

8 Interférences et diffraction par deux fentes

Deux fentes verticales très étroites et très proches ménagées dans un écran opaque sont éclairées par la lumière **monochromatique** (d'une seule longueur d'onde λ) d'un laser. On observe, sur un écran placé à la distance D derrière les fentes, une image de diffraction dont l'aspect est un traitillé horizontal où se succèdent des **franges lumineuses** et des **franges sombres**.

Cette observation résulte des phénomènes de diffraction et d'interférences. La lumière incidente du laser est d'abord **diffractée** par les fentes qui se comportent comme deux sources ponctuelles qui émettent en phase des ondes de même longueur d'onde λ dont l'**interférence** sur l'écran produit l'image observée.

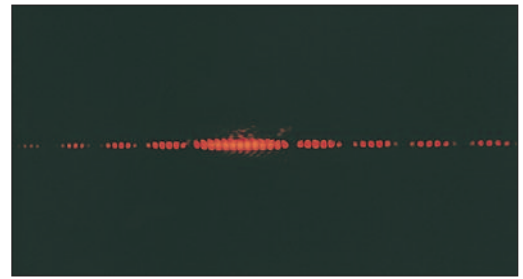
- Si, pour un point de l'écran, la différence de trajet des deux ondes est un multiple de la longueur d'onde, alors elles arrivent **en phase** sur l'écran et leur interférence **constructive** produit une frange lumineuse.
- Si, pour un autre point de l'écran, la différence de trajet des deux ondes est un multiple de la longueur d'onde augmenté d'une demi-longueur d'onde, alors elles arrivent en **opposition de phase** sur l'écran et leur interférence **destructive** produit une frange sombre.

On peut ainsi déterminer la position des franges sombres et lumineuses sur l'écran.

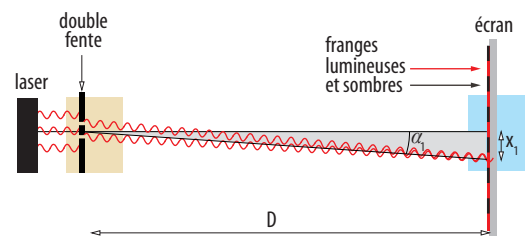
- Le point O , au centre de l'écran, est à égale distance des deux fentes; les deux ondes y parviennent en phase et produisent une frange lumineuse.
- La première frange lumineuse, à partir du point O , se trouve à la distance x_1 de O . Comme la distance D entre les fentes et l'écran est beaucoup plus grande que la distance a entre les fentes, les deux ondes atteignent le point P_1 en ayant suivi des chemins (quasiment) parallèles, dont la direction est définie par l'angle α_1 . Ces deux chemins n'ont pas la même longueur et leur différence est la distance Δd représentée sur le schéma. Pour produire une interférence constructive en P_1 , la différence de trajet est un multiple de la longueur d'onde; comme il s'agit de la première frange, $\Delta d = \lambda$.

Dans le triangle bleu sur le schéma de gauche représentant un gros plan sur les fentes, on remarque que

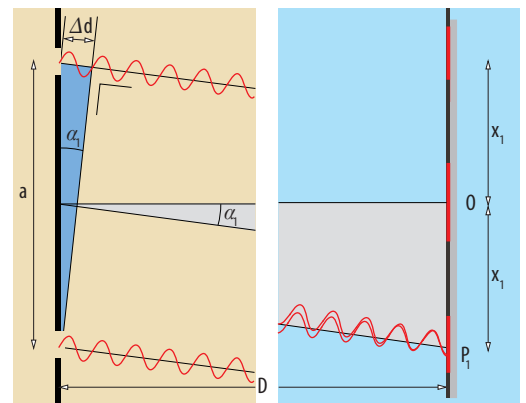
$$\sin \alpha_1 = \frac{\Delta d}{a} = \frac{\lambda}{a}$$



Frange d'interférence.



Vue d'ensemble.



