de 30 PHz	Rayons gamma	Physique nucléaire

Pourquoi une cage de Faraday ?

- Pour stopper les ondes radiofréquences
- Fonctionnement : aucune différence de potentiel autour d’un volume
- Ex. supprimer le 50 Hz parasite
- Peut être réaliser avec un simple tissu conducteur

Imagerie par Résonance Magnétique (IRM)

- Basée sur le principe de résonance magnétique nucléaire
  - mesure de la relaxation du moment magnétique de spin
  - sensible au taux d'oxygénation de l'hémoglobine (BOLD, blood oxygenation level dependent, deO_2Hb est paramagnétique)
  - mauvaise résolution temporelle, bonne résolution spatiale

- Lauterbur PC, Nature, 1973
  - Première image obtenue par résonance magnétique nucléaire

Sécurité avec IRM

- Les variations de champs magnétiques nécessaires pour obtenir une IRM impliquent :
  - La production de courant induit dans un conducteur placé dans l'IRM

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

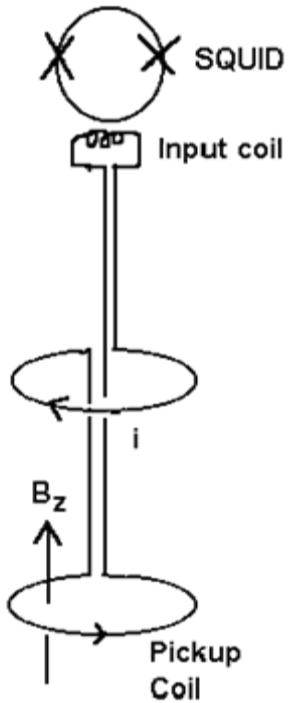
  - Ce courant induit peur produire un échauffement (effet Joules)
  - Les conducteurs peuvent se déplacer

$$\vec{F} = I.d\vec{l} \wedge \vec{B}$$

Georgi JC et al., Magnetic Resonance in Medicine, 2004;51:380-8

MagnétoEncéphaloGraphie (MEG)

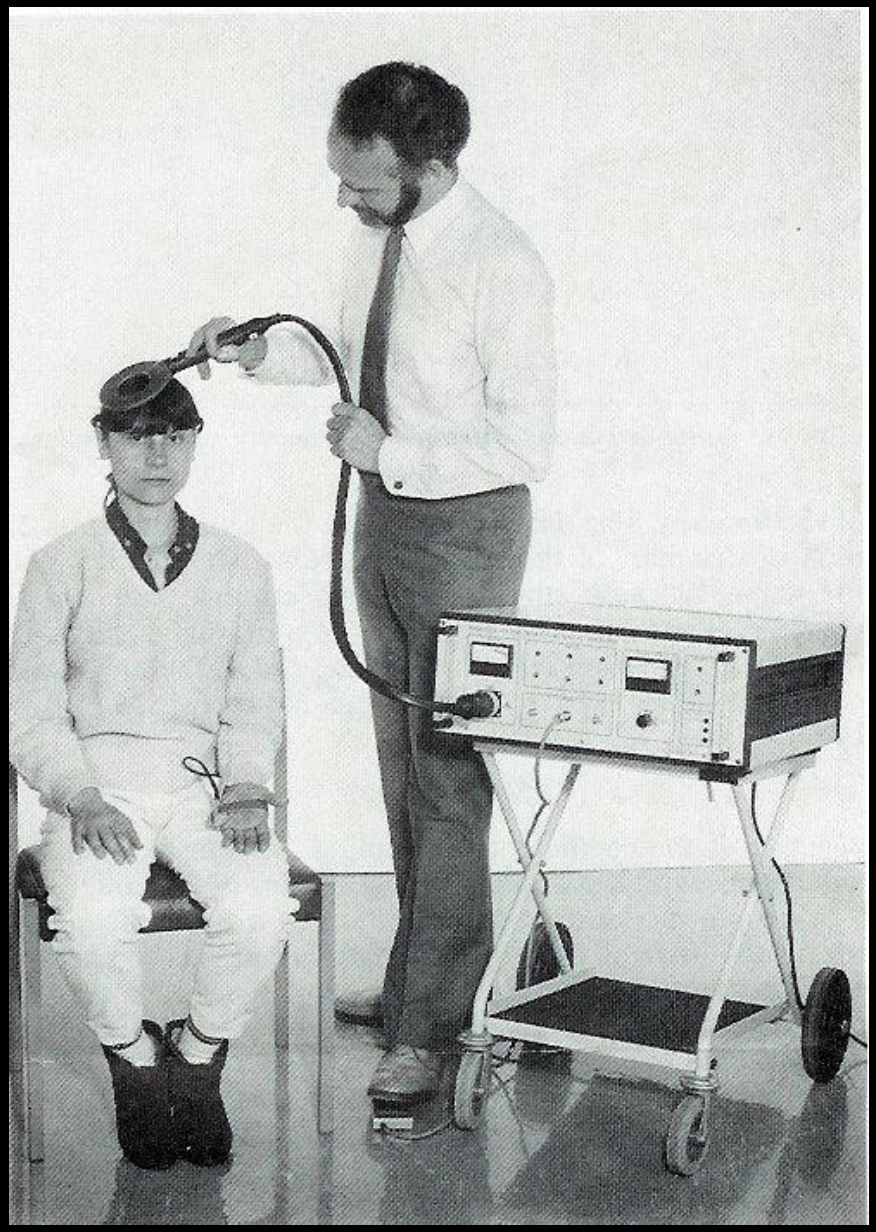
- Mesure de la composante magnétique de la transmission synaptique (observation de la composante tangentielle ; EEG composante radiale)
- Utilisation des Squid
  (Superconducting QUantum Interference Device)
- Actuellement jusqu'à [64-300] détecteurs



