

Guillaume BLANC
& Camille Noûs

Physique et enjeux
de société

[https://doi.org/10.53480/
physique-societe.b046](https://doi.org/10.53480/physique-societe.b046)

Université Paris Cité

Publié sous licence
Creative Commons CC BY

© Guillaume BLANC 2023



Ouvrage publié sous licence Creative Commons Attribution License CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve que la publication originale soit correctement citée : BLANC Guillaume & Noûs Camille, *Physique et enjeux de société* (Université Paris Cité, 2023). <https://doi.org/10.53480/physique-societe.b046>

La licence CC BY s'applique à l'ensemble de l'ouvrage sauf mentions contraires.

- La licence CC BY ne s'applique pas aux images reproduites avec la permission d'un tiers et soumises au droit d'auteur. Les images concernées sont identifiables par la mention en légende, du symbole © suivi de la désignation de l'ayant droit.
- Si une image est soumise à un autre régime de licence, celui-ci est mentionné en légende.

	https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/
	https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/
	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/
	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
CC0 (domaine public)	https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/
Licence Ouverte	https://www.etalab.gouv.fr/licence-ouverte-open-licence/

Note de l'éditeur : ce manuel comporte un ensemble d'hyperliens vers des pages de sites internet. Leur validité ainsi que l'accès aux informations correspondantes ont été contrôlés en date du 1er février 2023.

Chapitre 5

Ondes électromagnétiques et santé

BLANC Guillaume & Noûs Camille, Ondes électromagnétiques et santé, in *Physique et enjeux de société* (Université Paris Cité, 2023). <https://doi.org/10.53480/physique-societe.d2f159>



L'objectif de ce chapitre est de comprendre comment les ondes électromagnétiques non ionisantes interagissent avec la matière et avec le corps humain, pour faire le point sur les risques pour la santé.

5.1 Rappels de physique des ondes électromagnétiques

5.1.1 Équations de Maxwell dans le vide en régime variable

Les équations de Maxwell (élaborées entre 1865 et 1884) synthétisent les découvertes expérimentales en électricité et magnétisme depuis le début du XIX^e siècle. Elle font également le lien entre les sources du champ électromagnétique (distributions de charges et de courants) et le champ lui-même qui est une combinaison des champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{B} .

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (5.1)$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (5.2)$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (5.3)$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (5.4)$$

où :

\vec{E} est le champ électrique ;

\vec{B} est le champ magnétique ;

ρ est la densité volumique de charge ;

ε_0 est la permittivité diélectrique du vide ;

μ_0 est la perméabilité magnétique du vide ;

\vec{j} est la densité de courant électrique.

Les deux premières équations traduisent les propriétés intrinsèques du champ électromagnétique. Les deux suivantes expriment le lien entre les champs électrique \vec{E} et magnétique \vec{B} et leurs sources respectives, les charges électriques ρ et le courant électrique \vec{j} .

5.1.2 Équation de propagation d'une onde

L'équation de propagation des ondes ou équation de d'Alembert (à une dimension), pour une grandeur scalaire $s(x, t)$, s'écrit :

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 s}{\partial t^2} = 0 \quad (5.5)$$

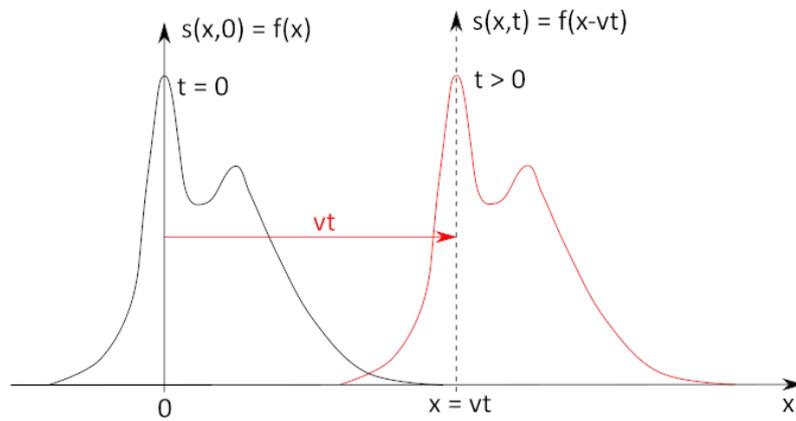


FIGURE 5.1 – Illustration de la propagation d’une onde progressive. Le profil à $t = 0$ est dessiné en noir. Au bout d’une durée t , le profil (en rouge) s’est traduit dans la direction des x croissants d’une distance vt .

Une solution générale de cette équation peut s’écrire :

$$s(x, t) = f\left(t - \frac{x}{v}\right) + g\left(t + \frac{x}{v}\right) \quad (5.6)$$

$f\left(t - \frac{x}{v}\right)$ représente une onde progressive, c’est-à-dire qui se déplace vers les x croissants. En effet, pour une valeur $t - \frac{x}{v}$ constante, lorsque t augmente, il faut que x augmente également (figure 5.1). Inversement, $g\left(t + \frac{x}{v}\right)$ représente une onde régressive, se propageant vers les x décroissants.

Une perturbation (dans le temps) – c’est-à-dire une petite variation – du champ électrique \vec{E} engendre une perturbation du champ magnétique \vec{B} , qui engendre à son tour une perturbation du champ \vec{E} : une perturbation du champ électromagnétique (\vec{E} , \vec{B}) se propage ainsi de proche en proche.

De fait, le champ électrique et le champ magnétique vérifient l’équation de propagation des ondes :

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad \text{et} \quad \nabla^2 \vec{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (5.7)$$

où c est la vitesse de propagation de l’onde :

$$c = (\mu_0 \varepsilon_0)^{-1/2} \quad (5.8)$$

qui n’est autre que la vitesse de la lumière dans le vide : $c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Cette relation traduit le lien entre électricité, magnétisme et vitesse de la lumière.

Les équations de Maxwell permettent de montrer que l’on a un couplage entre les deux champs, électrique et magnétique :

$$\vec{B} = \frac{1}{c} \vec{u} \wedge \vec{E} \quad (5.9)$$

et :

$$\vec{E} = -c \vec{u} \wedge \vec{B} \quad (5.10)$$

où \vec{u} est le vecteur unitaire de la direction de propagation de l’onde électromagnétique.

5.1.3 Énergie d’une onde électromagnétique

La puissance rayonnée par un champ électromagnétique à travers une surface fermée S est donnée par :

$$\mathcal{P}_{\text{rayonnée}} = \oiint_S \vec{\Pi} \cdot d\vec{S} \quad (5.11)$$

où $\vec{\Pi}$ est le vecteur de Poynting dont l'expression est :

$$\vec{\Pi} = \vec{E} \wedge \frac{\vec{B}}{\mu_0} \quad (5.12)$$

Par ailleurs, la densité volumique d'énergie électromagnétique est donnée par :

$$w = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (5.13)$$

5.1.4 Spectre électromagnétique

Le tableau 5.1 montre les différents domaines du spectre électromagnétique avec les domaines de fréquences, de longueurs d'onde et d'énergie des photons correspondants.

Voici quelques fréquences pour divers appareils et technologies d'utilisation courante :

- Lignes très haute tension : 50 Hz
- Appareils électroménagers : 50 Hz
- Wifi : 2,4 GHz et 5 GHz
- Téléphonie mobile (téléphone et antennes relais) : 2G = 900 MHz et 1800 MHz, 3G = 2100 MHz et 900 MHz, 4G = 2600 MHz et 800 MHz, 5G = 3,5 GHz et 26 GHz en plus des fréquences de la 2G, de la 3G et de la 4G
- Radio FM : 100 MHz
- Four à micro-ondes : 2,4 GHz

5.2 Antennes : l'émission des ondes électromagnétiques

5.2.1 Dipôle oscillant

Considérons une charge électrique ponctuelle $-q$ fixe à l'origine O des coordonnées, et une charge $+q$ qui se déplace sur l'axe Oz avec un mouvement rectiligne sinusoïdal de pulsation ω : $z(t) = z_0 \cos(\omega t)$. On a ainsi un dipôle électrique oscillant de moment dipolaire $\vec{p} = q z(t) \vec{e}_z$.

Dans la région de l'espace où $r \gg \lambda = 2\pi c/\omega$, on montre que les champs \vec{E} et \vec{B} s'écrivent :

$$\vec{E}(r) = -\frac{\omega^2 \mu_0 q z_0 \sin \theta}{4\pi r} \cos\left[\omega\left(t - \frac{r}{c}\right)\right] \vec{e}_\theta \quad (5.14)$$

$$\vec{B}(r) = \vec{e}_r \wedge \frac{\vec{E}(r)}{c} \propto \vec{e}_\varphi \quad (5.15)$$

où (r, θ, φ) sont les coordonnées sphériques et $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_\varphi)$ est le trièdre de vecteurs unitaires des coordonnées sphériques.

On obtient ainsi une onde électromagnétique qui se propage perpendiculairement au plan $(\vec{e}_\theta, \vec{e}_\varphi)$, donc dans la direction radiale selon \vec{e}_r . L'amplitude des deux champs électrique et magnétique décroît comme $1/r$. Les champs \vec{E} et \vec{B} sont orthogonaux, dans le plan $(\vec{e}_\theta, \vec{e}_\varphi)$, perpendiculaires à la direction de propagation. Le champ électromagnétique a *localement* une structure d'onde plane progressive. Il rayonne de manière *anisotrope*, avec une forme dans l'espace selon $\sin \theta$, donc avec une amplitude nulle selon l'axe du dipôle et maximale dans la direction perpendiculaire : il s'agit du « lobe de rayonnement ». Ce modèle du dipôle oscillant rayonnant un champ électromagnétique représente le principe de base de l'émission par une antenne.

Désignation	Fréquence	Longueur d'onde	Énergie	Applications
Non ionisant				
Fréquences extrêmement basses (ELF)	0–300 Hz	10^5 – 10^3 km	12,4 feV – 1,24 peV	Réseau électrique 50 Hz, électroménager
Fréquences audio (VF)	0,3–3 kHz	1000–100 km	1,24–12,4 peV	Transmission de données vocales, métallurgie, chauffage par induction
Très basses fréquences (VLF)	3–30 kHz	100–10 km	12,4–124 peV	Radiocommunications
Basses fréquences (LF)	30–300 kHz	10–1 km	0,124–1,24 neV	Radiodiffusion GO, fours à induction, plaques à induction
Fréquences moyennes (MF)	0,3–3 MHz	1 km – 100 m	0,124–12,4 neV	Radiodiffusion MO, PO, diathermie médicale
Hautes fréquences (HF)	3–30 MHz	100–10 m	12,4–124 neV	CB (<i>citizen band</i> - 27 MHz), soudure, collage
Très hautes fréquences (VHF)	30–300 MHz	10–1 m	0,124–1,24 μ eV	Télévision, radio FM
Fréquences ultrahautes (UHF)	0,3–3 GHz	1–0,1 m	1,24–12,4 μ eV	Télévision, radars, téléphonie mobile, fours à micro-ondes (2,4 GHz), hyperthermie médicale
Fréquences superhautes (SHF)	3–30 GHz	100–10 cm	12,4–124 μ eV	Radars, alarmes anti-intrusion
Fréquences extrêmement hautes (EHF)	30–300 GHz	10–1 cm	0,124–1,24 meV	Radars, communications par satellite, scanner corporel
Infrarouge (IR)	0,3–385 THz	1 mm – 780 nm	1,24 meV – 1,6 eV	Spectrométrie IR, chauffage
Visible	385–750 THz	780–400 nm	1,6–3,1 eV	Vision humaine, photosynthèse
Ionisant				
Ultraviolet (UV)	750 THz – 3 PHz	400–100 nm	3,1–12,4 eV	Lampes germicides, solarium
Rayon X	3 PHz – 30 EHz	100 nm – 10 pm	12,4 eV – 124 MeV	Radiographie, cristallographie
Rayon γ	> 30 EHz	< 10 pm	> 124 MeV	Radioactivité, gammagraphie (bâtiment)

TABLE 5.1 – Les différents domaines du spectre électromagnétique.

5.2.2 Puissance rayonnée par un dipôle oscillant

Avec les expressions des deux champs rayonnés (5.15), le vecteur de Poynting (5.12) s'écrit :

$$\vec{\Pi} = \frac{E^2}{\mu_0 c} \vec{e}_r \quad (5.16)$$

La densité surfacique de puissance moyenne rayonnée est donnée par :

$$\frac{dP}{dS} = \left\langle \|\vec{\Pi}\| \right\rangle_t = \frac{(qz_0)^2}{32\pi^2 \varepsilon_0} \frac{\omega^4 \sin^2 \theta}{c^3 r^2} \quad (5.17)$$

soit :

$$\frac{dP}{dS} \propto \frac{1}{\lambda^4} \frac{\sin^2 \theta}{r^2} \quad (5.18)$$

Donc :

- la puissance surfacique décroît en $1/r^2$;
- elle varie en ω^4 (*i.e.* en $1/\lambda^4$), ce qui permet d'expliquer le bleu du ciel (sous l'action du champ électrique du rayonnement solaire, les électrons des atomes de l'atmosphère oscillent comme un *dipôle*).