Gros plan sur la double fente (à gauche) et l'écran (à droite).

et que, sur le schéma du haut, représentant la vue générale de la situation,

$$\tan \alpha_1 = \frac{x_1}{D}.$$

Comme α_1 est petit, on admet que

$$\sin \alpha_1 = \tan \alpha_1$$

et par conséquent

$$\frac{\lambda}{a} = \frac{x_1}{D}$$

On en tire finalement

$$x_1 = \frac{\lambda \cdot D}{a}$$

- Pour les autres franges lumineuses, la différence de trajet des ondes est un multiple $m \cdot \lambda$ de la longueur d'onde. La position des franges lumineuses, mesurées du point O de l'écran, est ainsi donnée par :

$$x_m = \frac{m \cdot \lambda \cdot D}{a}$$

où m est un nombre entier positif ou nul.

- Pour produire une interférence destructive correspondant aux franges sombres, la différence de trajet des ondes vaut

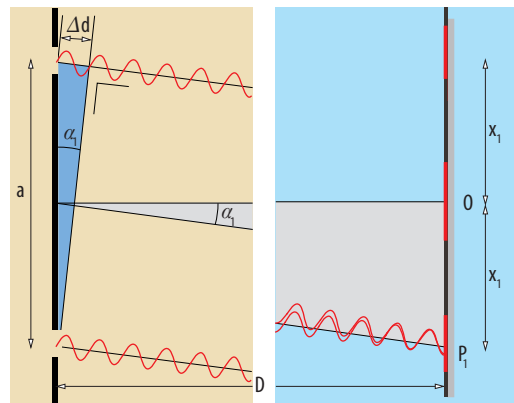
$$\Delta d' = \left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda$$

La position des franges sombres, mesurées du point O de l'écran, est alors donnée par :

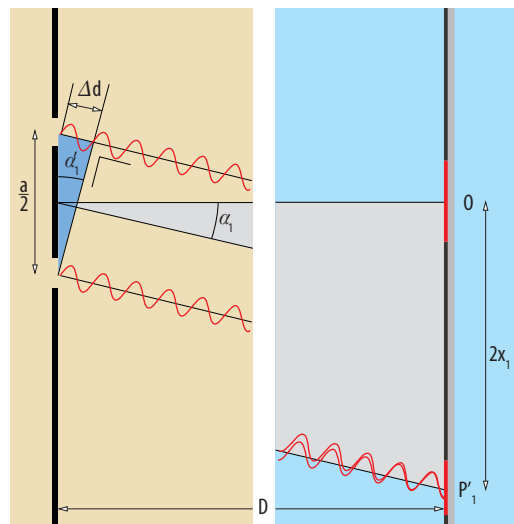
$$x'_m = \frac{\left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda \cdot D}{a}$$

où m est un nombre entier positif ou nul.

On peut déduire des expressions algébriques qui précèdent que plus les fentes sont rapprochées (a petit), plus les franges sont espacées (x_1 grand). Même si les fentes sont très étroites, elles ne sont pas ponctuelles et l'effet de leur épaisseur est de moduler l'intensité lumineuse des franges brillantes qui n'ont pas toutes la même luminosité ; certaines sont même invisibles.



Distance entre les fentes : a . Position de la première frange : x_1 .



Distance entre les fentes : $\frac{a}{2}$. Position de la première frange : $2x_1$.

9 Couleurs dans les lames minces

Lorsque le soleil éclaire une bulle de savon ou une mince couche d'essence recouvrant une flaque d'eau, on observe un phénomène d'irisation qui se manifeste sous forme de bandes colorées à la surface de la bulle ou de la flaque.

L'explication de ce phénomène est illustrée par l'exemple d'une mince couche d'essence d'épaisseur a recouvrant une flaque d'eau éclairée par de la lumière blanche, qui contient toutes les longueurs d'onde de la lumière, de $\lambda_v = 390$ nm pour le violet à $\lambda_r = 780$ nm pour le rouge.

Pour chaque couleur, la lumière incidente (n° 1) est réfléchiée sur chacune des faces de la mince couche d'essence, en I et en I' : pour un rayon qui arrive (n° 1) sur la lame, il y en a deux qui en repartent (n° 2 et 5). Si la couche d'essence est très mince (ce qui est mal représenté sur le schéma qui n'est pas à l'échelle), les ondes n° 2 et 5 sont superposées ; elles interfèrent et produisent ainsi les couleurs observées.

