

Un peu de Science pour comprendre le monde moderne

Les ondes et nous

[Bernard Remaud](#)

bernard.remaud@univ-nantes.fr
<https://www.un-peu-de-physique.fr>



La chaîne YouTube



Le blog

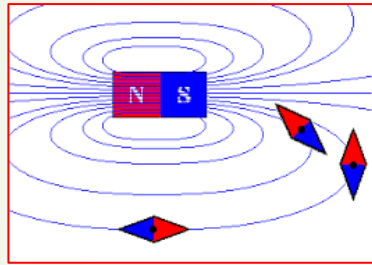
Ch 5

Electricité et magnétisme – leurs effets

2

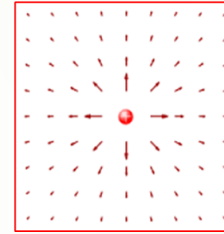
À l'origine des forces électriques et magnétiques

Un **aimant** crée un champ de forces **magnétiques**

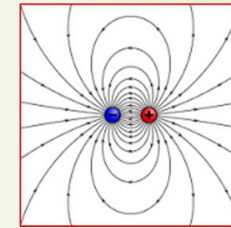


Une **charge électrique** crée un champ de forces **électriques**

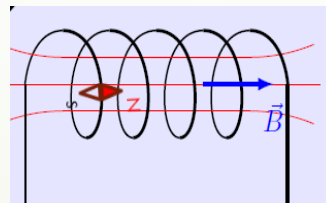
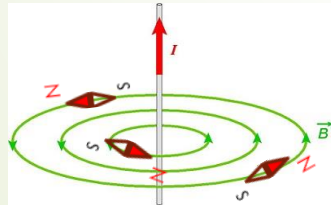
Une charge positive



Deux charges: positive et négative



Un **courant continu** dans un fil
- Champ **magnétique** (loi d'Ampère)



<http://ressources.unisciel.fr/>

Un champ est une propriété de l'espace autour d'une source électrique ou magnétique

3
Les **aimants** connus depuis l'antiquité : magnétite et boussole (Chine)
L'**électricité** aussi (ambre frotté → elektron)
Comment disposer de sources pérennes et contrôlables ?

Machine électrostatique (circa 1740)
+ Bouteille de Leyde (1747)



Machine de Ramsden (1758)

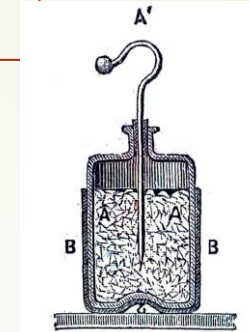


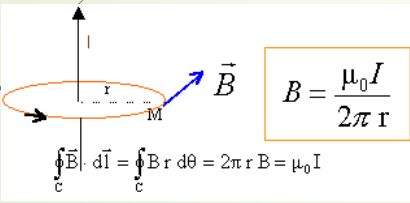
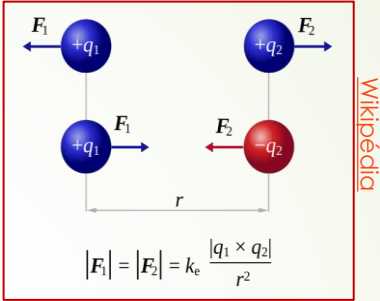
FIG. 142. — Bouteille de Leyde. — A, armature intérieure; B, armature extérieure.

Pile de Volta (1800) – **courant continu**
Pile de disques de zinc et cuivre séparés par des tissus isolants baignés dans la saumure

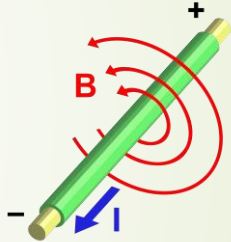
Une explosion d'expériences conduisant à des « lois » sur l'électricité et le magnétisme

Une explosion d'expériences conduisant à des « lois » sur l'électricité et le magnétisme

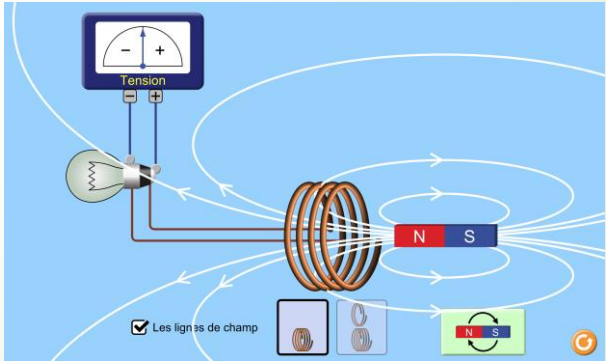
Loi de Coulomb : force électrostatique (1785)



Oersted-Ampère (1820) : le courant électrique crée un champ magnétique



Lenz - Faraday (1831-34): un champ magnétique variable crée un courant électrique

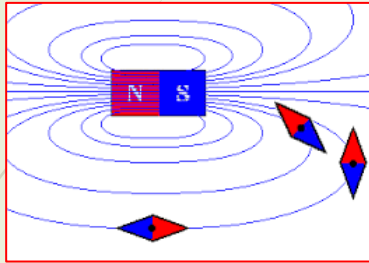


PhET à l'Université du Colorado Boulder

Les champs : électrique et magnétique

5

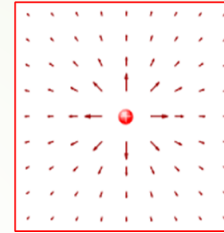
Dipôle magnétique



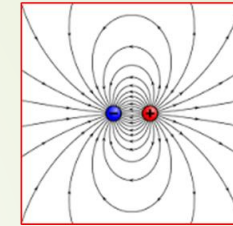
Pourquoi pas de monopole magnétique ?

Monopôle et dipôles électriques

Une charge positive

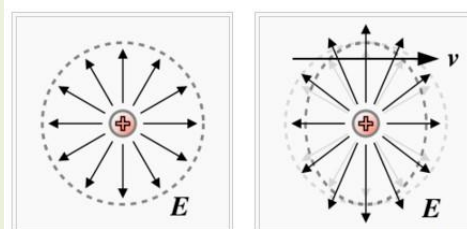


Deux charges: positive et négative



Un **champ** est la donnée, pour chaque point de l'espace-temps, de la valeur d'une grandeur physique.

Cette grandeur physique peut être **scalaire** (température, pression...), **vectorielle** (vitesse des particules d'un fluide, force gravitationnelle, électrique ou magnétique, ...)... [\(Wikipédia – Champ physique\)](#)



Seul le champ électrique est fondamental.