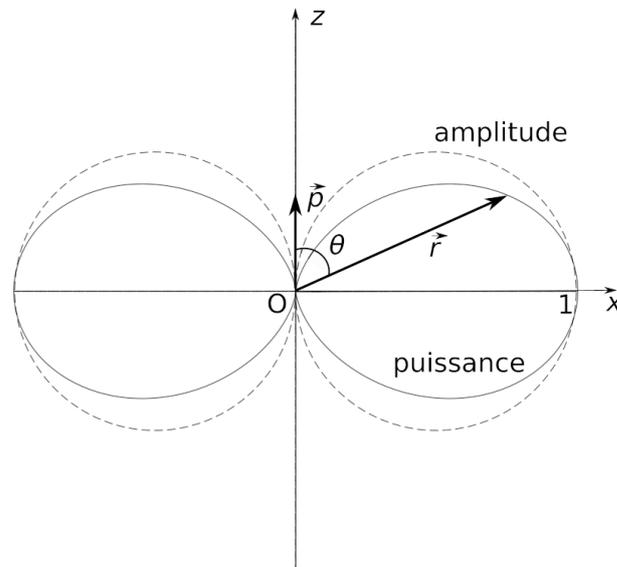


FIGURE 5.2 – Diagramme de rayonnement (distribution angulaire) d'un dipôle situé sur l'axe Oz , de moment dipolaire \vec{p} . L'amplitude est en $\sin \theta$ et représentée en traits tiretés; la puissance est en $\sin^2 \theta$ et représentée en trait plein. Il y a une symétrie de révolution autour de l'axe Oz .

5.2.3 Principe de fonctionnement d'une antenne

Un courant sinusoïdal dans un conducteur engendre un déplacement de charges (les électrons) selon le modèle précédent du dipôle. Un conducteur dans lequel circule un tel courant va donc rayonner un champ électromagnétique. On a ainsi un *émetteur*.

Inversement, un champ électromagnétique qui rencontre un conducteur va induire un déplacement de charges à l'intérieur de celui-ci, et donc un courant. On a donc un *récepteur*.

Il existe une multitude d'antennes en fonction de la fréquence du signal que l'on souhaite émettre, et de la directivité que l'on souhaite : *une antenne isotrope est un objet idéal qui n'existe pas en pratique*.

La figure 5.2 montre la distribution angulaire (diagramme de rayonnement) de l'intensité et de la puissance du rayonnement d'un dipôle.

5.2.4 Exemple de l'antenne relais de la téléphonie mobile

Les antennes relais de la téléphonie mobile quadrillent désormais le territoire¹. Elles ressemblent à celles présentées en figure 5.3.

La figure 5.4 montre le résultat d'une simulation numérique pour la puissance émise et le champ électrique d'une antenne relais de la téléphonie mobile, située sur le toit d'un immeuble. La figure 5.4b montre qu'à l'intérieur des bâtiments la puissance est atténuée d'environ -60 dBm², soit un facteur $\sim 10^6$, obtenu essentiellement par la disposition géométrique³. Au niveau du sol, 13 m sous l'antenne, les réflexions multiples sur les façades font que la

1. La localisation et les caractéristiques techniques de chaque antenne peuvent être consultées sur le site de l'Agence Nationale des Fréquences : <https://www.cartoradio.fr> ou sur <https://www.antennesmobiles.fr/> pour une présentation différente des mêmes données.

2. dBm est le rapport de puissances en décibels mesurées en mW :

$$x \text{ dBm} = 10 \log \frac{P}{1 \text{ mW}}$$

Donc 0 dBm correspond à une puissance de 1 mW.

3. La simulation considère des bâtiments aux murs de béton de 75 cm d'épaisseur, présentant une atténuation de 13 dB sous incidence normale à 900 MHz.

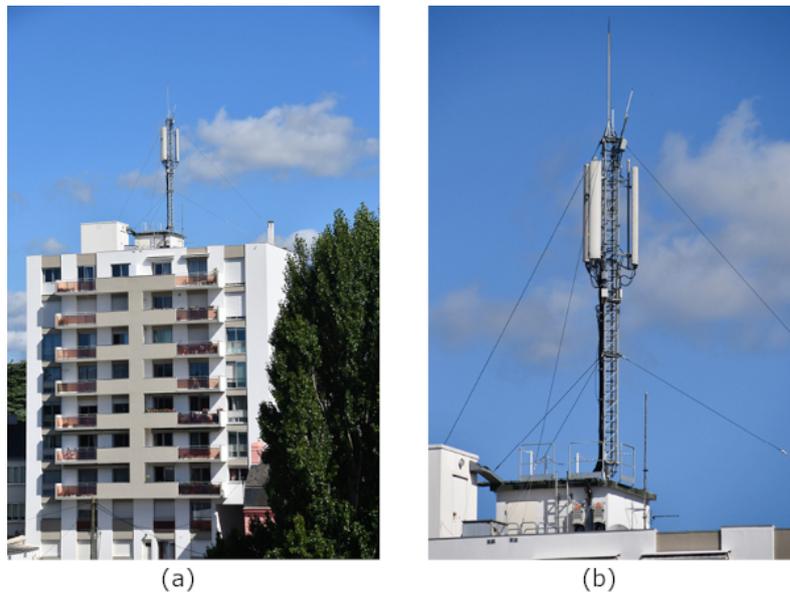


FIGURE 5.3 – Photos d'une antenne relais de téléphonie mobile sur le toit d'un immeuble. Antenne de l'opérateur Orange à Lorient. (a) Antenne relais de téléphonie mobile sur le toit d'un immeuble. (b) Gros plan. Crédit photos : Guillaume Blanc.

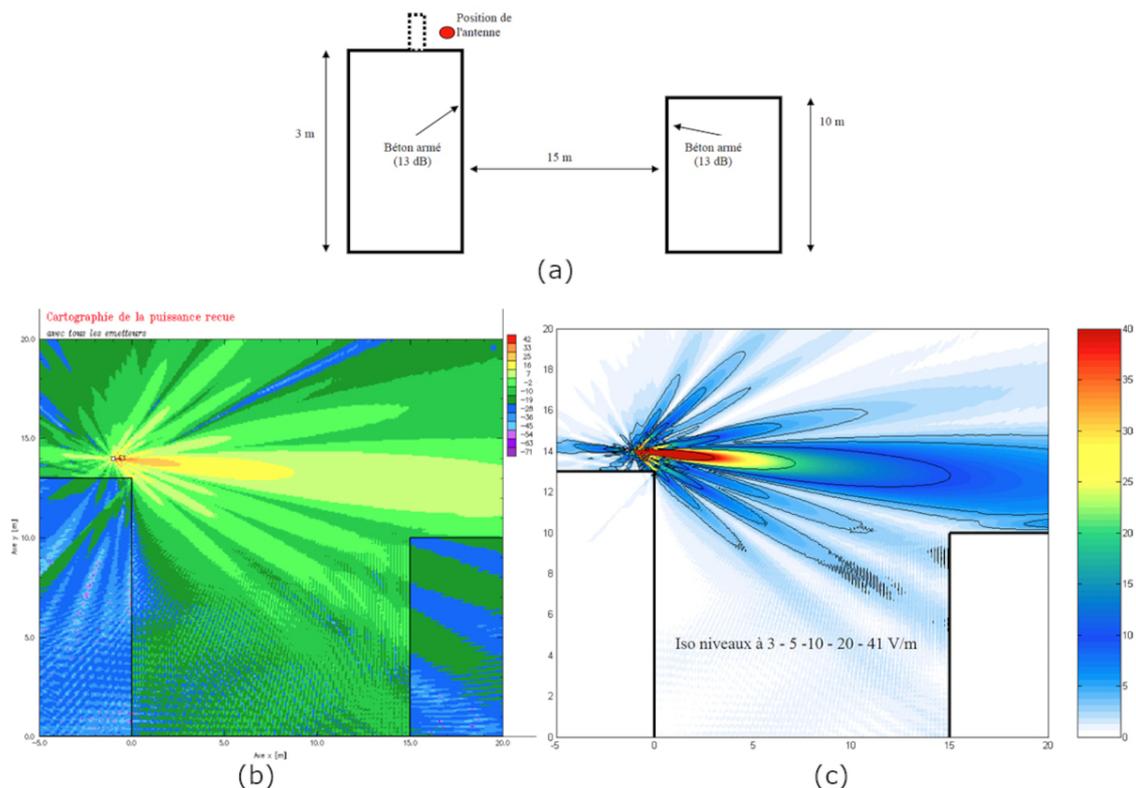


FIGURE 5.4 – Simulation de la carte d'émission d'une antenne relais placée sur le toit d'un immeuble. (a) Configuration géométrique de la simulation. (b) Simulation de la carte de puissance reçue. La puissance est exprimée en décibels (dBm), où $x \text{ dBm} = 10 \log \frac{P}{1 \text{ mW}}$. La puissance de l'antenne est de 43 dBm, soit 20 W. On note que 7 dBm = 5 mW. (c) Simulation de la carte du champ électrique. Tiré de Penneç (2001). © ANFR.

puissance est quasiment uniforme de l'ordre de -10 dBm, soit une réduction de -53 dBm par rapport à la source (facteur $\sim 10^5$ soit $0,2$ mW!). Compte tenu du caractère directionnel de l'émission d'une antenne (lobe), le bâtiment situé *sous* l'antenne reçoit un rayonnement négligeable.

Les valeurs limites d'exposition du public dans la réglementation française⁴ sont de :

- 36 V/m à 700 MHz (téléphonie mobile 4G)
- 39 V/m à 800 MHz (téléphonie mobile 4G)
- 41 V/m à 900 MHz (téléphonie mobile 2G et 3G)
- 58 V/m à 1800 MHz (téléphonie mobile 2G et 4G)
- 61 V/m à 2100 MHz (téléphonie mobile 3G)
- 61 V/m à 2600 MHz (téléphonie mobile 4G)
- 28 V/m pour un émetteur de radiodiffusion
- 31 à 41 V/m pour un émetteur de télédiffusion

Le diagramme d'émission de la figure 5.4c montre que, dans ce cas précis, la réglementation est respectée même à proximité immédiate de l'antenne, dans le cas d'une antenne relais.

5.3 Interaction des ondes électromagnétiques avec la matière

5.3.1 Champ proche et champ lointain

À proximité immédiate d'une antenne ou d'une source d'ondes électromagnétiques, la structure du champ est compliquée, c'est pourquoi on se place généralement dans « l'approximation de champ lointain », ce qui permet de faciliter les calculs. C'est-à-dire pour une distance d :

$$d > \frac{\lambda^2}{2A} \quad (5.19)$$

où λ est la longueur d'onde et A est la taille de l'antenne. Dans la plupart des cas, cette approximation est valable; sauf dans le cas des téléphones mobiles quand ils sont proches de l'oreille... La modélisation étant délicate, on effectue alors des mesures.

5.3.2 Interaction avec les matériaux

Dans les matériaux électriquement isolants, la pénétration des ondes électromagnétiques dépend de la nature du matériau et de la longueur d'onde. Leur atténuation, en fonction de l'épaisseur, est donnée par :

$$\text{Atténuation} = \exp\left(-\frac{\pi \times \text{épaisseur} \times f \times \tan(\delta)}{c\sqrt{\epsilon_r}}\right) \quad (5.20)$$

où δ est l'angle de perte, caractéristique diélectrique des matériaux isolants, ϵ_r est la permittivité diélectrique relative du matériau⁵, c est la vitesse de la lumière et f la fréquence de l'onde incidente. En pratique les ondes électromagnétiques sont très peu absorbées par les matériaux rencontrés dans les bâtiments (pierre, béton...). De plus, une partie de l'onde est réfléchie, et une partie est transmise, avec les coefficients de réflexion R et de transmission T :

$$R = \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \quad \text{et} \quad T = 1 - R \quad (5.21)$$

4. Voir : <http://www.radiofréquences.gouv.fr/fixer-des-limites-d-exposition-a92.html>.

5. La permittivité ϵ d'un matériau quantifie sa réponse à un champ électrique. Elle dépend du matériau et des caractéristiques du champ électrique. Elle est exprimée relativement à la permittivité du vide, ϵ_0 qui est une constante : $\epsilon_0 = 8,854187 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ selon : $\epsilon = \epsilon_r \times \epsilon_0$. ϵ_r est la permittivité relative du matériau, sans unité. Elle vaut 1 pour le vide (par définition), 2,1 pour du téflon, 5 pour du verre et du PVC, 78 pour de l'eau distillée à basses fréquences.