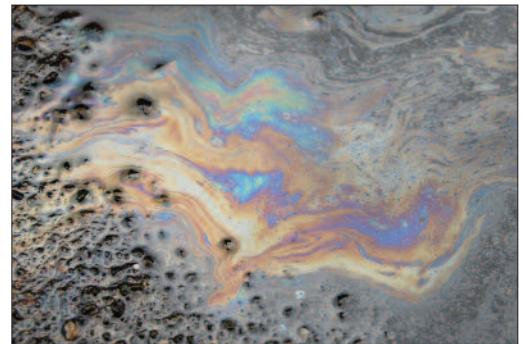
- La longueur d'onde pour laquelle les ondes n° 2 et 5 sont **en phase** produit une interférence **constructive** qui détermine la couleur dominante de la couche d'essence à l'endroit observé ; c'est le cas du rouge représenté sur le 2^e schéma ci-contre.
- Pour les autres longueurs d'onde, l'interférence est partiellement destructive et les couleurs correspondantes sont atténuées. Pour la longueur d'onde telle que les ondes n° 2 et 5 sont en **opposition de phase**, l'interférence est **totalement destructive**, et la couleur correspondante éliminée ; c'est le cas du bleu représenté sur le 3^e schéma.

Le résultat de l'interférence dépend de la longueur du trajet de la lumière à l'intérieur de la lame d'essence, autrement dit de son épaisseur et de l'incidence sous laquelle elle est éclairée. La description détaillée des phénomènes qui se produisent dans la lame est la suivante.

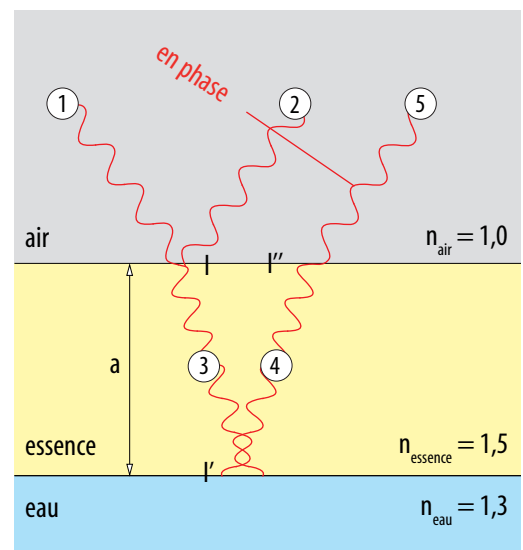
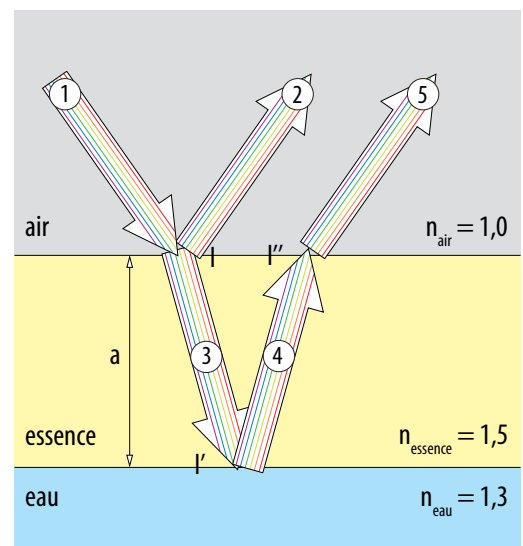
- Au point I , une partie de la lumière incidente est réfléchiée dans l'air (n° 2) et une partie est réfractée dans l'essence (n° 3).

Comme l'indice de réfraction n_{ess} de l'essence est plus grand que celui de l'air n_{air} , la vitesse de propagation de la lumière v_{ess} dans l'essence est plus petite que dans l'air, où on admet qu'elle est égale à c . En effet, par définition de l'indice de réfraction :

$$v_{ess} = \frac{c}{n_{ess}}$$



Irisation dans une fine couche d'essence.



Interférence constructive pour le rouge.

Or, lors du passage d'un milieu rapide vers un milieu lent, l'onde réfléchie (n° 2) est **renversée** lors de la réflexion en I .