MagnétoEncéphaloGraphie (MEG)

- Excellente résolution temporelle
- Résolution spatiale ~ équivalente EEG
- Cohen D. 1968. Magnetoencephalography: … Science 161:784-6
- Modèle de la source du signal MEG
  Murakami S, Okada Y. Contributions of principal neocortical neurons to magnetoencephalography and electroencephalography signals. J Physiol. 575.3:925-36, 2006;

Stimulation magnétique transcrânienne (TMS)



AT Barker pratiquant la TMS
Baker, Jalinous, Freeston (1985)
(Magstim)

From Dr A. Truffert, Neurologie, HUG

Stimulation magnétique transcrânienne

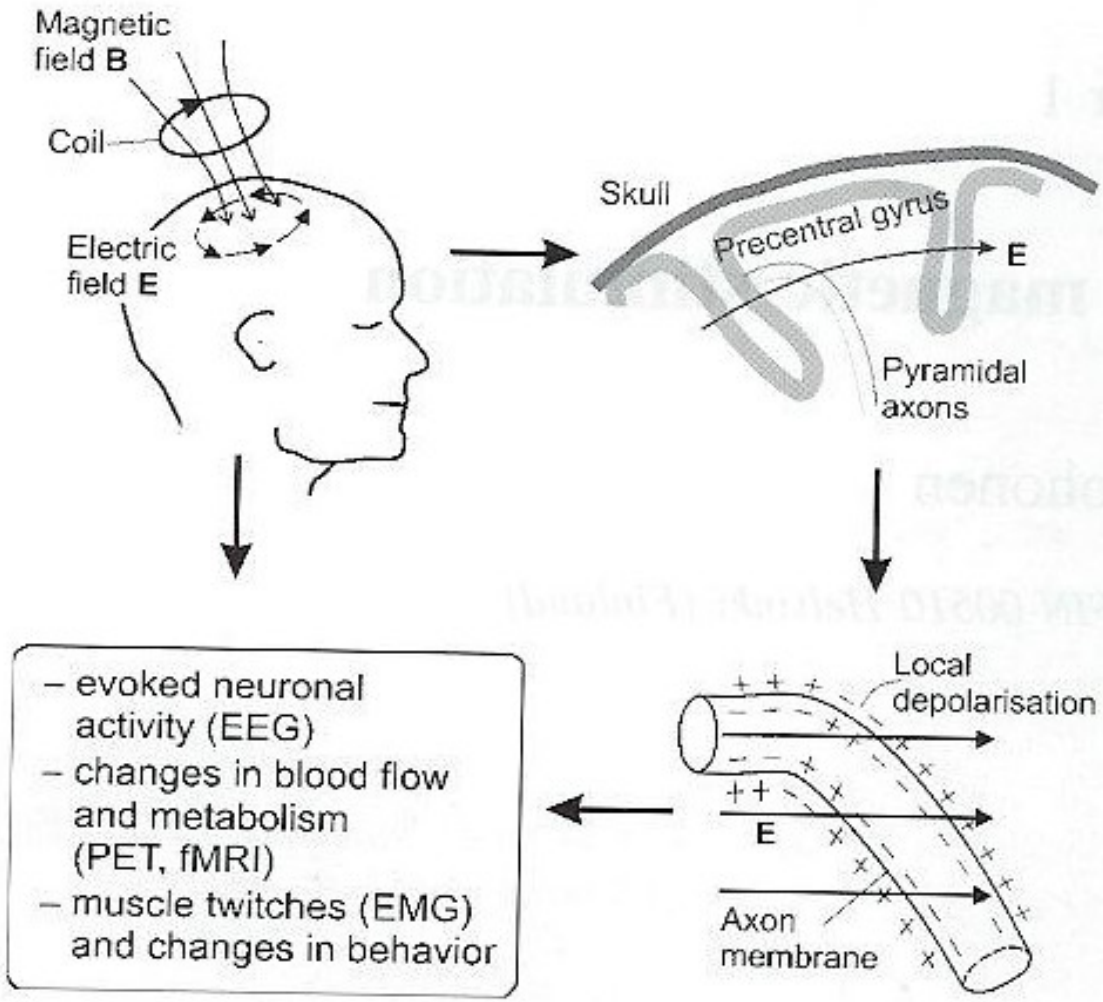
Simple coil

Double coil « butterfly »