Les matériaux électriquement conducteurs sont imperméables aux ondes électromagnétiques (qui ont une très faible pénétration, l'« épaisseur de peau » δ ; attention c'est un autre « δ » que l'angle de perte des matériaux isolants!); on peut ainsi écranter un champ électromagnétique. Dans ces matériaux, l'atténuation \mathcal{A} des ondes est donnée par :

$$\mathcal{A} = e^{-\frac{d}{\delta}} \quad \text{avec} \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi f \mu \sigma}} \quad (5.22)$$

où d est la distance à partir de l'interface, δ l'épaisseur de peau, f la fréquence, μ la perméabilité du matériau⁶, σ sa conductivité électrique. Les hautes fréquences pénètrent peu à l'intérieur des conducteurs (pour le cuivre, $\delta = 9,38$ mm à 50 Hz et $\delta = 2,1$ μm à 1 GHz).

Les matériaux étanches aux ondes radio sont ainsi essentiellement les métaux. La cage de Faraday est une enceinte métallique dont les parois atténuent fortement les ondes. Pour les basses fréquences, les parois sont pleines car l'atténuation dépend de l'épaisseur du métal (et de sa conductivité électrique) ainsi que de la fréquence des ondes. Pour les hautes fréquences un grillage suffit, dont la taille de la maille doit être de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. Par exemple, le four à micro-ondes est entouré d'une cage métallique, qui est grillagée sur la porte, afin de pouvoir « voir » à l'intérieur ($\lambda = 12$ cm, grille avec une maille de 1 mm).

5.3.3 Interaction avec la matière vivante

Ordres de grandeurs énergétiques

Les transitions énergétiques entre états quantifiés des atomes et molécules suite à l'absorption d'un photon induisent différents effets selon l'énergie du photon E_γ .

L'énergie d'ionisation d'un atome ou d'une molécule neutre est l'énergie qu'il faut lui fournir pour arracher l'électron le moins lié (première ionisation), ce qui forme ainsi un ion positif. L'énergie de première ionisation⁷ la plus élevée est celle de l'hélium, 24,6 eV, la plus basse est celle du césium, 3,9 eV. Celle de l'hydrogène est de 13,6 eV, celle du carbone est de 11,3 eV. L'énergie d'ionisation s'exprime également en joule par mole ($1 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} = 1,04 \cdot 10^{-2} \text{ eV}$).

Ces énergies correspondent à des longueurs d'onde lumineuses telles que : $E_\gamma = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$, où $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ est la constante de Planck, ν est la fréquence de l'onde lumineuse correspondante et λ sa longueur d'onde, enfin $c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ est la vitesse de la lumière dans le vide. Donc :

$$\lambda = \frac{hc}{E_\gamma} \quad (5.23)$$

Pour des énergies de l'ordre de 10 eV ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$), on obtient :

$$\lambda = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \times 299\,792\,458}{10 \times 1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 120 \text{ nm} \quad (5.24)$$

Il s'agit du domaine électromagnétique des ultraviolets.

6. La perméabilité magnétique d'un matériau caractérise sa réponse à un champ magnétique. Elle s'exprime comme le produit d'une perméabilité relative μ_r , sans dimension, dont la valeur dépend du matériau, et de la perméabilité du vide, μ_0 , constante, qui vaut $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$.

7. Voir la table des énergies d'ionisation : https://fr.wikipedia.org/wiki/énergie_d'ionisation#Valeurs_numériques_des_énergies_d'ionisation

L'énergie de la liaison covalente est l'énergie qu'il faut fournir pour briser une liaison chimique entre deux atomes. Une liaison covalente est une liaison chimique dans laquelle deux atomes se partagent une à trois paires d'électrons. La matière vivante est essentiellement formée de carbone (et d'hydrogène), avec des liaisons covalentes simples de type C – C ou C – H. L'énergie de liaison est généralement donnée sous la forme d'enthalpie de liaison, à savoir l'énergie requise pour briser (ou former) la liaison à pression extérieure constante. La liaison C – H nécessite ainsi $413 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ (soit 4,3 eV) pour être détruite⁸ tandis que la liaison C – C a besoin de $348 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ (soit 3,6 eV); une triple liaison C \equiv C nécessite $839 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ pour être détruite.

Ces énergies correspondent à des longueurs d'onde de 280 à 330 nm, donc au domaine des ultraviolets.

Les liaisons de type hydrogène impliquant des atomes d'hydrogène et des atomes tels que l'oxygène, l'azote ou le fluor sont des liaisons intermoléculaires (comme par exemple dans l'eau) plus fragiles que les liaisons covalentes avec des énergies de liaison entre 0,04 eV et 1,7 eV. Cela correspond à respectivement $30 \mu\text{m}$ (infrarouge) à 690 nm (visible).

Les liaisons de type Van der Waals sont des interactions électrostatiques entre atomes ou molécules dont l'énergie de liaison est typiquement entre 4 (300 μm) et 40 meV (30 μm), donc dans l'infrarouge lointain et le submillimétrique.

Les énergies plus basses de 1 à 10 meV correspondent au domaine électromagnétique du millimétrique. Elles mettent en jeu les excitations des niveaux quantiques vibrationnels et rotationnels des molécules.

Pour les photons d'énergie plus faible (mais de haute fréquence $> 10 \text{ MHz}$ – radiofréquences), on constate un effet Joule (effet thermique) dû à l'agitation des charges et des dipôles au passage de l'onde.

Pour les basses fréquences ($< 100 \text{ kHz}$), le champ électrique est très fortement atténué en pénétrant dans le corps humain qui fait cage de Faraday (facteur d'atténuation de $\sim 25\,000\,000$); le champ magnétique associé génère des courants induits (densité de courant qui s'exprime en $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$).

Pour les fréquences intermédiaires [100 kHz, 10 MHz], il y a coexistence des deux effets.

Le débit d'absorption spécifique (DAS)

Pour les ondes de fréquence supérieure à 100 kHz, typiquement, la puissance absorbée par unité de masse du matériau considéré est définie par le DAS :

$$\text{Débit d'absorption spécifique (DAS)} = \frac{dE_{\gamma}}{dm \times dt} \quad (5.25)$$

ou SAR en anglais, qui s'exprime en $\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Le DAS peut être calculé numériquement à partir de simulations de propagation des ondes et de modèles numériques de corps humains⁹. Il peut être également mesuré, à l'aide d'un protocole très strict et normalisé (Hamada *et al.* 2009), ce que fait par exemple l'Agence Nationale des Fréquences¹⁰ sur les téléphones vendus en France¹¹.

8. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Liaison_chimique

9. Voir par exemple : https://sfrp.asso.fr/wp-content/uploads/2021/05/S3c-Joe_WIART.pdf.

10. ANFR – <https://www.anfr.fr/>

11. Leur base de données de mesures est en ligne ici : <https://data.anfr.fr>.

Densité de courant induit dans le corps humain en mA/m ²	Valeurs des champs magnétiques externes induisant un courant dans le corps humain à 50 Hz en μT	Effets
En dessous de 10	Supérieurs à 500 et jusqu'à 5 000	Effets biologiques mineurs
De 10 à 100	Supérieurs à 5 000 et jusqu'à 50 000	Effets sur le système nerveux et la vision (magnéto phosphènes)
De 100 à 1000	Supérieurs à 50 000 et jusqu'à 500 000	Stimulation des tissus excitables
Au-dessus de 1 000	Supérieurs à 500 000	Fibrillation ventriculaire

FIGURE 5.5 – Effets des courants induits dans le corps humain, pour une fréquence de 50 Hz et différentes intensités du champ magnétique. Tiré de http://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/Champs_electromagnetiques_extremement_basse_frequence_DGS_2014.pdf (INRS 2001).

Le DAS peut être exprimé en fonction de l'amplitude du champ électrique E et en fonction de l'élévation de température T par rapport au temps t selon :

$$DAS = \sigma \frac{E^2}{\rho} = c_p \frac{dT}{dt} \quad (5.26)$$

où σ est la conductivité électrique du matériau (corps humain), ρ est sa densité, c_p est sa capacité thermique massique.

Pour mesurer le DAS (Hamada & Watanabe 2016), on utilise un modèle physique du corps humain (que l'on appelle un « fantôme ») ayant les mêmes propriétés de conductivité électrique, densité, capacité thermique (en première approximation de l'eau, le corps humain étant majoritairement composé d'eau). Et on mesure l'élévation de température avec des sondes de températures à réponse rapide, en évitant de perturber le champ électromagnétique.

5.3.4 Selon les domaines de fréquences

Fréquences extrêmement basses (< 300 Hz)

Il s'agit typiquement des ondes électromagnétiques générées par le courant alternatif de 50 Hz (lignes hautes tensions, appareils électroménagers...).

On ne constate aucune réaction biologique manifeste pour des champs électriques jusqu'à ~ 10 kV/m. Et aucune réaction biologique pour des champs magnétiques à 50/60 Hz jusqu'à ~ 1 mT (voir figure 5.5).

5.3.5 Fréquences intermédiaires [100 kHz, 10 MHz]

Par exemple :

- la cuisson par induction (20-50 kHz);
- la radiodiffusion (ondes longues – GO – et ondes moyennes – OM);
- les ampoules fluocompactes basse consommation.

Les technologies employées respectent les normes de limites d'exposition. On constate une absence d'effet aigu sur la santé (avec un recul de plusieurs décennies pour la radio!).

5.3.6 Radiofréquences [10 MHz, 300 GHz]

Par exemple :

- la radiodiffusion FM/TV (TNT);
- les communications sans fil (téléphonie mobile, wifi, etc.).

À ces fréquences, les ondes électromagnétiques interagissent avec l'eau des tissus biologiques. La polarisation des molécules d'eau fait qu'elles vont « suivre » l'orientation du champ électrique oscillant, les frottements intermoléculaires vont générer une élévation de température. C'est le principe de chauffage du four à micro-ondes (voir section 5.5).

Les modélisations théoriques couplées aux recherches expérimentales sur diverses espèces (autres que l'humain), montrent qu'avec des expositions résultant d'un DAS moyen pour l'ensemble du corps d'environ $6 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, dans la gamme de fréquences de 100 kHz à 6 GHz, pendant au moins une heure dans des conditions thermiquement neutres (28 °C, nu, au repos), sont nécessaires pour induire une augmentation de 1 °C de la température du corps chez les adultes humains. Un DAS plus élevé est nécessaire pour atteindre cette élévation de température chez les enfants en raison de leur dissipation thermique plus efficace. Cependant, étant donné le peu de données de mesure disponibles, la Commission internationale sur la protection des rayonnements non-ionisants (ICNIRP¹²) a adopté une position conservatrice et utilise $4 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ en moyenne sur 30 minutes comme niveau d'exposition à ces ondes électromagnétiques correspondant à une élévation de la température du corps de 1°C (ICNIRP 2020).

Notons que la thermorégulation du corps humain est très efficace. À titre de comparaison, un adulte humain génère une puissance d'environ $1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ au repos, près de $2 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ en position debout et environ 10 à $12 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ en courant (ICNIRP 2020).

À mesure que la fréquence des ondes augmente, l'exposition du corps et l'échauffement qui en résulte deviennent plus superficiels et, au-dessus d'environ 6 GHz, cet échauffement se produit principalement dans la peau.

La limite légale (voir le tableau 5.2) du DAS est donc : $\text{DAS} < 2 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ (pour la tête et le tronc). Actuellement, la majorité des smartphones ont un $\text{DAS} < 1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Les normes actuelles ne prennent en compte que les effets thermiques, comme nous venons de le voir. Les effets cancérigènes à long terme en sont exclus. Pour le moment aucune étude épidémiologique sérieuse (voir section 5.6) ne permet d'établir un risque significatif avéré pour la santé humaine dans des conditions normales d'utilisation. Néanmoins, quelques études ayant observé un éventuel excès de risque suite à de fortes et longues expositions, le CIRC¹³

12. L'ICNIRP a pour objectif de protéger les personnes et l'environnement contre les effets néfastes des rayonnements non ionisants. À cette fin, l'ICNIRP élabore et diffuse des conseils fondés sur des données scientifiques pour limiter l'exposition aux rayonnements non ionisants (<https://www.icnirp.org/>).