- Lors du passage de la lumière de l'air dans l'essence, la fréquence f d'une couleur donnée reste la même, mais, comme la vitesse de propagation de la lumière change, sa longueur d'onde est modifiée: elle passe de la valeur λ dans l'air à la valeur λ_{ess} dans l'essence telles que:

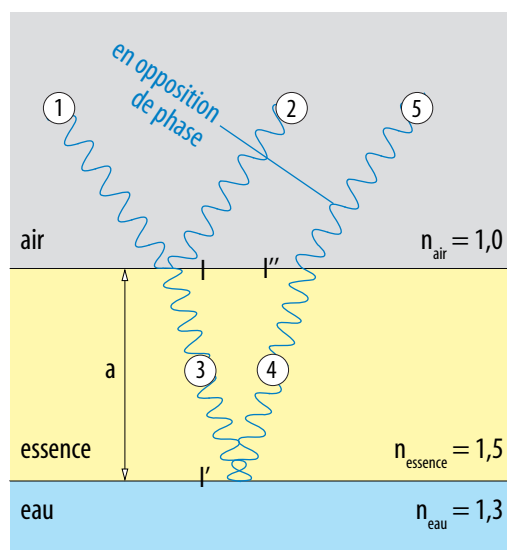
$$c = \lambda \cdot f$$

et

$$v_{\text{ess}} = \frac{c}{n_{\text{ess}}} = \lambda_{\text{ess}} \cdot f$$

On en tire:

$$\lambda_{\text{ess}} = \frac{\lambda}{n_{\text{ess}}} = \frac{\lambda}{1,5}$$



Interférence destructive pour le bleu.

- Au point I' , l'onde n° 3 est réfléchiée pour former l'onde n° 4. Comme l'indice de réfraction de l'eau est plus petit que celui de l'essence, la vitesse de propagation de la lumière est plus petite dans l'essence que dans l'eau et l'onde n° 4 n'est pas renversée par la réflexion.

Milieu	Propagation de la lumière		
Indice	Vitesse	Fréquence	Longueur d'onde
$n_{\text{air}} = 1,0$	$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$	f	$\lambda = \frac{c}{f}$
$n_{\text{ess}} = 1,5$	$v_{\text{ess}} = \frac{c}{n_{\text{ess}}}$	f	$\lambda_{\text{ess}} = \frac{v_{\text{ess}}}{f} = \frac{c}{f \cdot n_{\text{ess}}} = \frac{\lambda}{n_{\text{ess}}}$

- En I'' , l'onde n° 4 est réfractée dans l'air suivant l'onde n° 5.
- La couleur dominante de la lame à l'endroit observé correspond à la longueur d'onde pour laquelle les ondes n° 2 et 5 qui parviennent à l'observateur sont en phase et produisent une interférence constructive. Compte tenu du renversement de l'onde réfléchiée en I , le trajet supplémentaire des ondes n° 3 et 4 dans l'essence doit alors être un multiple de la longueur d'onde, augmenté d'une demi-longueur d'onde. Dans le cas particulier où la lumière incidente tombe perpendiculairement à la lame, toutes les ondes représentées sur le schéma sont perpendiculaires à la lame, et la longueur du trajet des ondes n° 3 et 4 dans l'essence vaut $2a$. On a alors:

$$2a = \left(m + \frac{1}{2}\right) \cdot \lambda_{\text{ess}} = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{n_{\text{ess}}}$$

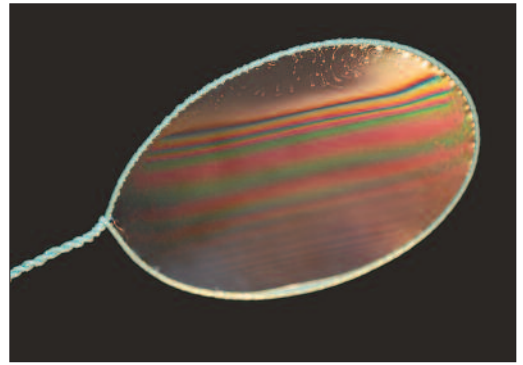
Pour une incidence perpendiculaire à la lame, la couleur observée correspond à la longueur d'onde comprise entre $\lambda_v = 390$ nm pour le violet à $\lambda_r = 780$ nm pour le rouge, telle que :

$$\lambda_m = \frac{4a \cdot n_{ess}}{2m + 1}$$

où m est un nombre entier positif ou nul.