Le champ magnétique –macroscopique- est un dérivé du champ électrique selon la relativité restreinte : vitesse de la lumière finie ([voir la vidéo](#), 1ère partie)

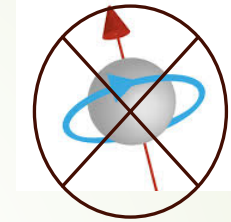
- Charge immobile → champ électrique **isotrope**
- Charge en mouvement → champ électrique **déformé**

Propagation du signal électrique → 300 000 km/s
Déplacement des électrons → environ 1 m/h

Et les aimants permanents ?

Les particules élémentaires peuvent avoir un moment magnétique intrinsèque **le spin**.
Le spin est quantifié :

- Spin nul : boson de Higgs
- Spin demi- entier $\hbar/2$: électron, proton, neutron,..
- Spin entier \hbar : photon (lumière)
- ...



Expérience de Stern et Gerlach (1922)



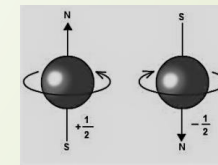
Dirac 1928 → rendre compatible la mécanique quantique avec la relativité

Schrödinger → objet décrit par une fonction d'onde Ψ

Dirac → Fonction d'onde à 4 composantes

$$\Psi = \begin{pmatrix} \psi^\uparrow \\ \psi^\downarrow \\ \varphi^\uparrow \\ \varphi^\downarrow \end{pmatrix}$$

2 spins
antimatière



Les unités de mesure :

- Champ électrique en volts par mètre (V/m)



Foudre
3 600 000 V/m



- Champ magnétique en Teslas (μT en général)



1 T
IRM



4 T
Aimant
supraconducteur
du CERN

En résumé

8

- Les champs électriques et magnétiques émis par les courants continus ou alternatifs de basse fréquence (50Hz) sont découplés. Leurs effets peuvent être étudiés séparément

9

Champs magnétique ou électrique (indépendants) :

Ligne à haute tension



Créés par des courants continus ou lentement variables
(basses fréquences comme le courant alternatif à 50 Hz)

Ondes électro-magnétiques (champs électrique et magnétique couplés)

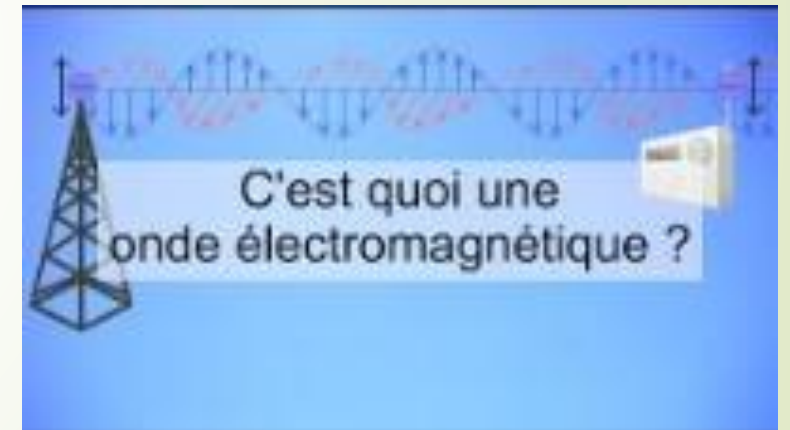
Four à r



Créés par des courants de hautes fréquences (Plus de 100 000 Hz)

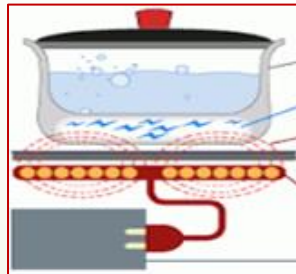
- Voir la suite du cours

Une [vidéo didactique](#) sur
ondes et champs

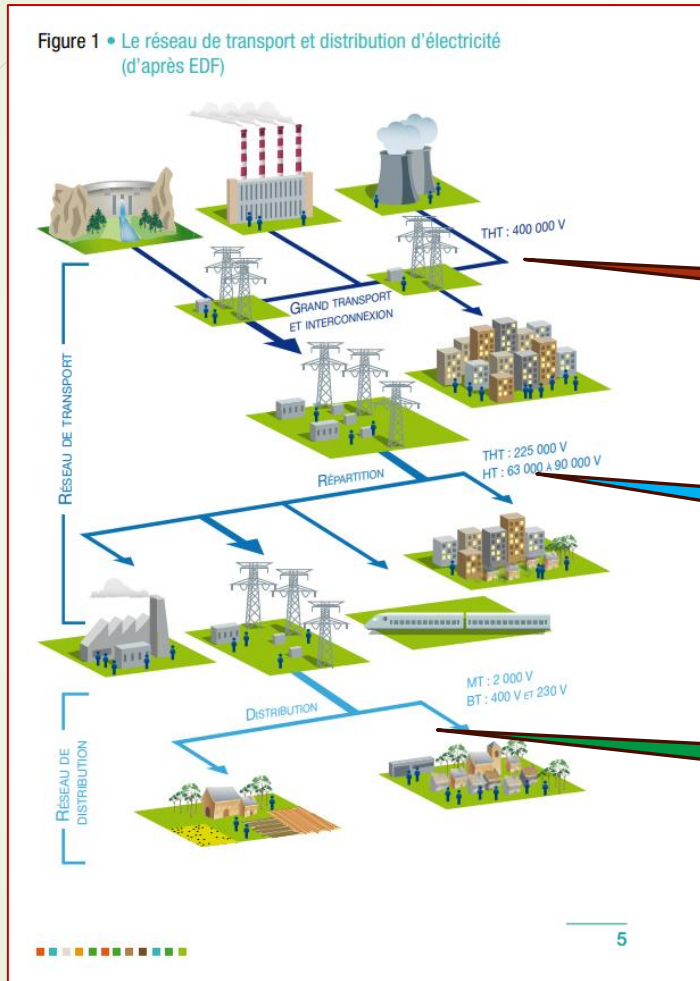




Source de champs ou émetteurs d'ondes ?