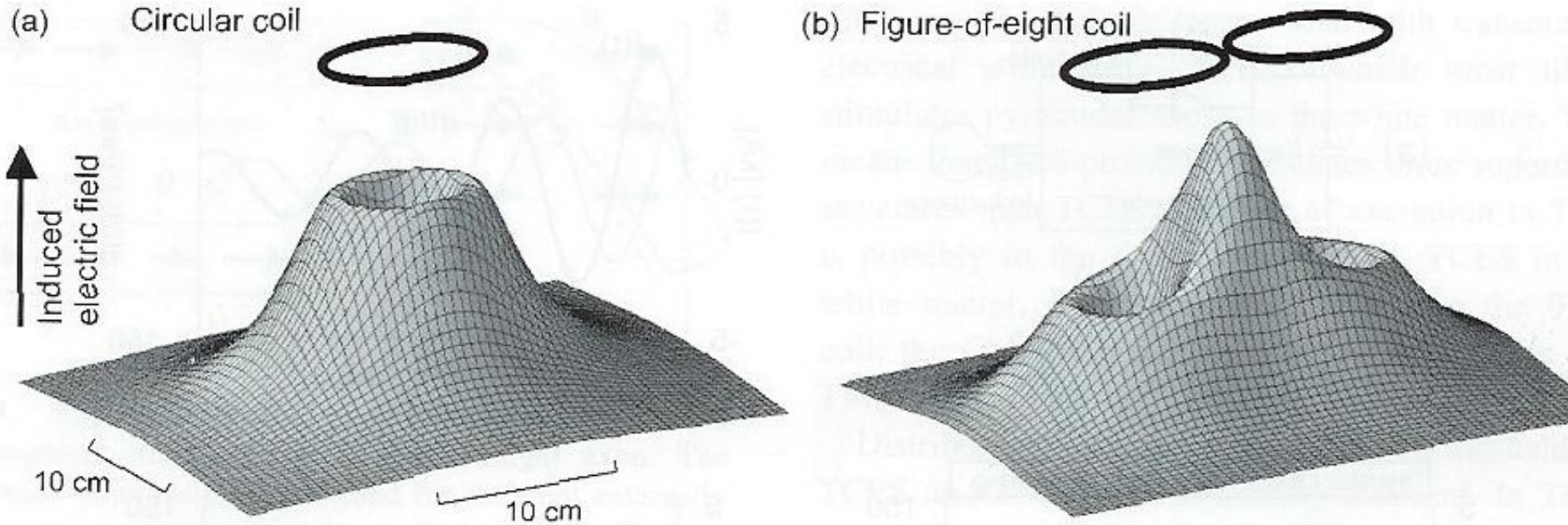
Double coil conique

Différents types de bobines (coils)

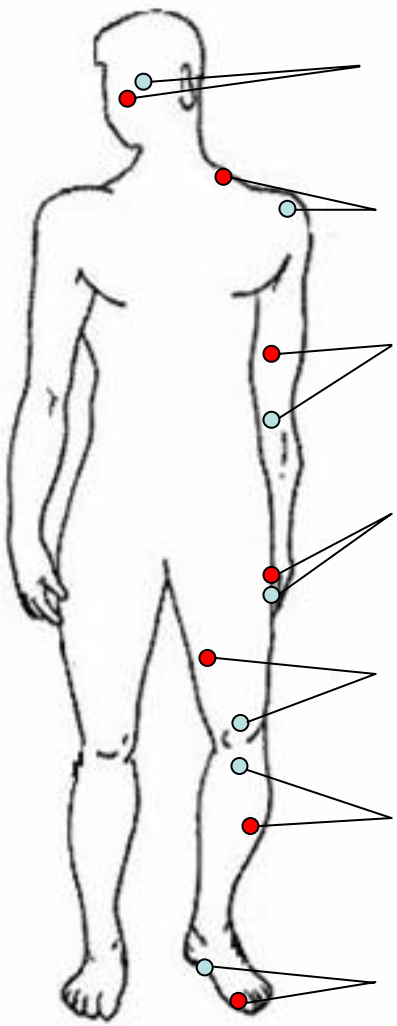
From Dr A. Truffert, Neurologie, HUG



From Dr A. Truffert, Neurologie, HUG



From Dr A. Truffert, Neurologie, HUG



- Face : VII
- Cou - trapèze : C3-C4
- Mb sup prox. – biceps : C5-C6
- Mb sup. dist. - ADM : C8-D1
- Mb inf. prox. - quadriceps (QCT) : L2 – L4
- Mb inf. - jambier ant : L4-L5
- Mb inf. dist. - AH : S1-S2