Si la couleur de la lame n'est pas uniforme, c'est que ses différents points sont observés suivant des directions différentes et que son épaisseur n'est pas constante. La lame a l'aspect de franges aux couleurs de l'arc-en-ciel dont la disposition dépend de la position de l'observateur.

Toutes les situations où apparaissent des couleurs dans des lames minces s'expliquent à partir des mêmes arguments que dans l'exemple traité ci-dessus, mais en les adaptant à chaque situation particulière.



Irisation dans une lame d'eau savonneuse.

E x e r c i c e s • O N D 3

1 Déterminer la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques:

- a) dans l'eau (indice de réfraction: 1,33);
- b) dans le verre (indice de réfraction: 1,5);
- c) dans le diamant (indice de réfraction: 2,4).

2 A partir des valeurs des longueurs d'onde indiquées au paragraphe 2, déterminer les fréquences limite correspondant à chaque classe des ondes électromagnétiques.

3 Déterminer les fréquences correspondant aux 6 couleurs visibles.

4 Un faisceau parallèle arrive sur un miroir avec un angle d'incidence de 30° .

Construire, en utilisant le principe de Huygens, le faisceau réfléchi. Vérifier sur le résultat obtenu l'égalité des angles d'incidence et de réflexion.

5 Un faisceau de lumière parallèle passe de l'eau dans l'air; l'angle d'incidence vaut 40° .

Construire, en utilisant le principe de Huygens, le faisceau réfracté. Vérifier la loi de la réfraction en mesurant les angles d'incidence et de réfraction sur le résultat obtenu.

6 Un faisceau de lumière parallèle passe de l'eau dans l'air; l'angle d'incidence vaut 49° .

Construire, en utilisant le principe de Huygens, le faisceau réfracté. Que constate-t-on? Que se passe-t-il si l'angle d'incidence est supérieur à 49° ?

7 On regarde une source lumineuse à travers deux filtres polarisants superposés. Expliquer pourquoi, lorsqu'on fait pivoter l'un des filtres, l'intensité lumineuse passe par un maximum puis diminue jusqu'à l'extinction.

1 Les disques audionumériques

Le disque compact, qui a fait son apparition en 1983, est l'aboutissement de longues études d'optimisation. Les disques compacts ne sont enregistrés que sur une seule face, l'autre étant entièrement prise par l'étiquette. Ces disques ne subissent pas d'usure puisque la lecture se fait optiquement par un rayon laser, donc sans contact. Il existe deux variantes d'impression : mécano-optique, et magnéto-optique, c'est-à-dire effaçable et réenregistrable par l'utilisateur.



Pour obtenir un disque numérique, on part en général d'une bande originale numérique, corrigée, montée, qui est lue et si besoin convertie dans le codage du disque compact.

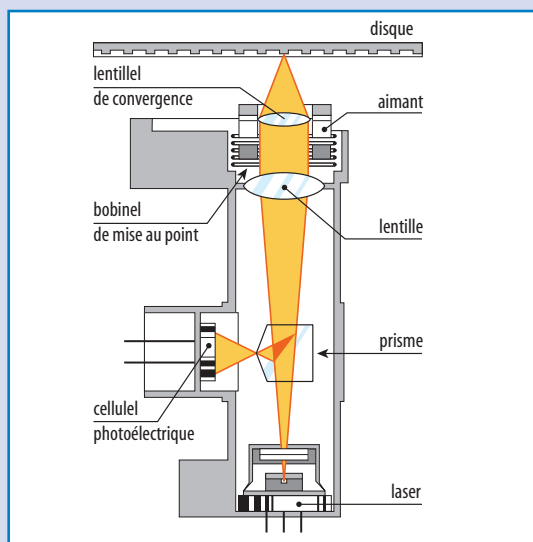
Le signal ainsi codé est envoyé dans un laser de gravure qui impressionne un disque de verre recouvert d'une pellicule photosensible. Le développement fait apparaître des petits creux qui peuvent être lus mais aussi dupliqués par galvanoplastie et pressage tout comme pour le disque ordinaire.