Les sources de champs dans notre environnement



La distribution électrique 50 Hz

THT
400 000 V

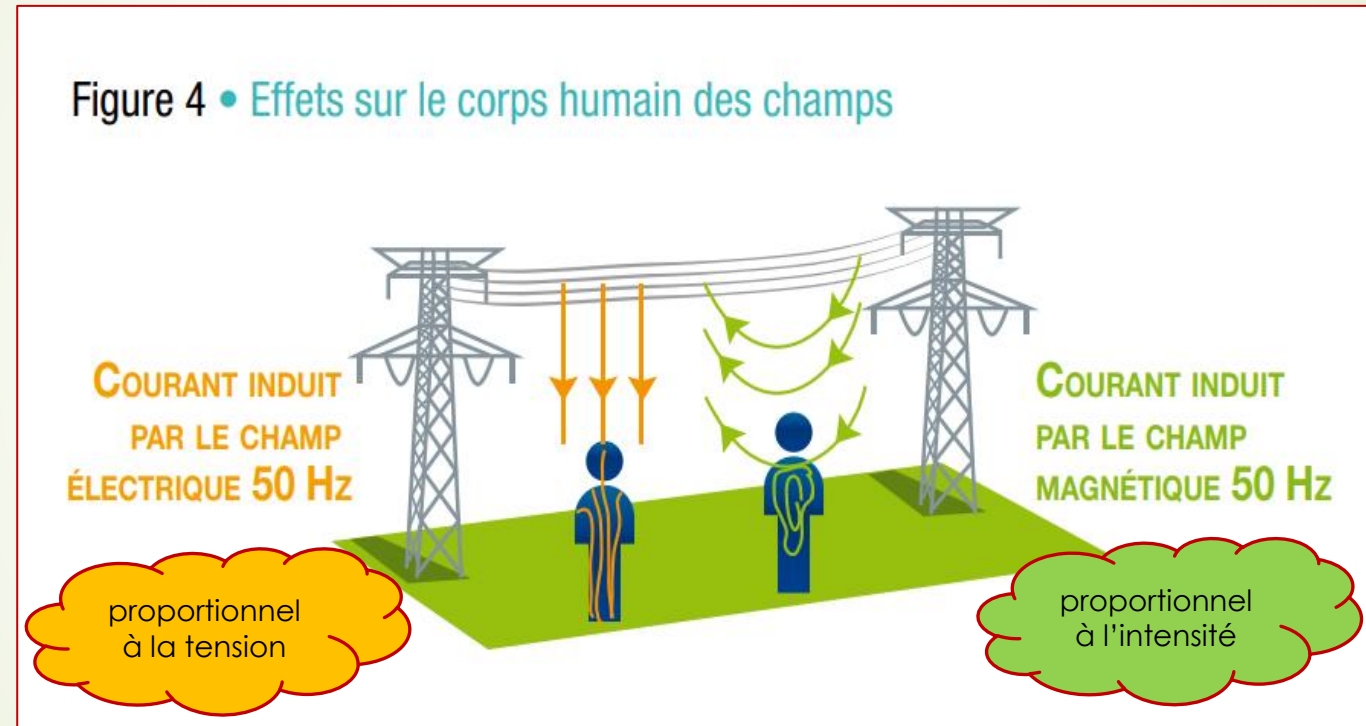
HT
225 000 V
À
60 000 V

MT 20 000 V
BT 230 V

Et les
aimants
permanents

Source ANSES

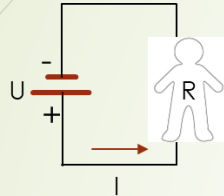
Propriétés des courants de très basse fréquence (comme le courant électrique 50Hz)



Voir : « Champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence : Les effets sur la santé »
ANSES - 2014



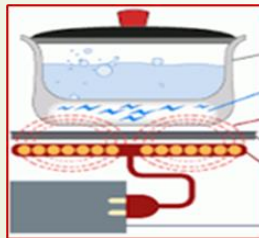
Courants induits par le champ électrique



Loi d'Ohm $U=R I$

Courant alternatif
change de sens 50 fois
par seconde

Courants de Foucault – magnétique



Ce sont des courants qui prennent naissance :
- dans un solide conducteur soumis à une **variation de champ magnétique**
- ou dans un **conducteur en mouvement** dans un champ magnétique constant



Loi de Lenz « Le sens du courant induit est tel qu'il donne naissance à un champ magnétique induit qui s'oppose à la cause qui lui a donné naissance. »

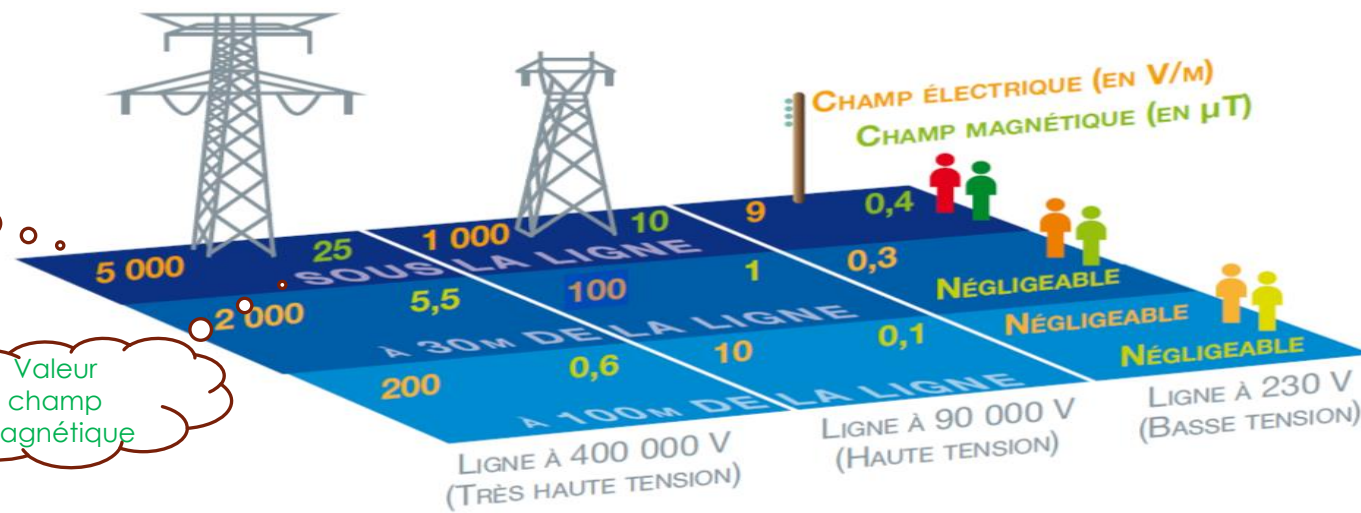
En résumé

15

- Les champs électriques et magnétiques émis par les courants continus ou alternatifs de basse fréquence (50Hz) sont découplés. Leurs effets peuvent être étudiés séparément
- Les courants alternatifs de basse fréquence sont sources de champs électriques proportionnels à la tension (volts) et sources de champs magnétiques proportionnels à l'intensité (ampères)



Figure 2 • Valeurs moyennes des champs électrique et magnétique autour des lignes aériennes de transport d'électricité à 50 Hz



Valeur champ électrique

Valeur champ magnétique

Limite légale
87 V/m et 6,25 μT
Source ANFR
<https://www.anfr.fr>

Champ magnétique terrestre 47 μT

Source : MEDDE Instruction du 15 avril 2013 relative à l'urbanisme à proximité des lignes de transport d'électricité.