13. Le CIRC est le Centre International de Recherche sur le Cancer. C'est une agence de recherche sur le cancer de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), basée à Lyon. Ses missions sont de coordonner et de mener des recherches sur les causes du cancer chez l'être humain, sur les mécanismes de la cancérogenèse et d'élaborer des stratégies scientifiques de lutte contre le cancer. Dans ce cadre, il identifie les facteurs environnementaux et professionnels susceptibles d'accroître le risque de cancer chez l'homme en les classifiant. Des groupes de travail interdisciplinaires composés d'experts scientifiques internationaux examinent les études publiées sur un agent et évaluent le degré d'indication de cancérogénicité qu'il présente. Pour cela, ils s'appuient sur un ensemble de principes, de procédures et de critères scientifiques décrits dans les monographies du CIRC. Le CIRC examine la cancérogénicité éventuelle de produits chimiques, de mélanges complexes de substances, d'expositions professionnelles, d'agents physiques et biologiques et de facteurs comportementaux. On utilise le terme d'agent pour désigner l'ensemble. Le CIRC définit 3 groupes (de 1 à 3) correspondant à des degrés d'indication de cancérogénicité pour l'être humain. Le deuxième est subdivisé en groupe 2A et 2B. Ces groupes sont les suivants :

- Groupe 1 : agent cancérogène (parfois appelé cancérogène avéré ou cancérogène certain) pour l'homme ;
- Groupe 2A : agent probablement cancérogène pour l'homme ;
- Groupe 2B : agent peut-être cancérogène (parfois appelé cancérogène possible) pour l'homme ;
- Groupe 3 : agent inclassable quant à sa cancérogénicité pour l'homme.

Source : <https://www.cancer-environnement.fr/fiches/publications-du-circ/classification-des-substances-cancerogenes/>

	DAS moyen dans le corps	DAS tête et tronc	Texte législatif
Effet établi	$4 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$	$20 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$	
Limite pour les travailleurs	$0,4 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$	$10 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$	Directive 2004/40/CE
Limite pour le public	$0,08 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$	$2 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$	RE 1999/519/CE

TABLE 5.2 – Valeurs des limites fondamentales du DAS fixées par l’ICNIRP : valeurs moyennes à respecter sur une durée de 6 min sur une région très localisée de masse 10 g (ICNIRP 2020). Le facteur de protection pour tenir compte des incertitudes scientifiques et des différences physiologiques en termes de thermorégulation est de 10 pour les travailleurs et 50 pour le public (corps entier), moins au fait des expositions et des mesures d’atténuation. Il est respectivement de 2 et 10 pour les régions localisées.

a décidé de classer les champs électromagnétiques de radiofréquence comme « peut-être cancérogènes pour l’homme » (groupe 2B) (Baan *et al.* 2011). L’effet cancérogène des champs électromagnétiques émis par les technologies de communications sans fil reste controversé.

Il n’y a pas de problème sanitaire pour les sources en champ lointain (antennes relais, wifi...) car le niveau d’exposition est très bas (décroissance de l’énergie avec le carré de la distance). Cependant, le nombre d’utilisateurs de téléphones portables (champ proche) étant important, une augmentation minime du risque pourrait se traduire par un problème de santé publique, donc l’activité de recherche se poursuit, d’autant que le recul dans le temps est faible. Néanmoins aucun mécanisme connu ne vient étayer un possible effet nocif sur la santé, car les intensités et puissances sont trop faibles pour générer un transfert thermique suffisant ¹⁴.

5.4 Électrosensibilité

L’électrosensibilité est un syndrome défini par l’individu lui-même et non par la le médecin. Les personnes en souffrant présentent des symptômes réels que l’on retrouve dans la population générale (maux de tête, troubles du sommeil...) mais plus fréquents et pouvant devenir invalidants. Des essais cliniques réalisés en double aveugle, où les patient.e-s sont exposé.e-s à des champs tantôt réels, tantôt factices, ont démontré que les personnes se jugeant hypersensibles étaient incapables de distinguer une exposition aux champs électromagnétiques réels d’une exposition simulée ¹⁵ (Rubin *et al.* 2005). On parle alors d’« effet nocebo » qui est un effet psychologique de personnes ressentant des effets secondaires indésirables en consommant ou en étant exposés à des produits inertes ¹⁶.

Cette « peur des ondes » a été relayée par la presse à l’occasion d’une affaire survenue en 2009 ¹⁷ : certain.e-s habitant.e-s d’un quartier de Saint-Cloud se seraient mis à avoir des troubles divers et variés après qu’un opérateur de téléphonie a installé des antennes relais dans leur résidence. Il s’est avéré par la suite, que les antennes n’étaient pas encore alimentées...

Il se trouve que les médias pourraient avoir une certaine responsabilité dans l’épidémie : une étude (Witthöft & Rubin 2013) intitulée « Les avertissements des médias concernant les effets néfastes sur la santé de la vie moderne s’auto-réalisent-ils ? Une étude expérimentale sur

14. Notons toutefois que des recherches récentes semblent montrer que les ondes électromagnétiques pourraient avoir un effet physiologique sur certaines cellules du corps humain, par l’intermédiaire d’une protéine sensible au champ magnétique, le cryptochrome. Voir par exemple : *Des chercheurs montrent que les champs magnétiques agissent sur les cellules* par David Larousserie, Le Monde, 16 octobre 2018, https://www.lemonde.fr/sciences/article/2018/10/16/des-chercheurs-montrent-que-les-champs-magnetiques-ont-des-effets-sur-les-humains_5370290_1650684.html.

15. Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Sensibilit _electromagn tique

16. M me si cet effet dans le cadre de l’explication de l’electrosensibilit  est questionn  (Dieudonn  2016).

17. Voir <http://rue89.nouvelobs.com/2013/06/09/mobiles-wifi-antennes-les-ondes-mont-tuer-243087>.

l'intolérance environnementale idiopathique (*i.e.* symptômes que l'on éprouve pour soi-même) attribuée aux champs électromagnétiques » conclut que :

Les reportages des médias sur les effets néfastes de substances supposées dangereuses peuvent augmenter la probabilité d'éprouver des symptômes à la suite d'une exposition fictive et de développer une sensibilité apparente. Un plus grand engagement entre les journalistes et les scientifiques est nécessaire pour contrer ces effets négatifs.

5.5 Et le four à micro-ondes alors ?

Le four à micro-ondes génère et utilise des ondes de même fréquence que celles des téléphones portables. Or le four à micro-onde sert à cuire des aliments. Donc les téléphones portables pourraient très bien faire cuire notre cerveau ? Pour répondre à cette question voyons d'abord comment fonctionne un four à micro-ondes.

5.5.1 Fonctionnement

Le four à micro-ondes a été inventé de manière inopinée à la sortie de la seconde guerre mondiale quand un ingénieur américain travaillant sur les radars se serait aperçu que les ondes électromagnétiques qu'il manipulait pouvaient chauffer.

À partir de la tension alternative du réseau électrique ménager (220 V, 50 Hz) on obtient une haute tension continue avec d'une part un transformateur pour élever la tension, et d'autre part un circuit redresseur généralement constitué de diodes pour convertir cette tension en courant continu. Celui-ci alimente un magnétron qui va générer des ondes électromagnétiques.

Un magnétron¹⁸ à cavité se compose d'une cathode cylindrique portée à un potentiel négatif élevé créé par la haute tension précédemment générée. La cathode est placée au centre d'une chambre métallique circulaire, lobée et sous vide. Les parois de la chambre constituent l'anode du tube. Un champ magnétique parallèle à l'axe de la cavité est généré par un aimant permanent. Les électrons se déplacent initialement radialement vers l'extérieur de la cathode, attirés par le champ électrique des parois de l'anode. Le champ magnétique courbe la trajectoire des électrons qui spiralent vers l'extérieur, conséquence de la force de Lorentz. Des cavités cylindriques sont réparties sur le pourtour de la chambre. Des fentes sont découpées sur la longueur des cavités et s'ouvrent sur l'espace central commun. Lorsque les électrons passent devant ces fentes, ils induisent un champ électromagnétique à haute fréquence dans chaque cavité résonnante selon le principe de l'antenne. Le champ est alors conduit dans un guide d'ondes (un tube métallique) qui dirige l'énergie électromagnétique ainsi extraite vers la chambre de cuisson.

La taille des cavités détermine la fréquence de résonance, et donc la fréquence des micro-ondes émises.

La figure 5.6 montre schématiquement comment fonctionne le four à micro-ondes. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Fréquence des ondes : 2,45 GHz
- Longueur d'onde : 12,2 cm
- Puissance : 500–2000 W (à comparer avec la puissance d'un smartphone : ~ 1 W et celle d'une borne wifi : ~ 30 mW)

Comment sont chauffés les aliments ?

La molécule d'eau est polarisée (figure 5.7a), ce qui lui permet de s'orienter selon un champ électrique auquel elle est soumise (figure 5.7b, c). Une onde électromagnétique étant (entre autres) composée d'un tel champ, oscillant, l'eau va ainsi pouvoir osciller, changer de direction

18. Sur le fonctionnement détaillé du magnétron, voir Rohit Choudhury, *Magnétron*, 2015, diapositives. <https://www.slideshare.net/RohitChoudhury1/magnetron-55879835/8>.

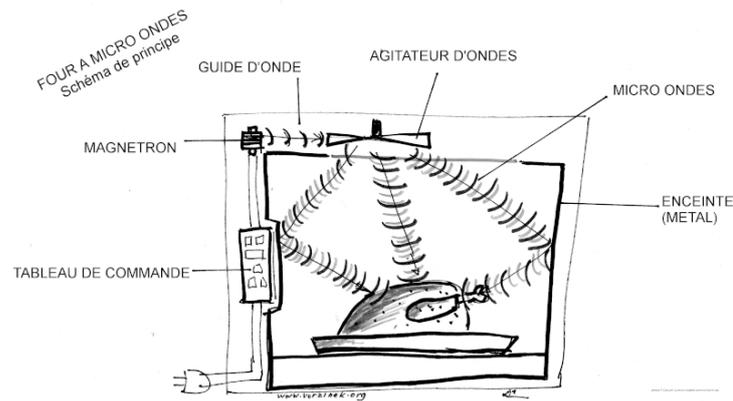


FIGURE 5.6 – Illustration du fonctionnement du four à micro-ondes. Source : Wikipédia/Vorzinek. CC BY-SA.

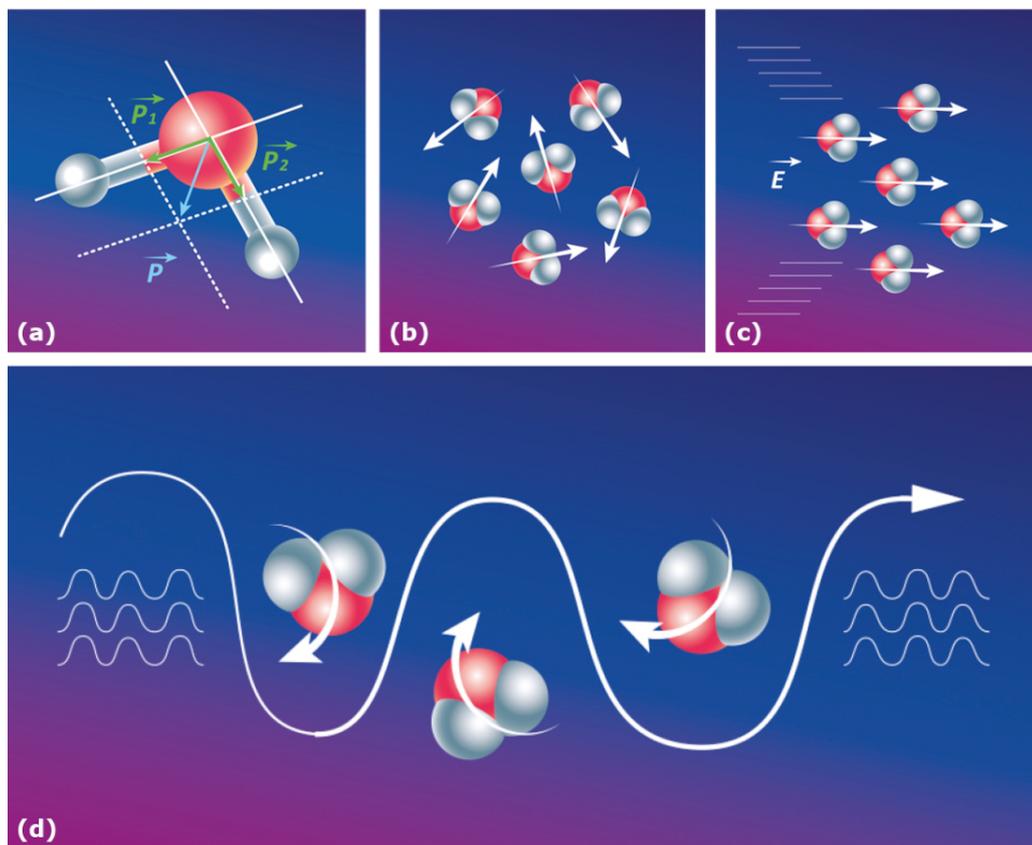


FIGURE 5.7 – Principe du chauffage par des ondes électromagnétiques micro-ondes. (a) Schéma de la molécule de d'eau avec son moment dipolaire \vec{p} . (b) En l'absence de champ électrique \vec{E} extérieur, les moments dipolaires des molécules d'eau sont orientés de manière désordonnée. (c) En présence d'un champ électrique \vec{E} extérieur, les moments dipolaires s'alignent. (d) Si le champ \vec{E} extérieur oscille, les moments dipolaires de l'eau oscillent de concert. Crédit : Julia Fraud. CC BY-NC-ND.

au gré de l'onde (figure 5.7d). Le chauffage a lieu grâce aux « frottements » moléculaires et à la diffusion thermique¹⁹.