Le disque final est en matière transparente d'environ 1,2 mm d'épaisseur. La surface gravée est métallisée pour être réfléchissante et recouverte d'une couche de protection et de l'étiquette. La lecture se fait au travers de l'autre face par un petit faisceau laser réfléchi vers des cellules photoélectriques. Les différences de mise au point entre plats et microcuvettes produisent des écarts de luminosité, donc des variations de tension électrique qui engendrent les 1 du signal numérique, après quoi les processus de correction d'erreurs et de décodage restituent le signal analogique de départ.

Innovations et perspectives

Nous avons assisté, à la fin des années quatre-vingt, à une prolifération de formats, dictée souvent par des intérêts plus commerciaux que techniques. Le disque optique numérique se prête à tous les usages. Outre le son (CD-Audio), il peut véhiculer des images, fixes (CD-Photo) ou animées (CD-Vidéo, DVD), des programmes informatiques ou des données quelconques (CD-ROM), accessibles sélectivement et de façon interactive (CD-I), etc.

L'innovation la plus importante est sans nul doute le disque magnéto-optique, effaçable et réenregistrable à volonté, contrairement au CD mécano-optique classique, où l'information reste de type mécanique (reliefs ou creux), même si la lecture se fait par un processus optique. Le disque magnéto-optique porte une information de type magnétique sous forme d'une aimantation de la couche magnétique. Cette aimantation n'est plus parallèle à la piste comme sur les bandes, mais perpendiculaire au plan du disque, ce qui permet d'enregistrer et lire sans contact, par des procédés optiques. Le champ magnétique d'enregistrement n'a plus besoin d'être localisé avec précision sur la piste. Il est inférieur au champ coercitif de la couche et n'influence cette dernière qu'au point précis où le faisceau laser d'enregistrement élève momentanément la température au-dessus du point de Curie. Pour la lecture, on utilise l'effet Faraday, qui met en jeu un faisceau laser de lumière polarisée dont le plan de polarisation, à la réflexion, est dévié dans un sens qui dépend du sens d'aimantation de la couche.



Principe du lecteur de disque compact (CD).

2 L'utilisation des lasers en ophtalmologie

Les lasers peuvent avoir différents effets sur les tissus biologiques cible en fonction de leur longueur d'onde, de leur puissance et de leur durée d'application. Les applications des lasers en ophtalmologie dérivent des 3 principes types d'interaction de la lumière avec les tissus :

- **Un effet thermique :** l'absorption de l'énergie laser par les tissus absorbants (pigments de l'œil) provoque une augmentation de la température locale de 10° à 20°, ce qui les photocoagule (= dénature les protéines). On a donc ici une conversion de la lumière en chaleur.

Exemples : traitement de la rétinopathie diabétique (figures 1a et 1b) et de la forme classique de la dégénérescence maculaire liée à l'âge (figures 2a et 2b) avec les lasers à Argon ou Krypton.

- **Un effet mécanique :** l'absorption tissulaire de l'énergie laser, visible ou infrarouge, crée une microexplosion au moment où la température de l'eau passe au-dessus du point d'ébullition (= vaporisation). Le principe de cet effet repose sur la formation d'un plasma, c'est-à-dire d'un gaz fortement ionisé induit par la focalisation d'un grand nombre de photons sur une petite surface pendant un temps bref (une nanoseconde). Le plasma restitue l'énergie sous la forme d'une onde de choc.

Exemple : la capsulotomie postérieure au laser Nd-YAG en cas de cataracte secondaire.

- **Un effet photoablatif :** dans l'ultraviolet lointain, les photons sont si puissants qu'un seul photon peut casser une jonction intramoléculaire. Le rayonnement a une très faible pénétration et chaque photon casse une chaîne moléculaire quasiment sans effet thermique ni onde de choc. Les lasers permettent donc de réaliser une ablation en surface à l'échelle submicroscopique.

Exemples : le laser Excimer pour corriger la myopie et l'hypermétropie.

Actuellement, les effets thermiques représentent toujours le domaine principal des indications, dans un but prophylactique ou thérapeutique. Les effets mécaniques viennent en seconde position, puis les effets photoablatifs.

Il existe donc différents types de lasers utilisés en ophtalmologie, certains tels les lasers Argon vert (514 nm) et les lasers Krypton rouge (647 nm) vont traiter des maladies de la rétine. D'autres tels les lasers YAG (532 nm) et Excimer (193 nm) permettront de faire des interventions chirurgicales dans la partie antérieure de l'œil.