NB : les champs électriques sont plus absorbés par la matière que les champs magnétiques

Voir : « [Champs électromagnétiques d'extrêmement basse fréquence : Les effets sur la santé](#) »
Direction générale de la santé (DGS) - 2014

En résumé

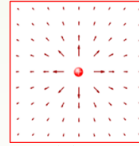
17

- Les champs électriques et magnétiques émis par les courants continus ou alternatifs de basse fréquence (50Hz) sont découplés. Leurs effets peuvent être étudiés séparément
- Les courants alternatifs de basse fréquence sont sources de champs électriques proportionnels à la tension (volts) et sources de champs magnétiques proportionnels à l'intensité (ampères). Ils décroissent très vite avec la distance.
- **Les lignes à très haute tension créent à leur proximité des champs magnétiques dépassant les normes**

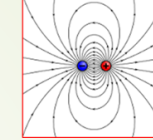


Effet de la distance

- **Champ électrique** : Charge ponctuelle



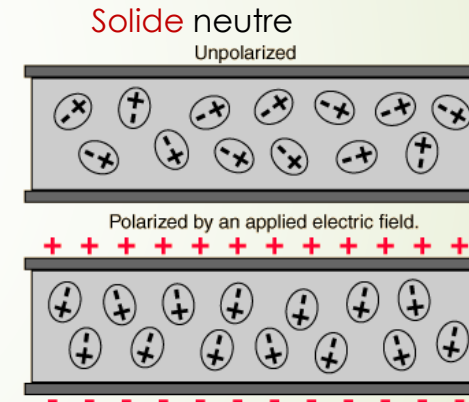
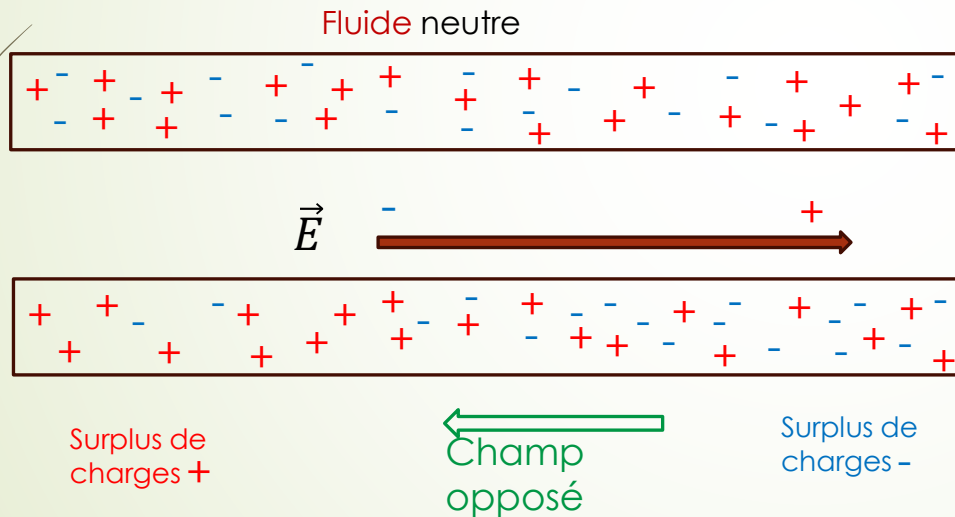
$\sim \frac{1}{d^2}$ Charge dipolaire



$\sim \frac{1}{d^3}$

- « vue de loin », les charges plus et moins s'équilibrent

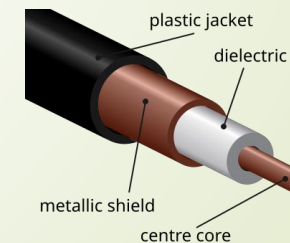
Effet d'écran : La matière est remplie de charges électriques mobiles (négatives surtout)



Permittivité - Wikipédia

Permittivité : la « réponse » d'un matériau soumis à un champ électrique

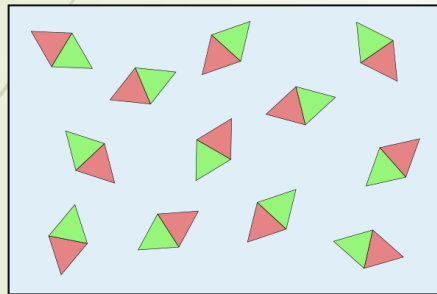
Technique de blindage électrique



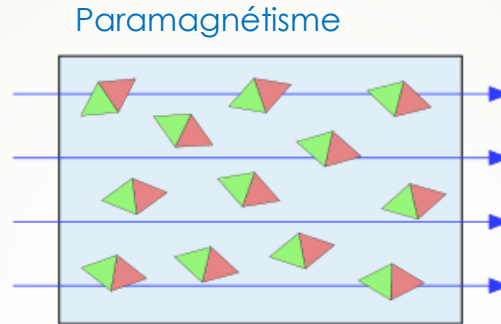


La « réponse » d'un matériau **-solide-** soumis à un champ magnétique

Perméabilité magnétique



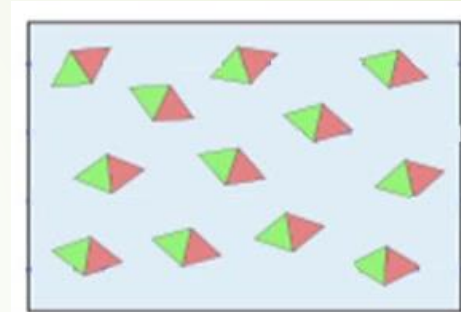
Moments magnétiques microscopiques (électrons non appariés)
Désordonnés



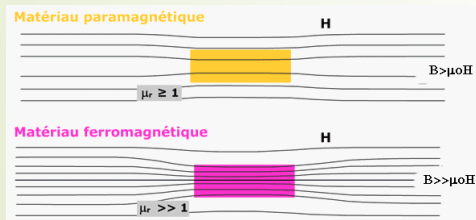
Paramagnétisme

Moments magnétiques microscopiques
Ordonnés sous influence champ magnétique externe

Ferromagnétisme

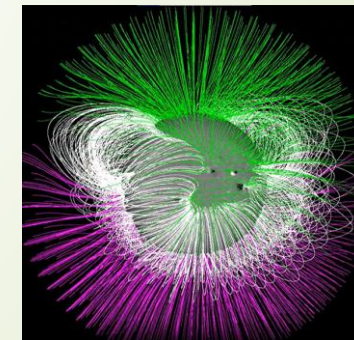
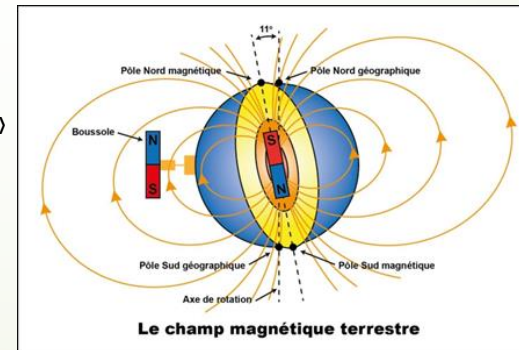