PEM : sites d’enregistrement les plus utilisés

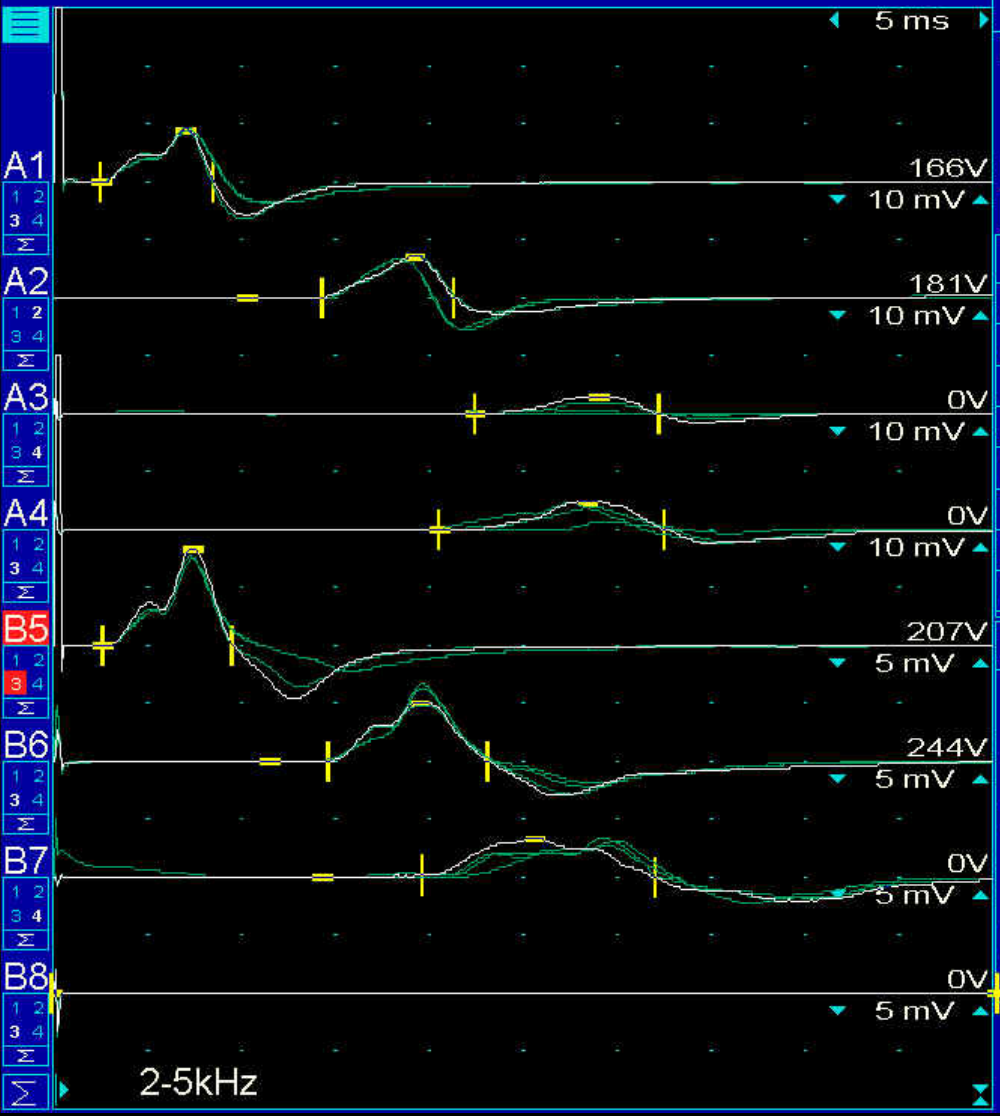
From Dr A. Truffert, Neurologie, HUG

PEM : résultats – Mains (ADM)

Pédale: Cp/Cp | Stim: 2 | Cadence: Cp/Cp | Niveau: 0 V | Dur: 0.2 ms | Unique

Examen: 5 | Moyen.: Non | Correct. Sign.: Non

A1 A2 A3 A4 B5 B6 B7 B8



Point de Rec. A: ADM (es) D. Repos Erb : 7.2 mV

Point de Rec. B: ADM (es) G. Repos Erb : 6.7 mV

Point de Stim.	Lat1 ms	Dur ms	Amp mV	Surf. mVms
A1: Mmax Cub Po	2.5	6.0	9.1	27.7
A2: Mmax Erb	14.3	7.0	7.4	26.2
A3: PEM Cx D AV 80%	22.4	9.8	3.0	15.0
A4: PEM Cx G AV 70%	20.5	12.0	4.9	27.2
B5: Mmax Cub Po	2.6	6.9	8.6	26.2
B6: Mmax Erb	14.6	8.5	5.1	23.0
B7: PEM Cx D AV 80%	19.6	12.4	3.5	22.1
B8: PEM Cx G AV	No	No	No	No

Segment	rAmp %	rSurf %
Mmax Erb-PEM Cx D AV 80%	41.0	57.0
Mmax Erb-PEM Cx G AV 70%	65.9	103.8
Mmax Erb-PEM Cx D AV 80%	67.8	96.1
Mmax Erb-PEM Cx G AV		DEP

From Dr A. Truffert, Neurologie, HUG