D^r René-Pierre COPT
Hôpital Ophtalmique, Lausanne

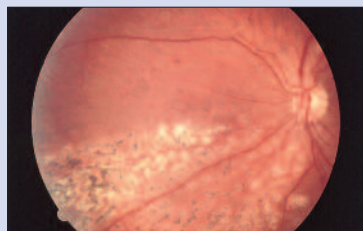


Figure 1a : rétinopathie diabétique avant traitement.

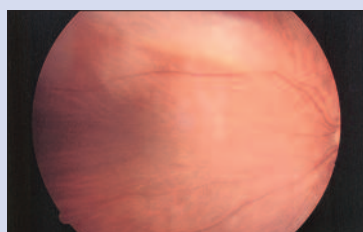


Figure 1b : rétinopathie diabétique après traitement.

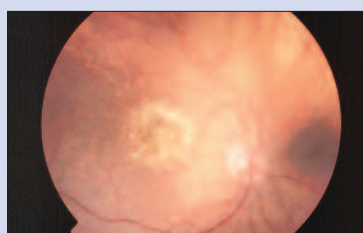


Figure 2a : dégénérescence maculaire liée à l'âge avant traitement.

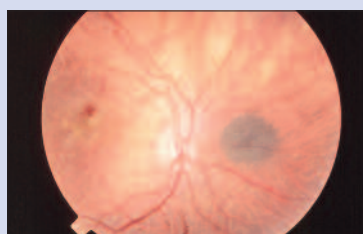


Figure 2b : dégénérescence maculaire liée à l'âge après traitement.

3 L'homme face aux champs électromagnétiques

Les champs électromagnétiques sont une composante essentielle de l'univers. Certains d'entre eux sont omniprésents : champ électrique atmosphérique, rayons cosmiques, champ magnétique terrestre. A ce bruit de fond naturel s'ajoutent aujourd'hui les champs électromagnétiques générés par la multiplication des applications de l'électricité. Dans quelle mesure ces rayonnements affectent-ils la santé des êtres vivants ? Favorisée par la propagation de rumeurs alarmistes, l'inquiétude se répand. Est-elle fondée ?

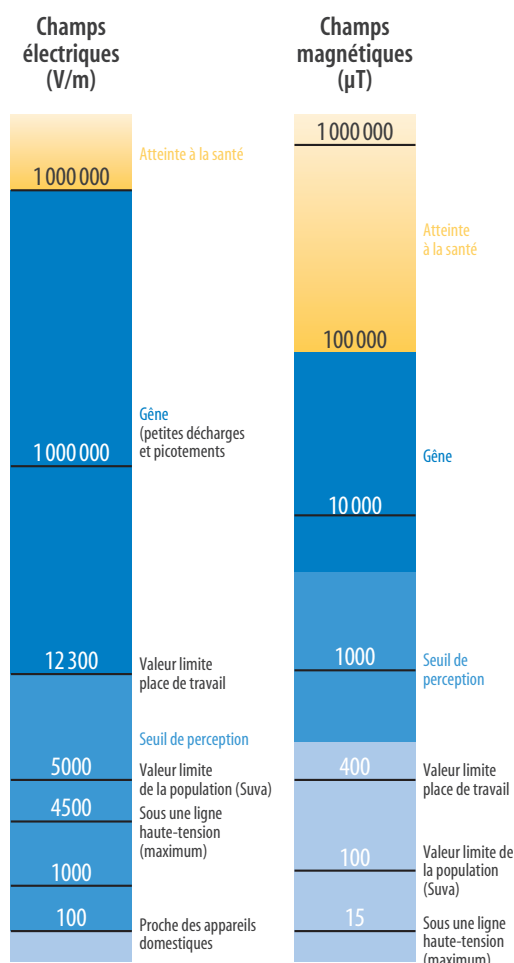
Notre exposition aux champs électriques est constante. En se déplaçant d'un endroit à l'autre, en enclenchant des appareils, l'homme s'expose à des forces électriques sans cesse changeantes. A partir d'un certain seuil, les champs deviennent physiquement perceptibles. dès 3000 volts par mètre (V/m), des personnes sensibles éprouvent une sensation de souffle. Au-delà de 20 000 volts, un individu sur vingt environ ressent des picotements au contact de la peau.