Moments magnétiques **Ordonnés** en permanence – naturellement ou après aimantation



Les matériaux magnétiques modifient localement le champ externe → détection magnétique

2 gros aimants « permanents » (courants électriques)



Champ magnétique du Soleil - NASA



La « réponse » d'un matériau soumis à un champ électrique ou magnétique :

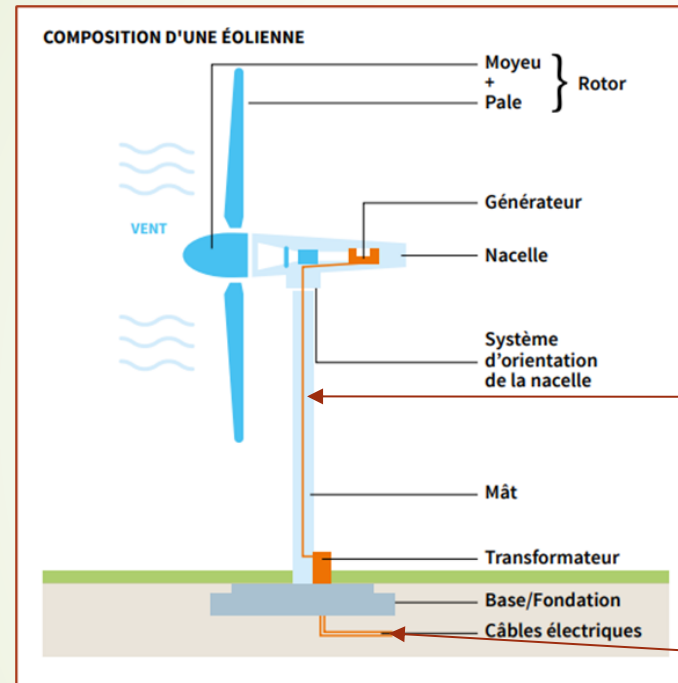
- Permittivité électrique
- Perméabilité magnétique

Les champs électriques sont fortement atténués par la plupart des matériaux.
Ce n'est pas le cas des champs magnétiques

Atténuation des champs dans les matériaux

Matériaux	Champs électriques Basses Fréquences	Champs magnétiques Basses Fréquences
Brique	Forte si murs sur fondations	Aucune
Béton	Forte si treillis à la terre	Aucune
Terre crue	Forte si murs sur fondations	Aucune
Pierre	Forte si murs sur fondations	Aucune
Cloison sèche (placo, fermacell)	Faible	Aucune
Bois	Aucune	Aucune

Source electronique.com



<https://www.mtaterre.fr/>

Exemple : puissance de crête 2 MWc

Sortie de l'éolienne

- Tension 700 V
- Intensité 3 000 A (env.)
- Alternatif fréquence variable

Sortie du transformateur

- Tension 20 000 V
- Intensité 100 A (env.)
- Alternatif 50 Hz

Caractéristiques proches d'une ligne moyenne tension (entre 15 000 et 30 000 volts)








Et Linky ?



A 30 cm
0,25 et 1 V/m
0,01 μ T et 0,05 μ T

Champ magnétique
d'un appareil IRM
3 à 10 Teslas

Figure 3 • Valeurs des champs électrique et magnétique à proximité d'appareils électriques à 50 Hz

	5 cm		30 cm		1 m		
 Radio réveil	166	1,6	16	0,08	8	0,02	CHAMP ÉLECTRIQUE (EN V/M)
 Bouilloire	18	1,08	11	0,06	6	0,02	
 Grille-pain	57	3	10	0,21	6	0,06	CHAMP MAGNÉTIQUE (EN μ T)
 Alimentation d'ordinateur	178	0,55	25	0,02	4	0,01	
 Plaques de cuisine à induction	94	0,57	32	0,2	4	0,13	
 Sèche cheveux	187	0,72	28	0,05	7	0,04	
 Télévision	364	0,01	75	0,01	10	0,01	

Source : Afsset, *Effets sanitaires des champs électromagnétiques extrêmement basses fréquences*, Rapport d'expertise collective, mars 2010, Annexe 6 • Données de mesure Supélec, p. 137 à 163 www.anses.fr/sites/default/files/documents/AP2008et0006Ra.pdf



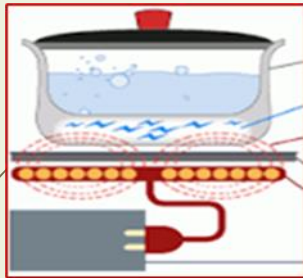
Limite légale
87 V/m et 6,25 μ T
Source ANFR

<https://www.anfr.fr>



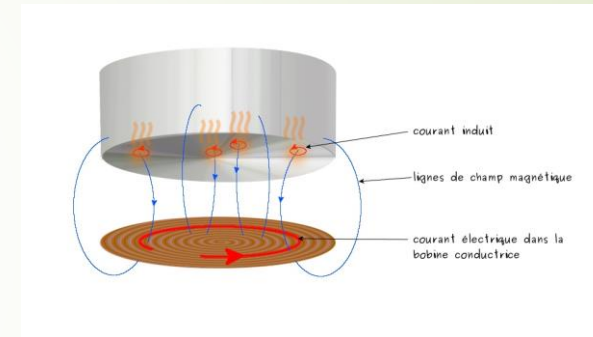
La plaque à induction

Application directe des courants de Foucault



La plaque à induction utilise les effets des courants induits (25 kHz) dans le fond d'une casserole en cuivre (ou alliage proche)

Rendement 80 à 90 %



A une distance de 30 cm, la valeur limite de référence de $6,25 \mu\text{T}$ est respectée pour tous les modèles

Limite légale
 87 V/m et $6,25 \mu\text{T}$
Source ANFR

<https://www.anfr.fr>



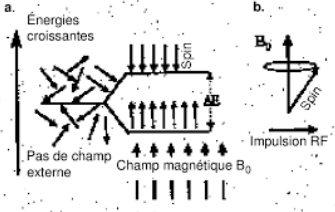
L'IRM - imagerie par résonance magnétique

Utilise les champs et pas (peu) les ondes à l'opposé de l'échographie, le scanner ou la scintigraphie

La **résonance magnétique nucléaire** utilise le couplage du **spin** de certains noyaux atomiques (^1H , ^{13}C , ^{17}O , ^{19}F , ^{31}P , ^{129}Xe ...), avec un champ magnétique externe puissant. Sans champ magnétique, les spins des atomes ont des orientations désordonnées dans l'espace.