19. Pour en savoir plus, voir par exemple Wikipédia : Four à micro-ondes (https://fr.wikipedia.org/wiki/Four_à_micro-ondes#Action_des_micro-ondes_sur_la_molécule_d'eau)

Étude	Rayonnement de fuite moyen (mW/cm ²)	Nombre d'appareils testés	Âge des appareils testés (années)
Alhekail 2001 (appareils usagés)	0,41	106	0,1–14
Thansandote 2000 (appareils neufs)	0,08	60	0
Thansandote 2000 (appareils usagés)	0,17	103	1–23
Matthes 1992 (appareils usagés)	< 0,062 pour 50 % des appareils ; max = 0,086	130	0,5–18

TABLE 5.3 – Mesure du rayonnement de fuite des fours à micro-ondes selon trois études. Source : OFSP (2016).

Distance (cm)	DAS mesuré (W/kg)	Limite recommandée	
		DAS (W/kg)	Partie du corps exposée
< 0,1	7,95	4	membres
5	0,256	2	tête, tronc
30	0,0056	0,08	corps entier

TABLE 5.4 – Débit d'absorption spécifique (DAS) du rayonnement de fuite des fours à micro-ondes selon l'étude de Bangay et al. (2003) en fonction de la distance. Tiré de OFSP (2016).

Dangereux, le four à micro-ondes ?

L'enceinte du four est métallique, la porte elle-même est dotée d'une grille métallique, qui permet de voir à l'intérieur, mais empêche les ondes de sortir (cage de Faraday).

Selon les normes en vigueur, les fuites de rayonnement ne doivent pas excéder 5 mW/cm² à une distance de 5 cm. Le tableau 5.3 donne des mesures du rayonnement de fuite pour un certain nombre de fours d'âges divers. Les trois études présentant ces mesures arrivent à la conclusion que le rayonnement de fuite est le plus important lorsque les joints d'étanchéité de la porte sont usés ou encrassés, ou lorsque la porte ou le système de fermeture sont usés. Le rayonnement de fuite maximal admissible n'a été dépassé que dans un seul cas.

Le tableau 5.4 donne des mesures du DAS du rayonnement de fuite de fours à micro-ondes à différentes distances. À une distance de 30 cm (ce qui correspond à une exposition de tout le corps) comme à une distance de 5 cm (ce qui correspond par exemple à l'exposition de la tête lorsqu'on regarde les aliments dans le four), les valeurs DAS sont nettement inférieures aux valeurs limites recommandées. Ce n'est qu'au contact direct avec le four que les valeurs limites recommandées sont dépassées.

5.5.2 Conclusion : le téléphone portable est-il un four à micro-ondes ?

D'une part, on constate que les fours à micro-ondes sont inoffensifs tant qu'ils sont en bon état. D'autre part, la fréquence de la téléphonie mobile est dans la même gamme que celle des fours à micro-ondes. Mais la différence principale est que la puissance émise n'est pas du tout la même : elle est supérieure à 500 W pour la cuisson des aliments, contre ~ 1 W pour un téléphone portable. C'est cette grande différence de puissance, et en particulier la faible puissance des téléphones portables (qui tend de surcroît à diminuer plus la technologie

progresse), qui explique que l'on ne peut pas se cuire le cerveau en téléphonant. Néanmoins l'utilisation des téléphones portables étant récente, des études sur d'éventuels effets à long terme sont en cours (étude COSMOS, par exemple).

5.6 Quelques « études » sur l'effet des ondes sur la santé

- *Étude Interphone*²⁰ : vaste étude sur l'impact des téléphones portables sur la santé humaine dans les règles de la méthode scientifique. Conclusion : rien de significatif, si ce n'est qu'il faut poursuivre les études... (voir Communiqué de l'OMS, 2010²¹).
- *Étude COSMOS*²² : débutée en 2010, dans le but de suivre 250 000 adultes utilisateurs de téléphones portables dans 5 pays jusqu'en 2040...
- *L'étude « Draper »* (Draper *et al.* 2005), qui concluait que les enfants avaient un risque accru de leucémie en vivant à proximité d'une ligne THT. Mais là encore des problèmes méthodologiques sont à déplorer (voir : *Lignes électriques à haute tension et cancer chez l'enfant : ce que certains... oublient*²³, mais aussi Bunch *et al.* 2014).

20. <http://interphone.iarc.fr/>

21. OMS, Publication de l'étude Interphone sur l'utilisation des téléphones portables et le risque de cancer du cerveau, communiqué de presse. https://www.iarc.who.int/wp-content/uploads/2018/07/pr200_F.pdf

22. <http://www.ukcosmos.org/>

23. http://www.unice.fr/zetetique/articles/HBJBDBDC_Draper.html

Références

- ADEME (2011), *Dans l'air du temps, l'énergie éolienne*. https://ademe.typepad.fr/files/guide_ademe_energie_eolienne.pdf.
- ADEME (2014), *Base carbone - documentation des facteurs d'émission de la base carbone*, <https://base-empreinte.ademe.fr/>.
- ADEME (2018), *Qu'est-ce que l'ACV?* <https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-l'action/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv>.
- Albarède F. & Thomas P. (2000), *Lien entre le $\delta_{18}\text{O}$ des glaces et la température atmosphérique — Planet-Terre*. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/temperature-des-glaces.xml>.
- Althaus V. (2019), *Le capitalisme à l'assaut des sciences humaines et sociales : l'exemple des revues payantes en psychologie*, *Zilsel*, **6**(2), pp. 9–24. <https://doi.org/10.3917/zil.006.0009>.
- Andreotti B. & Noûs C. (2020), *Contre l'imposture et le pseudo-rationalisme*, *Zilsel*, **7**(2), pp. 15–53. <https://doi.org/10.3917/zil.007.0015>.
- Arevalo R., McDonough W.F. & Luong M. (2009), *The K/U Ratio of the Silicate Earth : Insights into Mantle Composition, Structure and Thermal Evolution*, *Earth and Planetary Science Letters*, **278**(3-4), pp. 361–369. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.12.023>.
- Arghir C., Jouini T. & Dörfler F. (2018), *Grid-Forming Control for Power Converters Based on Matching of Synchronous Machines*, *Automatica*, **95**, pp. 273–282. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2018.05.037>.
- Arliss J.M., Kaplan E.N. & Galvin S.L. (2005), *The effect of the lunar cycle on frequency of births and birth complications*, *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, **192**(5), pp. 1462–1464. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2004.12.034>.
- Arnold E.J. (2014), *Fraude et mauvaises pratiques dans les publications scientifiques*, *Hermès, La Revue*, **70**(3), pp. 197–204. <https://doi.org/10.3917/herm.070.0197>.
- Attali G., Bidar A., Caroti D. & Coutouly R., *Esprit critique, outils et méthodes pour le second degré*, Agir (Canopé 2019). <https://www.reseau-canope.fr/notice/esprit-critique.html>.
- Attard J. (2020), *À propos du critère de réfutabilité et des hypothèses ad hoc*. <https://cortecs.org/superieur/a-propos-du-critere-de-refutabilite-et-des-hypotheses-ad-hoc/>.
- Attard J. (2021), *Internet et désinformation : une fake news? – Le Cortecs*. <https://cortecs.org/informations-medias/internet-et-desinformation-une-fake-news/>.
- Auzanneau M. (2019), *Pic pétrolier probable d'ici 2025, selon l'Agence internationale de l'énergie*. <https://www.lemonde.fr/blog/petrole/2019/02/04/pic-petrolier-probable-dici-a-2025-selon-lagence-internationale-de-lenergie/>.
- Baan R., Grosse Y., Lauby-Secretan B., Ghissassi F.E., Bouvard V., Benbrahim-Tallaa L., Guha N., Islami F., Galichet L. & Straif K. (2011), *Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields*, *The Lancet Oncology*, **12**(7), pp. 624–626. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(11\)70147-4](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(11)70147-4).
- Bailly S. (2013), *Quelle est la température du centre de la Terre?* <https://www.pourlascience.fr/sd/geosciences/quelle-est-la-temperature-du-centre-de-la-terrenbsp-11620.php>.

- Balian R. (2009), *Comparaisons des différentes formes d'énergie*. <https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/Comparaison-differentes-formes-energies-Balian.xml>.
- Bar-On Y.M., Phillips R. & Milo R. (2018), *The biomass distribution on Earth*, Proceedings of the National Academy of Sciences, **115**(25), pp. 6506–6511. <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>.
- Basdevant J.L., Rich J. & Spiro M., *Énergie Nucléaire* (Les Éditions de l'École polytechnique 2002).
- Benabderrazik M. (2018), *Les solutions de stockage dans la régulation du réseau électrique (1/2)*. <https://www.energystream-wavestone.com/2018/05/les-solutions-de-stockage-dans-la-regulation-du-reseau-electrique-12/>.
- Bender F.A.M., Rodhe H., Charlson R.J., Ekman A.M.L. & Loeb N. (2006), *22 Views of the Global Albedo—Comparison between 20 GCMs and Two Satellites*, *Tellus*, **58**, pp. 320–330. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2006.00181.x>.
- Benelmir R., Lallemand A. & Feidt M. (2002), *Analyse exergétique - Définitions*, Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v1-be8015>.
- Bernard C., *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale* (Flammarion 2013).
- Berruyer (2011), *Climat : les cycles de Milankovitch*. <https://www.les-crisis.fr/climat-14-milankovitch/>.
- Berthet V., *L'erreur est humaine - Aux frontières de la rationalité* (CNRS Éditions 2018).
- Biraud F. & Zarka P. (1998), *Sur l'astrologie ; réflexions de deux astronomes*. <https://lesia.obspm.fr/perso/philippe-zarka/GlobsPZpro/reflexions.html>.
- Blanc G. (2006), *Coup de Lune ?* <http://gblanc.fr/spip.php?article14>.
- Blondel S. (2003), *Généralisation de l'espérance d'utilité : le cas des jeux de loterie en France*, *Économie et Prévision*, **159**(3), pp. 105–112. <https://doi.org/10.3917/ecop.159.0105>.
- Bolton J.R. & Hall D.O. (1991), *The maximum efficiency of photosynthesis*, *Photochemistry and Photobiology*, **53**(4), pp. 545–548. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1991.tb03668.x>.
- Bonneuil C., Choquet P.L. & Franta B. (2021), *Early warnings and emerging accountability : Total's responses to global warming, 1971–2021*, *Global Environmental Change*, **71**, p. 10. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102386>.
- Bornard P., Pavard M. & Testud G. (2005), *Réseaux d'interconnexion et de transport : fonctionnement*, Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v1-d4091>.
- Bouchet-Petersen J. (2019), *Dans la lutte climatique, les Français poussent à des contraintes*, *Libération.fr*. https://www.liberation.fr/france/2019/09/20/dans-la-lutte-climatique-les-francais-poussent-a-des-contraintes_1752640.
- Bouneau S. (2018a), *Comment comprendre la transition énergétique ?* in *Conférence au LPS, Orsay* (2018a).
- Bouneau S. (2018b), *Quelles sources d'énergie pour répondre aux besoins futurs ?* in *EcoClim 2018* (2018b). https://pperso.ijclab.in2p3.fr/page_perso/Appert/ECOCLIM2018/.
- Boy D. (2002), *Les Français et les para-sciences : vingt ans de mesures*, *Revue Française de Sociologie*, **43**(1), pp. 35–45. http://www.persee.fr/doc/rfsoc_0035-2969_2002_num_43_1_5472.
- Boy D. & Michelat G. (1986), *Croyances aux parasciences : dimensions sociales et culturelles*, *Revue Française de Sociologie*, **27**(2), pp. 175–204. https://www.persee.fr/doc/rfsoc_0035-2969_1986_num_27_2_2302.
- BP (2018), *BP Statistical Review of World Energy*, Technical report, BP. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>.