Or, il s'agit là de valeurs relativement élevées, perceptibles dans le voisinage immédiat d'installations électriques à haute tension. En revanche, la proximité des appareils domestiques ne génère que des champs situés entre 5 et 100 volts par mètre. Ces chiffres, qui relativisent d'emblée les risques sanitaires encourus, ont été confirmés par plusieurs études scientifiques réalisées notamment dans le cadre de l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

Valeurs limites

S'appuyant sur les travaux de l'OMS, la Commission internationale pour la protection contre les radiations non ionisantes (CIPRNI) a édicté en 1998 des valeurs limites d'exposition aux champs électromagnétiques. Les seuils retenus pour la population ont été fixés à 5000 volts par mètre (V/m) pour les champs électriques et à 100 microtesla (μT) pour les champs magnétiques. Ces valeurs ont été adoptées en Suisse dans le cadre de l'ordonnance sur la protection contre le rayonnement non ionisant (ORNI).

Ce sont des limites légales, au-delà desquelles toute exposition instantanée doit être évitée, et qui ont été définies avec une marge de sécurité considérable. En fait, les seuils réellement dangereux pour les organismes vivants sont nettement plus élevés. C'est à partir d'une exposition à 1 million de volts par mètre et de 100 000 microtesla que les atteintes à la santé sont avérées.



Effets des champs électromagnétiques sur les organismes vivants.

Chez soi

Réalisée de 1994 à 1995, une campagne de mesures a révélé que l'exposition de la population suisse aux champs magnétiques se situe autour de $0,2 \mu\text{T}$, valeur négligeable au regard du seuil légal de $100 \mu\text{T}$. Il s'agit d'une exposition moyenne. Le tableau 1 présente les champs résultant de l'utilisation des appareils électriques du ménage et du bureau.

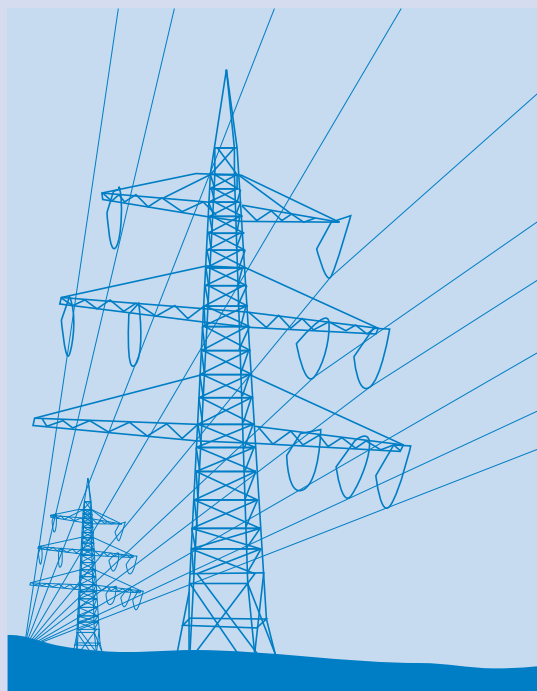


	Champ électrique (volts par mètre V/m)	Champ magnétique (microtesla μT)
Cuisinière	4	5
Fer à repasser	90	0,4
Aspirateur	20	20
Ecran vidéo	1 à 50	1,2 à 1,4
Imprimante	3 à 6	0,2 à 1,4

Champs électromagnétiques générés par des appareils d'utilisation courante. À comparer aux seuils de sécurité (5000 V/m et $100 \mu\text{T}$). Ces valeurs sont mesurées à 30 cm des appareils. Elles diminuent fortement en fonction de l'éloignement.

Sous les lignes

Les lignes électriques à haute tension suscitent certaines craintes. Leurs effets sur les organismes vivants ont fait l'objet de nombreuses études dans plusieurs pays. Aucune d'elles n'a débouché sur la preuve du déclenchement de maladies graves.



	Sous les fils	À 30 mètres	À 100 mètres
Champ électrique (V/m)	4500	400	25
Champ magnétique (μT)	15	1	0,01

Champs générés par une ligne à très haute tension de 380 kV (Galmiz-Verbois).