- L'imagerie est basée sur 3 étapes :
- Application d'un champ magnétique constant et puissant
 - Superposition d'un champ magnétique alternatif de fréquence élevée
 - Arrêt du champ magnétique alternatif et relaxation des spins avec émission de rayonnement dont les caractéristiques dépendent de l'environnement des noyaux



spins
odique de
ession des spins
relaxation des
dont les

Résonance magnétique nucléaire (RMN)

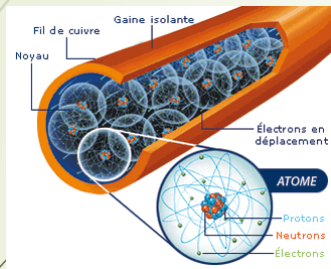
Champ magnétique d'un appareil IRM 3 à 10
Teslas

En résumé

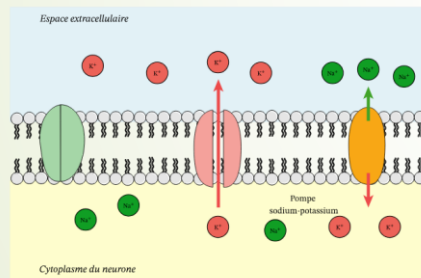
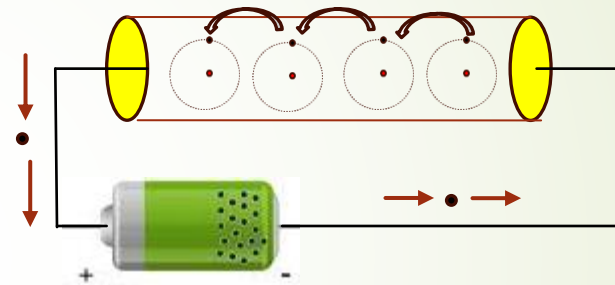
25

- Les champs électriques et magnétiques émis par les courants continus ou alternatifs de basse fréquence (50Hz) sont découplés. Leurs effets peuvent être étudiés séparément
- Les courants alternatifs de basse fréquence sont sources de champs électriques proportionnels à la tension (volts) et sources de champs magnétiques proportionnels à l'intensité (ampères). Ils décroissent très vite avec la distance.
- Les lignes à très haute tension créent à leur proximité des champs magnétiques dépassant les normes
- **Les appareils électroménagers sont sources de champs faibles ou très faibles**

Le système nerveux humain est basé sur des phénomènes électriques ; mais n'est pas le siège de courants analogues à ceux du réseau électrique.

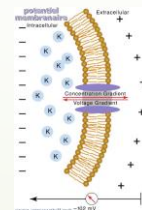
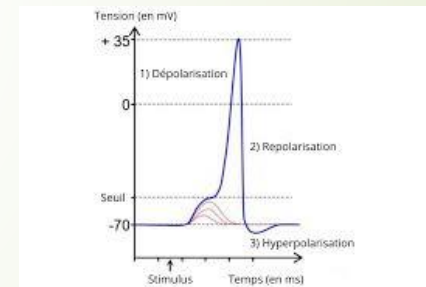


Courant = déplacement d'électrons dans un conducteur



Membranes cellulaires = transferts d'ions

Influx nerveux = échanges locaux et temporaires d'ions → inversion de la polarité



Natures différentes, mais un champ électrique (classique !) peut perturber le fonctionnement du corps humain

Le corps humain : source de champs magnétique ou électrique ?

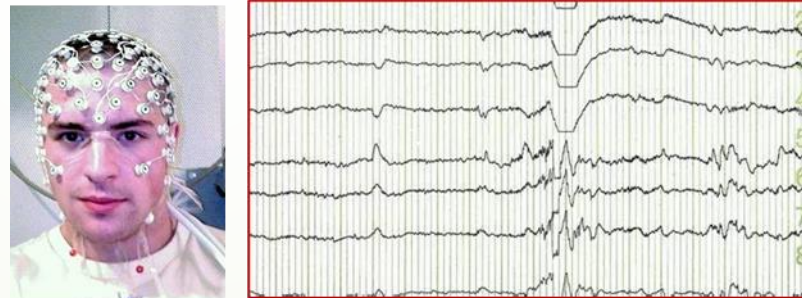
Champ magnétique :

« courants » d'intensités très faibles → le cerveau source de champs magnétiques extrêmement faibles
(10 000 fois plus faibles que celui d'un grille-pain)

Champ électrique :

Potentiels très faibles (de l'ordre du 1/1 000 de volt) → le cerveau source de champs électriques très faibles, mais détectables

Addition des signaux électriques d'un groupe local de nombreux neurones (de l'ordre du millivolt)



Électro encéphalogramme (source Wikipédia)

- Les champs électriques et magnétiques émis par les courants continus ou alternatifs de basse fréquence (50Hz) sont découplés. Leurs effets peuvent être étudiés séparément
- Les courants alternatifs de basse fréquence sont sources de champs électriques proportionnels à la tension (volts) et sources de champs magnétiques proportionnels à l'intensité (ampères). Ils décroissent très vite avec la distance.
- Les lignes à très haute tension créent à leur proximité des champs magnétiques dépassant les normes
- Les appareils électroménagers sont sources de champs faibles ou très faibles
- **Le corps humain est le siège de phénomènes électriques sources de champ électromagnétiques très faibles, mais détectables pour les applications médicales**

Les effets des champs électrique et/ou magnétique

Mesurer le champ électrique ou le champ magnétique:
courant continu ou alternatif 50 Hz



Pour les champs alternatifs :
valeur efficace
 $\text{valeur}_{\text{eff}} = (\text{valeur absolue max}) / \sqrt{2}$

(Le courant « 230 volts » alternatif à une tension maximale de 325 volts)