- BP (2019), *BP Statistical Review of World Energy*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>.
- Broch H., *Comment déjouer les pièges de l'information ou les règles d'or de la zététique* (book-e-book 2008a). <https://www.book-e-book.com/livres/11-comment-dejouer-les-pieges-de-linformation-ou-les-regles-dor-de-la-zetetique-2915312126.html>.
- Broch H., *L'art du doute* (book-e-book 2008b), book-e-book edition. <https://www.book-e-book.com/livres/8-l-art-du-doute-9782915312119.html>.
- Bronner G. (2011), *Ce qu'Internet fait à la diffusion des croyances*, *Revue Européenne des Sciences Sociales*, **49**(1), pp. 35–60. <https://doi.org/10.4000/ress.805>.
- Bronner G., *La démocratie des crédules* (PUF 2013). https://www.puf.com/content/La_démocratie_des_crédules.
- Bronner G. & Géhin É., *L'inquiétant principe de précaution* (PUF 2008). <https://doi.org/10.3917/puf.bronn.2010.01>.
- Bunch K.J., Keegan T.J., Swanson J., Vincent T.J. & Murphy M.F.G. (2014), *Residential distance at birth from overhead high-voltage powerlines : childhood cancer risk in Britain 1962–2008*, *British Journal of Cancer*, **110**(5), pp. 1402–1408. <https://doi.org/10.1038/bjc.2014.15>.
- Burde G.I. (2004), *Lecture Notes on Physics of the Environment*. <http://www.bgu.ac.il/~georg/envphys.pdf>.
- Burtin A. & Silva V. (2015), *Technical and Economic Analysis of the European Electricity System with 60% RES*, Technical report, EDF R&D. https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2020-07/full_cost_workshop_7_technical_and_economic_analysis_of_the_european_electricity_system_with_60_res.pdf.
- Callen H.B., *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics* (Wiley 2005).
- Carlson S. (1985), *A double-blind test of astrology*, *Nature*, **318**(6045), pp. 419–425. <https://doi.org/10.1038/318419a0>.
- Caroti D. (2020), *Pourquoi enseigner l'esprit critique?* *Science et Pseudo-Sciences*, **333**. <https://www.afis.org/Pourquoi-enseigner-l-esprit-critique/>.
- Casacuberta N., Christl M., Vockenhuber C., Wefing A.M., Wacker L., Masqué P., Synal H.A. & Rutgers van der Loeff M. (2018), *Tracing the three atlantic branches entering the Arctic ocean with 129I and 236U*, *Journal of Geophysical Research : Oceans*, **123**(9), pp. 6909–6921. <https://doi.org/10.1029/2018JC014168>.
- Castelle M. (2016), *Les techniques de fabrication de la grande statuaire en bronze 1540-1660 en France*, Ph.D. thesis. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01385286/document>.
- Caton D.B. & Wheatley P.A. (1998), *Nativity and the Moon : Do Birthrates Depend on the Phase of the Moon?* *International Amateur-Professional Photoelectric Photometry Communications*, **74**, p. 50.
- CGDD (2017), *Ménages & Environnement – Les chiffres clés – Édition 2017*, Technical report, Commissariat général au développement durable. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/Datalab-25-menages-environnement-cc-ed-2017-oct2017-b.pdf>.
- CGDD (2019a), *Bilan énergétique de la France En 2018 – Données définitives*, Technical report, Commissariat général au développement durable. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-12/datalab-essentiel-195-bilan-energetique-france-2018-decembre2019.pdf>.
- CGDD (2019b), *Bilan énergétique de la France en 2018 – Données provisoires*, Technical report, Commissariat général au développement durable. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2019-04/datalab-essentiel-173-bilan-energetique-provisoire-2018-avril2019.pdf>.

- CGDD (2020a), *Bilan énergétique de la France pour 2018*, Technical report, Commissariat général au développement durable. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-01/datalab-64-bilan-energetique-france-2018-janvier2020.pdf>.
- CGDD (2020b), *L'empreinte carbone des Français reste stable*, Technical report, Commissariat général au développement durable. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-01/datalab-essentiel-204-l-empreinte-carbone-des-francais-reste-stable-janvier2020.pdf>.
- Chalmers A.F., *Qu'est-ce que la science?* (Le Livre de Poche 1990).
- Chanel O., Chichilnisky G. & Basiuk A. (2020), *Décisions en situation d'incertitude, peur et catastrophes*. <https://lejournal.cnrs.fr/nos-blogs/dialogues-economiques/decisions-en-situation-dincertitude-peur-et-catastrophes>.
- Chaquin P. (2020), *Cours d'atomistique, liaison chimique et spectroscopie*. <https://www.lct.jussieu.fr/pagesperso/chaquin/>.
- Charpak G. & Broch H., *Devenez sorciers, devenez savants* (Odile Jacob 2002).
- Chevron (2007), *Diesel fuels technical review*, Technical report. <https://www.chevron.com/-/media/chevron/operations/documents/diesel-fuel-tech-review.pdf>.
- CITEPA (2019), *Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques - bilan des émissions en France de 1990 à 2017*, Technical report, <https://www.citepa.org/fr/secten/>.
- Cook J., Oreskes N., Doran P.T., Anderegg W.R.L., Verheggen B., Maibach E.W., Carlton J.S., Lewandowsky S., Skuce A.G., Green S.A., Nuccitelli D., Jacobs P., Richardson M., Winkler B., Painting R. et al. (2016), *Consensus on consensus : a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming*, *Environmental Research Letters*, **11**(4), p. 048002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/048002>.
- Courtier P., *Équilibre radiatif de la planète terre, premiers éléments sur l'effet de serre* (École des Ponts - ParisTech 2010).
- Cummings R.E. (2020), *Writing knowledge : Wikipedia, public review, and peer review*, *Studies in Higher Education*, **45**(5), pp. 950–962. <https://doi.org/10.1080/03075079.2020.1749791>.
- Dale M.A.J. (2010), *Global energy modelling : a biophysical approach (gemba)*, Ph.D. thesis, University of Canterbury. <https://ir.canterbury.ac.nz/handle/10092/5156>.
- David E., Wolfson M. & Fraifeld V.E. (2021), *Background Radiation Impacts Human Longevity and Cancer Mortality : Reconsidering the Linear No-Threshold Paradigm*, *Biogerontology*, **22**(2), pp. 189–195. <https://doi.org/10.1007/s10522-020-09909-4>.
- Davies J. & Davies D. (2010), *Earth's surface heat flux*, *Solid Earth*, **1**, pp. 5–24. <https://doi.org/10.5194/se-1-5-2010>.
- Delaygue G. (2002), *Quelques chiffres sur les gaz à effet de serre*. <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/data-g-e-s.xml>.
- Delmas R., Chauzy S., Verstraete J.M. & Ferré H., *Atmosphère, océan et climat* (Belin - Pour la Science 2007).
- Diallo M., Legras B., Ray E., Engel A. & Añel J.A. (2017), *Global distribution of CO₂ in the upper troposphere and stratosphere*, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **17**(6), pp. 3861–3878. <https://doi.org/10.5194/acp-17-3861-2017>.
- Dieudonné M. (2016), *Does electromagnetic hypersensitivity originate from nocebo responses? Indications from a qualitative study*, *Bioelectromagnetics*, **37**(1), pp. 14–24. <https://doi.org/10.1002/bem.21937>.
- DoE (2015), *An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities - Chapter 10 : Concepts in Integrated Analysis*, Technical report, Department of Energy. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/03/f34/qtr-2015-chapter10.pdf>.
- DOE (2020), *Global Energy Storage Database – Energy Storage Systems*. <https://www.sandia.gov/ess-ssl/global-energy-storage-database-home/>.

- Dorion N. & Mouchotte J. (2012), *Jardiner avec la Lune : mythe ou réalité*, Technical report, Société Nationale d'Horticulture de France. <https://www.snhf.org/wp-content/uploads/2016/10/jardiner-avec-la-lune.pdf>.
- Draper G., Vincent T., Kroll M.E. & Swanson J. (2005), *Childhood Cancer in Relation to Distance from High Voltage Power Lines in England and Wales : A Case-Control Study*, *BMJ*, **330**(7503), p. 1290. <https://doi.org/10.1136/bmj.330.7503.1290>.
- Drummond C. & Fischhoff B. (2017), *Individuals with greater science literacy and education have more polarized beliefs on controversial science topics*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **114**(36), pp. 9587–9592. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704882114>.
- Dufresne J.L. & Treiner J. (2011), *L'effet de serre atmosphérique : plus subtil qu'on ne le croit !* *La Météorologie*, **72**, pp. 31–41. <https://doi.org/10.4267/2042/39839>.
- Dugast C. & Soyeux A. (2019), *Faire sa part? Pouvoir et responsabilité des individus, des entreprises et de l'état face à l'urgence climatique*, Technical report, Carbone 4. <https://www.carbone4.com/publication-faire-sa-part>.
- Durand B. (2018), *La raréfaction prochaine des combustibles fossiles va contraindre de hâter la transition énergétique*. <https://www.europeanscientist.com/fr/opinion/rarefaction-prochaine-combustibles-fossiles/>.
- Eckerman K., Harrison J., Menzel H.G. & Clement C. (2012), *Compendium of Dose Coefficients Based on ICRP Publication 60*, *Annals of the ICRP*, **119**. [https://www.icrp.org/docs/P_119_JAICRP_41\(s\)_Compendium_of_Dose_Coefficients_based_on_ICRP_Publication_60.pdf](https://www.icrp.org/docs/P_119_JAICRP_41(s)_Compendium_of_Dose_Coefficients_based_on_ICRP_Publication_60.pdf).
- Eckley Selin N. (1998), *Tidal Power – Types & Facts*. <https://www.britannica.com/science/tidal-power>.
- EDF (2012), *Le solaire thermodynamique à concentration*. https://www.edf.fr/sites/default/files/contrib/groupe-edf/producteur-industriel/thermique/enjeux/modernisation-du-parc/le_solaire_thermodynamique_a_concentration.pdf.
- Evans S. (2021), *Analysis : Which countries are historically responsible for climate change?* <https://www.carbonbrief.org/analysis-which-countries-are-historically-responsible-for-climate-change/>.
- Factsory (2019), *Les agences réglementaires ne reflètent pas la science*. <http://factsory.org/2019/les-agences-reglementaires-ne-refletent-pas-la-science/>.
- Factsory (2021), *Bronner et sa méthodologie crédule*. <https://factsory.org/2021/bronner-et-sa-methodologie-credule/>.
- Fagherazzi G., Vilier A., Saes Sortorelli D., Lajous M., Balkau B. & Clavel-Chapelon F. (2013), *Consumption of artificially and sugar-sweetened beverages and incident type 2 diabetes in the Etude Epidémiologique auprès des femmes de la Mutuelle Générale de l'Education Nationale–European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition cohort*, *The American Journal of Clinical Nutrition*, (97), pp. 517–523. <https://doi.org/10.3945/ajcn.112.050997>.
- Farina M., Pasquinelli E. & Zimmerman G., *Esprit Critique, Esprit Scientifique*, 1 (Le Pommier 2017).
- Farina M., Pasquinelli E. & Zimmerman G., *Esprit Critique, Esprit Scientifique*, 2 (Le Pommier 2018).
- Ferroir T. (2012), *Ce qu'il faut comprendre et retenir du $\delta_{18}\text{O}$ en tant qu'indicateur paléoclimatique*. <http://tristan.ferroir.fr/index.php/2012/01/18/ce-quil-faut-comprendre-et-retenir-du-delta-18-o-en-tant-quindicateur-paleoclimatique/>.
- Feynman R., *Feynman Lectures on Physics*, volume 1 (1963). https://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_toc.html.
- Fiolet T. (2019), *Perception des risques liés à la santé et le traitement de l'information scientifique dans les médias : les résultats de l'enquête*. <https://quoidansmonassiette.fr/>