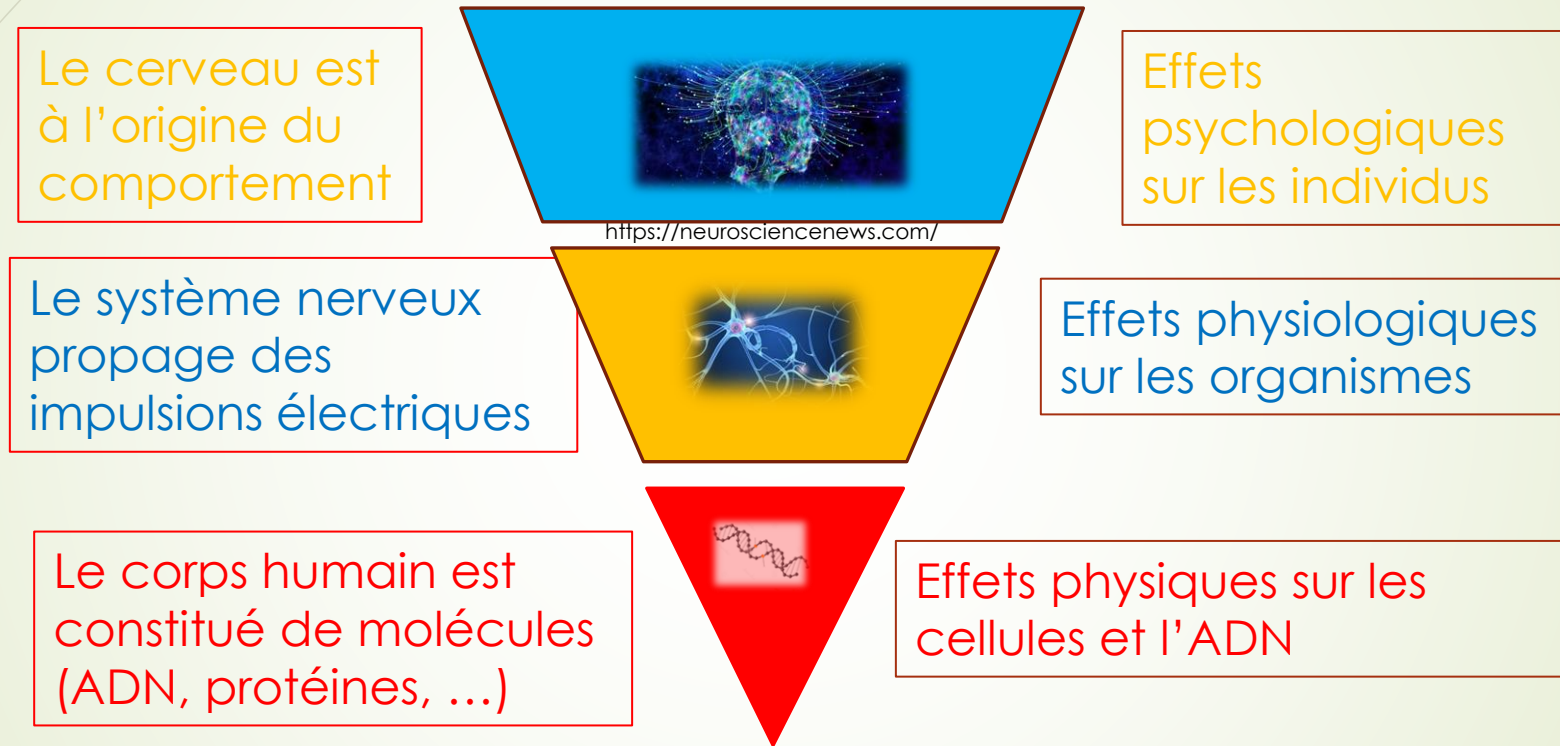
Champ lentement variable



Electromagnétique et bruit (Android)



Les 3 niveaux d'effets potentiels sur un organisme vivant



Valeur limite d'exposition – Champ magnétique

100 mA/m ²	Observation de la valeur du courant induit dans le corps humain qui entraîne une stimulation des tissus excitables (muscles, nerfs)
10 mA/m ²	Application d'un facteur de 10 pour la protection des travailleurs
2 mA/m ²	Application d'un facteur supplémentaire de 5 pour la protection de la population générale
champ interne/ champ externe	Modélisation mathématique pour déterminer le champ magnétique externe qui peut induire le courant électrique dans le corps humain à la fréquence de 50 Hz
valeur limite 100 µT	Valeur limite de 100 µT pour la protection de la population générale à 50 Hz

Voir le site ANSES.fr

Effets physiques ?

Électrisation

Effets d'un courant parcourant le corps humain

Electrocution

Electrisation entraînant le décès

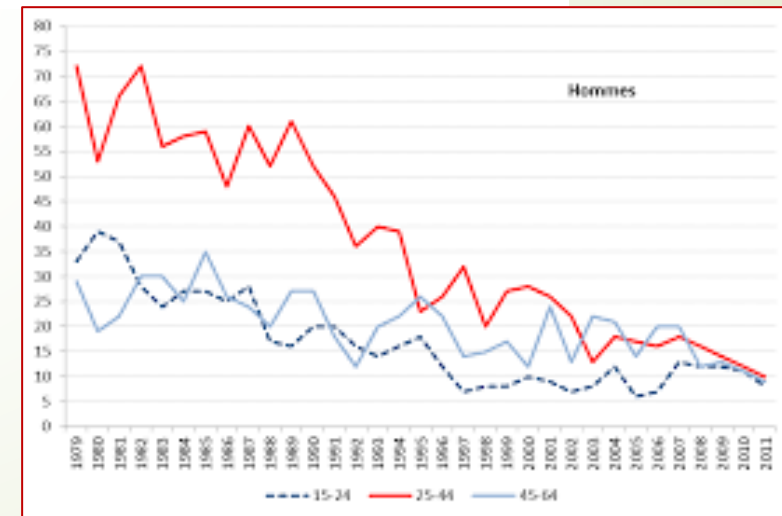
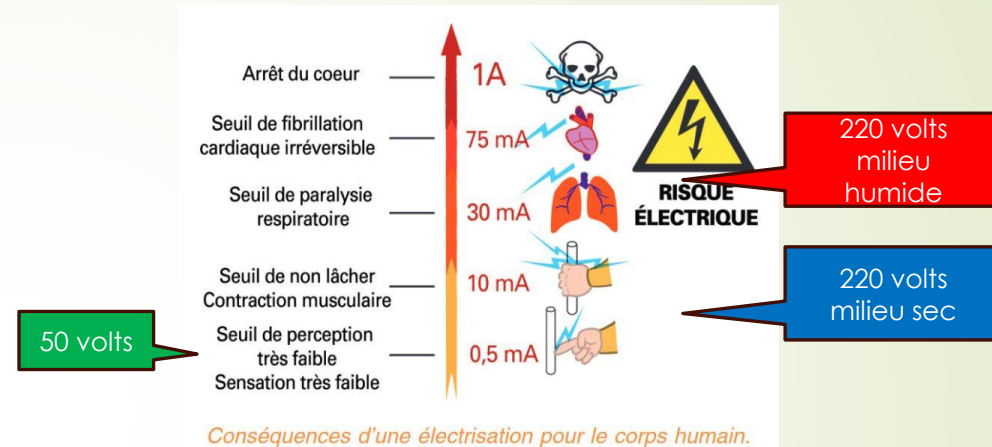
Électrisation = courant électrique alternatif parcourant le corps à la suite d'un **contact avec un fil électrique ou arc électrique**

Courant continu → effet off/on, effet joule – brûlures, lésions nerveuses ou cellulaires

50 Hz → En plus, tétanisation musculaire ou projection (seuil 4 à 5 fois plus bas que le continu)

Les courants induits à distance par un champ électrique ou magnétique atteignent rarement des valeurs critiques

Les courants induits - dans la vie courante (habitations, bureaux) - sont faibles et n'ont aucun effet physique direct



- Les champs électriques et magnétiques émis par les courants continus ou alternatifs de basse fréquence (50Hz) sont découplés. Leurs effets peuvent être étudiés séparément
- Les courants alternatifs de basse fréquence sont sources de champs électriques proportionnels à la tension (volts) et sources de champs magnétiques proportionnels à l'intensité (ampères). Ils décroissent très vite avec la distance.
- Les lignes à très haute tension créent à leur proximité des champs magnétiques dépassant les normes
- Les appareils électroménagers sont sources de champs faibles ou très faibles
- Le corps humain est le siège de phénomènes électriques sources de champ électromagnétiques très faibles, mais détectables pour les applications médicales
- **Les effets physiques des champs électromagnétiques de la vie quotidienne sont négligeables**

La **magnétoréception** des vertébrés (oiseaux migrateurs) est avérée. Ainsi que l'électroréception de certains poissons. Mécanismes ?

Dyslexie : la stimulation cérébrale réduit les déficits

Par Elena Sender le 22.09.2020 à 10h05 ABONNÉS

Une étude de l'université de Genève démontre que la stimulation cérébrale améliore la précision de lecture chez les adultes atteints de dyslexie.

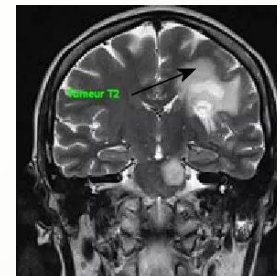


Sciences et Avenir Oct 2020

Expérience de stimulation transcranienne chez des adultes dyslexiques.
SILVIA MARCHESOTTI / UNIGE



IRM à 3 Teslas



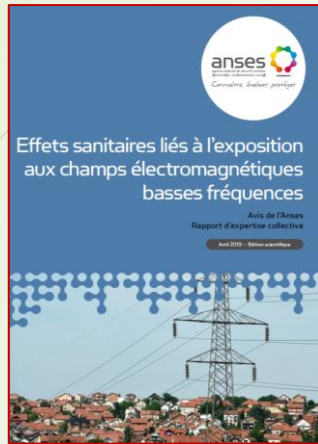
Le cerveau est sensible aux champs -notamment électriques- auquel il est soumis



Résilience du cerveau

- « stimulation des tissus excitables » : 50 000 μT
- Examen par IRM : quelques Teslas (1 000 000 μT)

- Les champs électriques et magnétiques émis par les courants continus ou alternatifs de basse fréquence (50Hz) sont découplés. Leurs effets peuvent être étudiés séparément
- Les courants alternatifs de basse fréquence sont sources de champs électriques proportionnels à la tension (volts) et sources de champs magnétiques proportionnels à l'intensité (ampères). Ils décroissent très vite avec la distance.
- Les lignes à très haute tension créent à leur proximité des champs magnétiques dépassant les normes
- Les appareils électroménagers sont sources de champs faibles ou très faibles
- Le corps humain est le siège de phénomènes électriques sources de champ électromagnétiques très faibles, mais détectables pour les applications médicales
- Les effets physiques des champs électromagnétiques de la vie quotidienne sont négligeables
- **Les champs électromagnétiques peuvent induire des effets physiologiques dans le corps humain (influx nerveux, échanges cellulaires)**



Cliquez sur les images pour avoir accès aux rapports



		Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié chez des modèles				
		Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Éléments de preuve non conclusifs	Absence de données de qualité	Les données disponibles ne montrent pas d'effet
Éléments de preuve de l'existence de l'effet étudié dans les études cliniques et épidémiologiques	Éléments de preuve suffisants pour conclure à l'existence d'un effet	Effet avéré pour l'Homme				
	Éléments de preuve limités pour conclure à l'existence d'un effet	Effet probable pour l'Homme	Effet possible pour l'Homme			
	Éléments de preuve non conclusifs	Effet possible pour l'Homme	Les données disponibles ne permettent pas de conclure à l'existence ou non de l'effet étudié			Probablement pas d'effet chez l'Homme
	Absence de données de qualité					
	Les données disponibles ne montrent pas d'effet					

Leucémie infantile
Enfants de moins de 5 ans habitant à moins de 50 m d'une ligne HT

Cancer du sein, tumeurs cérébrales, sclérose en plaques
(ne permettent pas de conclure effet ou non)

Leucémie infantile : 45 cas/an pour 1 million (Inserm)

<https://www.anfr.fr>

« Aux niveaux d'exposition rencontrés en population générale à la fréquence du réseau électrique, aucun effet sanitaire n'est actuellement considéré comme causalement établi ». (rapport Anses)



Électrosensibilité



« En l'état actuel des connaissances, il n'existe pas de preuve expérimentale solide permettant d'établir un lien de causalité entre l'exposition aux champs électromagnétiques et les symptômes décrits par les personnes se déclarant EHS »

- ANSES (mars 2018)

Ouest-France 30/10/2024



Une ferme :



• Des bâtiments métalliques



• du
Terre
acide
ur du

- Les champs électriques et magnétiques émis par les courants continus ou alternatifs de basse fréquence (50Hz) sont découplés. Leurs effets peuvent être étudiés séparément
- Les courants alternatifs de basse fréquence sont sources de champs électriques proportionnels à la tension (volts) et sources de champs magnétiques proportionnels à l'intensité (ampères). Ils décroissent très vite avec la distance.
- Les lignes à très haute tension créent à leur proximité des champs magnétiques dépassant les normes
- Les appareils électroménagers sont sources de champs faibles ou très faibles
- Le corps humain est le siège de phénomènes électriques sources de champ électromagnétiques très faibles, mais détectables pour les applications médicales
- Les effets physiques des champs électromagnétiques de la vie quotidienne sont négligeables
- Les champs électromagnétiques peuvent induire des effets physiologiques dans le corps humain (influx nerveux, échanges cellulaires)
- **La présence permanente dans un environnement de champs intenses peut induire des effets physiologiques potentiels : leucémie infantile, comportement animal.**

- La démarche scientifique est-elle crédible ?
 - Il y a-t-il une « vérité » scientifique ?
 - Quel est le rôle de l'opinion ?

Pour aller plus loin sur les ondes et les relations entre science et société?

Des vidéo conférences sur la chaîne YouTube : [la Science de Bernie](#)



Mon blog <https://un-peu-de-physique.fr/>
Des cours, des ressources...

Des podcasts sur Spotify : [La science de Bernie](#)



Des cours en ligne ou présentiels à l'Université
Permanente de Nantes : <https://up.univ-nantes.fr/>