- perception-des-risques-lies-sante-le-traitement-de-linformation-scientifique-dans-medias-resultats-enquete/.
- Flocard H., Pervès J.P. & Hulot J.P. (2014), *Électricité : intermittence et foisonnement des énergies renouvelables*, Techniques de l'Ingénieur, <https://doi.org/10.51257/a-v1-be8586>.
- Foos J., *Manuel de radioactivité* (Hermann 2009).
- Foucart S., Horel S. & Laurens S., *Les gardiens de la raison* (La Découverte 2020).
- Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Hauck J., Peters G.P., Peters W., Pongratz J., Sitch S., Le Quéré C., Bakker D.C.E., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Anthoni P. *et al.* (2019), *Global Carbon Budget 2019*, Earth System Science Data, **11**(4), pp. 1783–1838. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>.
- Fröhlich C. (2006), *Solar Irradiance Variability since 1978, Revision of the PMOD Composite during Solar Cycle 21*, Space Science Reviews, **125**, pp. 53–65. <https://doi.org/10.1007/s11214-006-9046-5>.
- Gans J. & Leigh A. (2015), *Does the Lunar Cycle Affect Birth and Deaths?* Journal of Articles in Support of the Null Hypothesis, **11**(2), pp. 31–36. <https://www.jasnh.com/pdf/Vol11-No2-article3.pdf>.
- Ghanty Y. (2018), *Étude du lien entre la fréquence et les puissances actives pour le dimensionnement d'un microréseau alternatif îloté avec sources d'énergie renouvelables*, Ph.D. thesis, Toulouse. <https://oatao.univ-toulouse.fr/24284/>.
- GIEC (2006), *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories - Volume 1 - General guidance and reporting*, Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1_Volume1/V1_1_Ch1_Introduction.pdf.
- GIEC (2007), *Fourth Assessment Report : Climate change 2007 : The AR4 synthesis report*, Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1/>.
- GIEC (2013), *Climate change 2013 : The Physical Science Basis*, Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- GIEC (2018), *Global warming of 1.5 °C*, Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- GIEC (2021), *Climate change 2021 : The physical science basis*, Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf.
- Goode P.R., Pallé E., Shoumko A., Shoumko S., Montañes-Rodriguez P. & Koonin S.E. (2021), *Earth's Albedo 1998–2017 as Measured From Earthshine*, Geophysical Research Letters, **48**(17), p. e2021GL094888. <https://doi.org/10.1029/2021GL094888>.
- Gouhier C., Le Ruz P. & Herriau J.C. (2008), *Enquête citoyenne « Vivre avec une ligne THT? »*. https://www.criirem.org/wp-content/uploads/2015/11/090123_synthese_enquete_tht-2.pdf.
- Grand D., Brun C.L. & Vidil R. (2015), *Intermittence des énergies renouvelables et mix électrique*, Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v1-in301>.
- Grenèche D., Chauvin A. & Laugier F. (2012), *Uranium : ressources, consommation et évolutions du marché*, Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v1-bn3571>.
- Guaric A. (2020), *Climat : les chercheurs « s'attendent à des ouragans plus puissants et des pluies plus intenses »*, Le Monde.fr. https://www.lemonde.fr/planete/article/2020/08/27/climat-le-nhc-s-attend-a-des-ouragans-plus-puissants-associes-a-des-pluies-plus-intenses_6050127_3244.html.
- Guilford M.C., Hall C.A., O'Connor P. & Cleveland C.J. (2011), *A New Long Term Assessment of Energy Return on Investment (EROI) for U.S. Oil and Gas Discovery and Production*, Sustainability, **3**(10), pp. 1866–1887. <https://doi.org/10.3390/su3101866>.

- Gunn K. & Stock-Williams C. (2012), *Quantifying the global wave power resource*, *Renewable Energy*, **44**, pp. 296–304. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.101>.
- Hall C.A., Lambert J.G. & Balogh S.B. (2014), *EROI of Different Fuels and the Implications for Society*, *Energy Policy*, **64**, pp. 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.05.049>.
- Halley J. (2018), *L'épuisement des ressources minérales et la notion de matériaux critiques*, *La Revue Nouvelle*, **4**, pp. 34–40. <https://doi.org/10.3917/rn.184.0034>.
- Hamada L., Iyama T., Onishi T. & Watanabe S. (2009), *The Specific Absorption Rate of Mobile Phones Measured in a Flat Phantom and in the Standardized Human Head Phantom*, in *International Symposium on Electromagnetic Compatibility* (2009). https://www.ieice.org/publications/proceedings/bin/pdf_link.php?fname=21S4-1.pdf&iconf=EMC&year=2009&vol=14&number=21S4-1&lang=E.
- Hamada L. & Watanabe S. (2016), *Calibration of SAR Probe*, *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology*, **63**(1), pp. 135–150. <https://www.nict.go.jp/publication/shuppan/kihou-journal/journal-vol63no1/journal-vol63no1-02-07.pdf>.
- Haynes W.M., *CRC Handbook of Chemistry and Physics : A Ready-Reference Book of Chemical and Physical Data* (CRC Press 2017).
- Hilbert M. & López P. (2011), *The World's Technological Capacity to Store, Communicate, and Compute Information*, *Science*, **332**, pp. 60–65. <https://doi.org/10.1126/science.1200970>.
- Hocquet A. (2020), *Reproduire un résultat scientifique : plus facile à dire qu'à faire*, *The Conversation*. <http://theconversation.com/reproduire-un-resultat-scientifique-plus-facile-a-dire-qua-faire-129848>.
- Hróbjartsson A. & Gøtzsche P.C. (2010), *Placebo interventions for all clinical conditions*, *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, **1**, p. CD003974. <https://doi.org/10.1002/14651858.cd003974.pub3>.
- Huet S. (2018), *OGM-poisons? La vraie fin de l'affaire Séralini*. <https://www.lemonde.fr/blog/huet/2018/12/11/ogm-poisons-la-vraie-fin-de-laffaire-seralini/>.
- Huet S. (2020), *Ce que révèle le canular « Hydroxychloroquine »*. <https://www.lemonde.fr/blog/huet/2020/08/17/que-revele-le-canular-hydroxychloroquine/>.
- Hugo V., *L'art et la science* (Actes Sud 1993).
- ICNIRP (2020), *Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz)*, *Health Physics*, **118**(5), pp. 483–524. <https://doi.org/10.1097/hp.0000000000001210>.
- ICRP (2017), *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*, Technical report, ICRP. [https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP Publication 103](https://www.icrp.org/publication.asp?id=ICRP%20Publication%20103).
- IEA (2018), *World Energy Outlook 2018*, Technical report, International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018>.
- IEA (2019), *Key World Energy Statistics 2019*, Technical report. <https://www.iea.org/events/key-world-energy-statistics-2019>.
- IEA & RTE (2021), *Conditions et prérequis en matière de faisabilité technique pour un système électrique avec une forte proportion d'énergies renouvelables à l'horizon 2050*, Technical report. [https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/RTE-AIE_synthese ENR horizon 2050_FR.pdf](https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-01/RTE-AIE_synthese_ENR_horizon_2050_FR.pdf).
- INRS (2001), *Guide pour l'établissement de limites d'exposition aux champs électriques, magnétiques et électromagnétiques : champs alternatifs (de fréquence variable dans le temps, jusqu'à 300 GHz)*, *Hygiène et sécurité du travail*. [https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ND 2143](https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ND%202143).

- IUPAC (2016), *IUPAC Announces the Names of the Elements 113, 115, 117, and 118*. <https://iupac.org/iupac-announces-the-names-of-the-elements-113-115-117-and-118/>.
- Jackson J.D., *Électrodynamique classique* (Dunod 2021).
- Johnsen S., Dansgaard W. & Clausen H. (1972), *Oxygen Isotope Profiles through the Antarctic and Greenland Ice Sheets*, *Nature*, **235**, pp. 429–434. <https://doi.org/10.1038/235429a0>.
- Jouzel J. (2022), *Sensibiliser et former aux enjeux de la transition écologique et du développement durable dans l'enseignement supérieur*, Technical report. <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/former-aux-enjeux-de-la-transition-ecologique-dans-le-superieur-83888>.
- Jouzel J. & Debroise A., *Le défi climatique, objectif +2 °C* (Dunod 2014).
- Jouzel J., Lorius C., J. Johnsen S. & Grootes P. (1994), *Climate Instabilities : Greenland and Antarctic Records*, *Comptes Rendus - Academie des Sciences, Serie II : Sciences de la Terre et des Planetes*, **319**. <https://hal.science/hal-03343799>.
- Juignet P. (2015), *Karl Popper et les critères de la scientificité*, *Philosophie, Science et Société*.
- Kahneman D., *Système 1 / Système 2 : les deux vitesses de la pensée* (Flammarion 2012).
- Keeling R.F., Manning A.C., McEvoy E.M. & Shertz S.R. (1998), *Methods for Measuring Changes in Atmospheric O₂ Concentration and Their Application in Southern Hemisphere Air*, *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, **103**(D3), pp. 3381–3397. <https://doi.org/10.1029/97JD02537>.
- Kleidon A., Miller L. & Gans F., *Physical Limits of Solar Energy Conversion in the Earth System*, in H. Tüysüz & C.K. Chan, eds., *Solar Energy for Fuels*, volume 371 (Springer International Publishing 2015), pp. 1–22. https://doi.org/10.1007/128_2015_637.
- Kopp G. & Lean J.L. (2011), *A new, lower value of total solar irradiance : Evidence and climate significance*, *Geophysical Research Letters*, **38**, p. L01706. <https://doi.org/10.1029/2010GL045777>.
- Krakowski V. (2016), *Intégration du renouvelable et stratégie de déploiement du réseau électrique : réconciliation d'échelles spatio-temporelles dans des exercices prospectifs de long terme*, Ph.D. thesis, Université de recherche Paris Sciences et Lettres. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01557528v2>.
- Krewski D., Turner M.C., Lemyre L. & Lee J.E. (2012), *Expert vs. public perception of population health risks in Canada*, *Journal of Risk Research*, **15**(6), pp. 601–625. <https://doi.org/10.1080/13669877.2011.649297>.
- Lambert J.G., Hall C.A., Balogh S., Gupta A. & Arnold M. (2014), *Energy, EROI and quality of life*, *Energy Policy*, **64**, pp. 153–167. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.001>.
- Larrère C. & Larrère R. (2001), *Les OGM entre hostilité et principe de précaution*, *Courrier de l'environnement de l'INRA*, **43**. <https://hal.inrae.fr/hal-02674663>.
- Laurens S., *Militer Pour La Science*, En Temps et Lieux (Éditions EHESS 2019).
- Lavy P. (2004), *Production d'électricité par aménagements hydrauliques*, *Techniques de l'Ingénieur*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-d4008>.
- Le Nir M. (2008), *Ressources géothermiques du département de l'Essonne*, Technical Report BRGM/RP-56966-FR, Bureau de Recherche Géologique et Minière. <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56966-FR.pdf>.
- Legras B., Dufresne J.L. & Megie G. (2000), *Quelles sont les propriétés communes des gaz à effet de serre?* <http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/gaz-effet-serre.xml>.
- Levrard B. (2005), *Cycles de Milankovitch et variations climatiques : dernières nouvelles*. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/milankovitch-2005.xml>.

- Lions J.L., Manley O.P., Temam R. & Wang S. (1997), *Physical Interpretation of the Attractor Dimension for the Primitive Equations of Atmospheric Circulation*, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **54**(9), pp. 1137–1143. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054%3C1137:PIOTAD%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054%3C1137:PIOTAD%3E2.0.CO;2).
- Lorenz E.N. (1963), *Deterministic Nonperiodic Flow*, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **20**(2), pp. 130–141. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020%3C0130:DNF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020%3C0130:DNF%3E2.0.CO;2).
- Lorius C. & Merlivat L. (1975), *Distribution of Mean Surface Stable Isotopes Values in East Antarctica : Observed Changes with Depth in Coasted Area*, General assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics; Grenoble, France; 25 Aug 1975. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/07/242/7242101.pdf?r=1.
- Machon D., *Les bavures scientifiques, quand les scientifiques se prennent les pieds dans la démarche*, volume 36 (book-e-book 2015). <https://www.book-e-book.com/livres/133-les-bavures-scientifiques-9782372460095.html>.
- Messerli F.H. (2012), *Chocolate Consumption, Cognitive Function, and Nobel Laureates*, *New England Journal of Medicine*, **367**(16), pp. 1562–1564. <https://doi.org/10.1056/NEJMon1211064>.
- Miller L.M., Gans F. & Kleidon A. (2011), *Estimating Maximum global land surface wind power extractability and associated climatic consequences*, *Earth System Dynamics*, pp. 1–12. <https://doi.org/10.5194/esd-2-1-2011>.
- Monteith J.L. (1972), *Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems*, *The Journal of Applied Ecology*, **9**(3), p. 747. <https://doi.org/10.2307/2401901>.
- Morton-Pradhan S., Bay R.C. & Coonrod D.V. (2005), *Birth rate and its correlation with the lunar cycle and specific atmospheric conditions*, *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, **192**(6), pp. 1970–1973. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2005.02.066>.
- Moyen J.F. (2001), *Connaître le géotherme en profondeur*. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/geotherme-profond.xml>.
- Nénot J.C. (2009), *Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique*, Technical report, Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (France). http://www.icrp.org/docs/P103_French.pdf.
- Ngô C. (2016), *Stockage de l'énergie*, *Techniques de l'Ingénieur*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-be8090>.
- Nifenecker H. (2014), *Physique des éoliennes*, *Techniques de l'Ingénieur*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-be8584>.
- OFSP (2016), *Four à micro-ondes*, Technical report, Office fédéral de la santé publique (Suisse). <https://www.bag.admin.ch/dam/bag/fr/dokumente/str/nis/faktenblaetter-emf/faktenblatt-mikrowellenofen.pdf.download.pdf/faktenblatt%20mikrowellenofen%20f.pdf>.
- OIE (2017), *Gestion de l'équilibre du système électrique*, Observatoire de l'Industrie Électrique. https://observatoire-electricite.fr/IMG/pdf/oie_-_fiche_pedago_flexi_avril_2017.pdf.
- OIE (2020), *Primaire ou finale : comment comptabiliser l'énergie?* Observatoire de l'Industrie Électrique. https://observatoire-electricite.fr/IMG/pdf/fiche_pedago_primaire_ou_finale_-_coment_comptabiliser_l_energie_-_mars_2020.pdf.
- Oreskes N. & Conway E.M., *Marchands de Doute* (Le Pommier 2012).
- Osmundsen M., Bor A., Vahlstrup P.B., Bechmann A. & Petersen M.B. (2021), *Partisan Polarization Is the Primary Psychological Motivation behind Political Fake News Sharing on Twitter*, *American Political Science Review*, **115**(3), pp. 999–1015. <https://doi.org/10.1017/S0003055421000290>.

- Parrenin F. (2013), *Quels sont les liens entre CO₂ et température?* <https://www.climat-en-questions.fr/reponse/mecanismes-devolution/liens-entre-co2-temperature-par-frederic-parrenin>.
- Parrenin F., Masson-Delmotte V., Köhler P., Raynaud D., Paillard D., Schwander J., Barbante C., Landais A., Wegner A. & Jouzel J. (2013), *Synchronous Change of Atmospheric CO₂ and Antarctic Temperature During the Last Deglacial Warming*, *Science*, **339**(6123), pp. 1060–1063. <https://doi.org/10.1126/science.1226368>.
- Pegion K. (2020), *Des prévisions météorologiques à 28 jours*, *Pour la Science*, **515**. <https://www.pourlascience.fr/sd/climatologie/des-previsions-meteorologiques-a-28-jours-19923.php>.
- Pennec F.L. (2001), *Analyse de champ proche et de couverture radioélectrique*, Technical report, École Nationale Supérieure des Télécommunications de Bretagne. [https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expace/Analyse de champ proche et de couverture radioelectrique.pdf](https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/expace/Analyse_de_champ_proche_et_de_couverture_radioelectrique.pdf).
- Perdijon J., *La formation des idées en physique, du phénomène à la théorie* (Dunod 2007).
- Philip S.Y., Kew S.F., van Oldenborgh G.J., Anslow F.S., Seneviratne S.I., Vautard R., Coumou D., Ebi K.L., Arrighi J., Singh R., van Aalst M., Pereira Marghidan C., Wehner M., Yang W., Li S. *et al.* (2021), *Rapid Attribution Analysis of the Extraordinary Heatwave on the Pacific Coast of the US and Canada June 2021*, *Earth System Dynamics*. <https://doi.org/10.5194/esd-2021-90>.
- Planton S. (2020), *La température moyenne de la Terre*, Encyclopédie de l'environnement. <https://www.encyclopedie-environnement.org/climat/temperature-moyenne-terre-rechauffement-climatique/>.
- Poincaré H., *La science et l'hypothèse* (Ernest Flammarion 1917).
- Pontcerq, *De la faiblesse de l'esprit critique envisagé comme compétence* (2022). [http://www.pontcerq.fr/wp-content/uploads/2022/09/De-la-faiblesse-de-lesprit-critique-envisagé-etc..pdf](http://www.pontcerq.fr/wp-content/uploads/2022/09/De-la-faiblesse-de-lesprit-critique-envisage-etc..pdf).
- Preuss P. (2011), *What Keeps the Earth Cooking?* <https://newscenter.lbl.gov/2011/07/17/kamland-geoneutrinos/>.
- Rakotoarison S. (2014), *Karl Popper (1902-1994) : la réfutabilité, critère de la scientificité*. <http://www.agoravox.fr/culture-loisirs/culture/article/karl-popper-1902-1994-la-156881>.
- Ramunni G., *Les lieux des erreurs scientifiques* (Le Cavalier Bleu 2012).
- Ramus F. (2014), *Comprendre le système de publication scientifique*, *Science et Pseudo-Sciences*, **308**. <https://www.afis.org/Comprendre-le-systeme-de-publication-scientifique>.
- Rasplus V., *Ce que la science veut dire, ce que la pseudo-science veut faire*, in *Sciences et Pseudo-Sciences, Regards Des Sciences Humaines*, Sciences et Philosophie (Éditions Matériologiques, « Sciences & philosophie » 2014).
- Ravijen (2018), *L'empreinte carbone des français, un sujet tabou?* <http://ravijen.fr/?p=440>.
- Reinsel D., Gantz J. & Rydning J. (2018), *The Digitization of the World from Edge to Core*. <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/idc-seagate-dataage-whitepaper.pdf>.
- Rochoy M. (2020), *Le meilleur article de tous les temps*. <http://www.mimiryudo.com/blog/2020/08/le-meilleur-article-de-tous-les-temps/>.
- Roques A., *Processionary Moths and Climate Change : An Update* (Springer Dordrecht 2017). <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9340-7>.
- Rowe D. (2018), *Emmy Noether : le centenaire d'un théorème*, *Pour la Science*, **490**. <https://www.pourlascience.fr/sd/mathematiques/emmy-noether-le-centenaire-d-un-theoreme-14564.php>.

- Royer J.F. & Nicolis C. (1994), *Chaos et Météorologie*, La Météorologie, **8**(5), pp. 38–53. <https://doi.org/10.4267/2042/53401>.
- RTE (2004), *Mémento de la sûreté du système électrique*. <https://docplayer.fr/1151047-Memento-de-la-surete-du-systeme-electrique.html>.
- RTE (2016), *Bilan électrique 2016*, Technical report, Réseau de Transport d'Électricité.
- RTE (2017), *Bilan électrique 2017*, Technical report, Réseau de Transport d'Électricité. https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/bilan_electrique_2017.pdf.
- RTE (2018a), *Bilan Électrique 2018*, Technical report, Réseau de Transport d'Électricité. https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-03/Bilan_electrique_2018.pdf.
- RTE (2018b), *Panorama de l'électricité renouvelable au 31 decembre 2018*, Technical report. [https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/Panorama de l'électricité renouvelable au 31 decembre 2018_compressed.pdf](https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/Panorama_de_l_electricite_renouvelable_au_31_decembre_2018_compressed.pdf).
- RTE (2019), *Bilan électrique 2019*, Technical report, Réseau de Transport d'Électricité. https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-06/bilan-electrique-2019_1_0.pdf.
- Rubin G.J., Das Munshi J. & Wessely S. (2005), *Electromagnetic Hypersensitivity : A Systematic Review of Provocation Studies*, Psychosomatic Medicine, **67**(2), pp. 224–232. <https://doi.org/10.1097/01.psy.0000155664.13300.64>.
- Russell B., *Is There a God?* in J.G. Slater & P. Köllner, eds., *The Collected Papers of Bertrand Russell, Volume 11 : Last Philosophical Testament, 1943-68* (Routledge, London 1997), pp. 543–548. https://cortecs.org/wp-content/uploads/2014/12/Is-there-a-God_Russell_1952.pdf.
- Sapy G. (2019), *Les énergies renouvelables intermittentes mettent-elles en cause la stabilité des réseaux?* Science et Pseudo-sciences, **329**. <https://www.afis.org/Les-energies-renouvelables-intermittentes-mettent-elles-en-cause-la-stabilite>.
- Sawerysyn J.P. (1993), *Les pouvoirs calorifiques*, Bulletin de l'Union des Physiciens, **87**, p. 11. <http://materiel-physique.ens-lyon.fr/Logiciels/CD N° 3 BUP DOC V 4.0/Disk 1/TEXTES/1993/07520401.PDF>.
- SDES (2021), *Chiffres clés du climat - France, Europe et Monde - Édition 2021*, Technical report. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2020-12/datalab_81_chiffres_cles_du_climat_edition_2021.pdf.
- Siméon G. (2012), *Données le vertige*. https://www.liberation.fr/futurs/2012/12/03/donnees-le-vertige_864585/.
- Sourisse (2018), *Biomasse et énergie : des ressources primaires aux produits énergétiques finaux*. <https://www.encyclopedie-energie.org/biomasse-et-energie-des-ressources-primaires-aux-produits-energetiques-finaux/>.
- Speich S., Reverdin G., Mercier H. & Jeandel C. (2015), *L'océan, réservoir de chaleur*, Plateforme Océan & Climat. http://www.ocean-climate.org/wp-content/uploads/2015/03/FichesScientifiques-ocean-reservoir-chaleur_BD.pdf.
- Staboulidou I., Soergel P., Vaske B. & Hillemanns P. (2008), *The Influence of Lunar Cycle on Frequency of Birth, Birth Complications, Neonatal Outcome and the Gender : A Retrospective Analysis*, Acta Obstetrica et Gynecologica Scandinavica, **87**(8), pp. 875–879. <https://doi.org/10.1080/00016340802233090>.
- Strugarek A., Beaudoin P., Charbonneau P., Brun A.S. & do Nascimento J.D. (2017), *Reconciling Solar and Stellar Magnetic Cycles with Nonlinear Dynamo Simulations*, Science, **357**(6347), pp. 185–187. <https://doi.org/10.1126/science.aal3999>.
- Thomas P. (2014), *La chaleur de la Terre et la géothermie*. <https://planet-terre.ens-lyon.fr/article/chaleur-Terre-geothermie.xml>.
- Thompson P.D. (1957), *Uncertainty of Initial State as a Factor in the Predictability of Large Scale Atmospheric Flow Patterns*, Tellus, **9**(3), pp. 275–295. <https://doi.org/10.3402/tellusa.v9i3.9111>.

- Treiner J. (2015), *Jouer avec les chiffres du climat : une approche par budget carbone*, Reflets de la Physique, **43**. <https://doi.org/10.1051/refdp/201543046>.
- Treiner J. (2016), *Le taux de retour énergétique, une mesure de l'efficacité sociétale des sources d'énergie*, Techniques de l'Ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/chronique-retour-energetique-39038/>.
- Treiner J. (2018), *Énergies de stock, énergies de flux*, Le Bup, **112**. https://enseignement-scientifique.discip.ac-caen.fr/IMG/pdf/energies_de_stock_energies_de_flux.pdf.
- Trenberth K.E., Fasullo J.T. & Kiehl J. (2009), *Earth's Global Energy Budget*, Bulletin of the American Meteorological Society, **90**(3), pp. 311–324. <https://doi.org/10.1175/2008BAMS2634.1>.
- Turcotte D.L. & Schubert G., *Geodynamics* (Cambridge University Press 2002).
- UNESCO (2005), *Vers les sociétés du savoir*, Technical report, UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000141907>.
- Valentin L., *Le Monde Subatomique* (Hermann 1986).
- Valentin L., *L'univers mécanique, introduction à la physique et à ses méthodes* (Hermann 1995).
- Verrier M., Chay P. & Gabion M. (2009), *Turboalternateurs*, Techniques de l'Ingénieur. <https://doi.org/10.51257/a-v2-d3530>.
- Von Neumann J. & Morgenstern O., *Theory of games and economic behavior* (Princeton University Press 1944).
- Weißbach D., Ruprecht G., Huke A., Czerski K., Gottlieb S. & Hussein A. (2013), *Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants*, Energy, **52**, pp. 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.029>.
- Witthöft M. & Rubin G.J. (2013), *Are Media Warnings about the Adverse Health Effects of Modern Life Self-Fulfilling? An Experimental Study on Idiopathic Environmental Intolerance Attributed to Electromagnetic Fields (IEI-EMF)*, Journal of Psychosomatic Research, **74**(3), pp. 206–212. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2012.12.002>.
- Yeganefar M. (2013), *À propos de la science et de la méthode scientifique*. <https://blogs.univ-poitiers.fr/n-yeganefar/2013/09/07/a-propos-de-la-science-et-de-la-methode-scientifique/>.
- Yiou P., *Le temps s'est-il détraqué? Comprendre les catastrophes climatiques* (Buchet-Chastel 2015).
- Zhu X.G., Long S.P. & Ort D.R. (2008), *What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass?* Current Opinion in Biotechnology, pp. 153–159. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.02.004>.