Faculté de physique et ingénierie
Université de Strasbourg

Jardin des sciences
Université de Strasbourg

Physique pour Tous !

UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

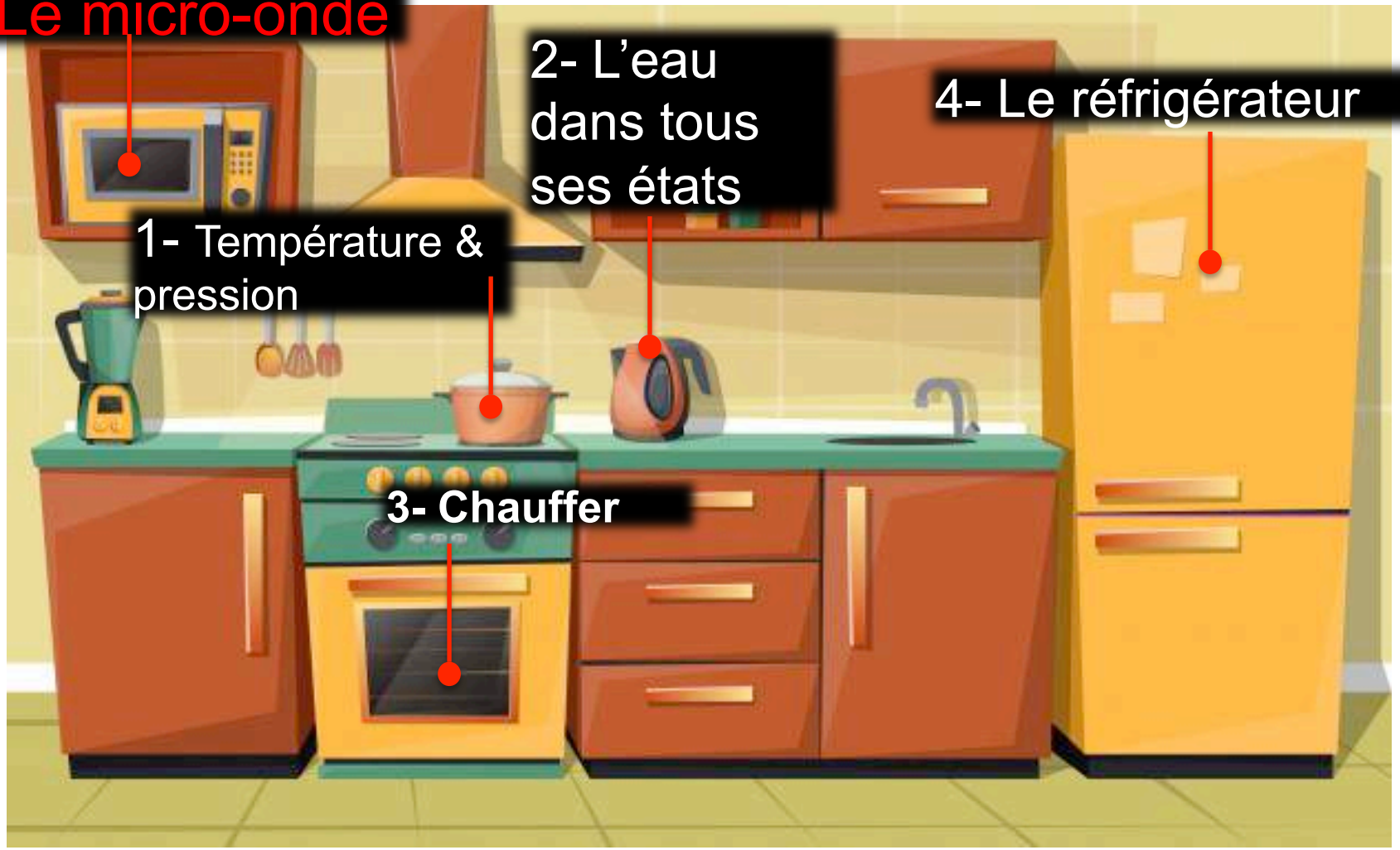
Site web: http://physiquepourtous.unistra.fr/
Mail: physiquepourtous@unistra.fr

Physique du quotidien

*Zoom sur les phénomènes et objets qui animent nos **cuisines***

Eric Chabert

La cuisine


5- Le micro-onde
2- L'eau dans tous ses états
4- Le réfrigérateur
1- Température & pression
3- Chauffer

Le four à micro-ondes

ou les ondes électromagnétiques au service de la cuisine

Mode d'emploi

Quiz en ligne

Sur le site www.menti.com
ou sur l'application *mentimeter*
Code à saisir

Mentimeter

Partie plus "technique"
Public "scientifique"

PISTE ROUGE

Ce qu'il fallait retenir

Idées d'expériences à faire à la maison (ou à l'école)

Interrogations "suprises"

Place aux questions à la fin de chaque partie

Menu du jour

- **Expériences avec un four à micro-ondes**
- Qu'est-ce qu'une onde ?
- Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ?
- Le principe du four à micro-ondes
- Questions sur son fonctionnement

Expérience: eau liquide & glaçon

Faire fondre un glaçon

Énergie = Chaleur latente x masse du glaçon
= 334 kJ/kg x 0.025 kg = 8.3 kJ

Chauffer de l'eau (20 cl à +10^{0}C):

Énergie = Capacité calorifique x masse d'eau x (différence de température)
= 4.18 x 0.2 x 10 = 8.3 kJ

→8.3 kJ permet de faire fondre un glaçon ou de chauffer 20 cl de 10^{0}C

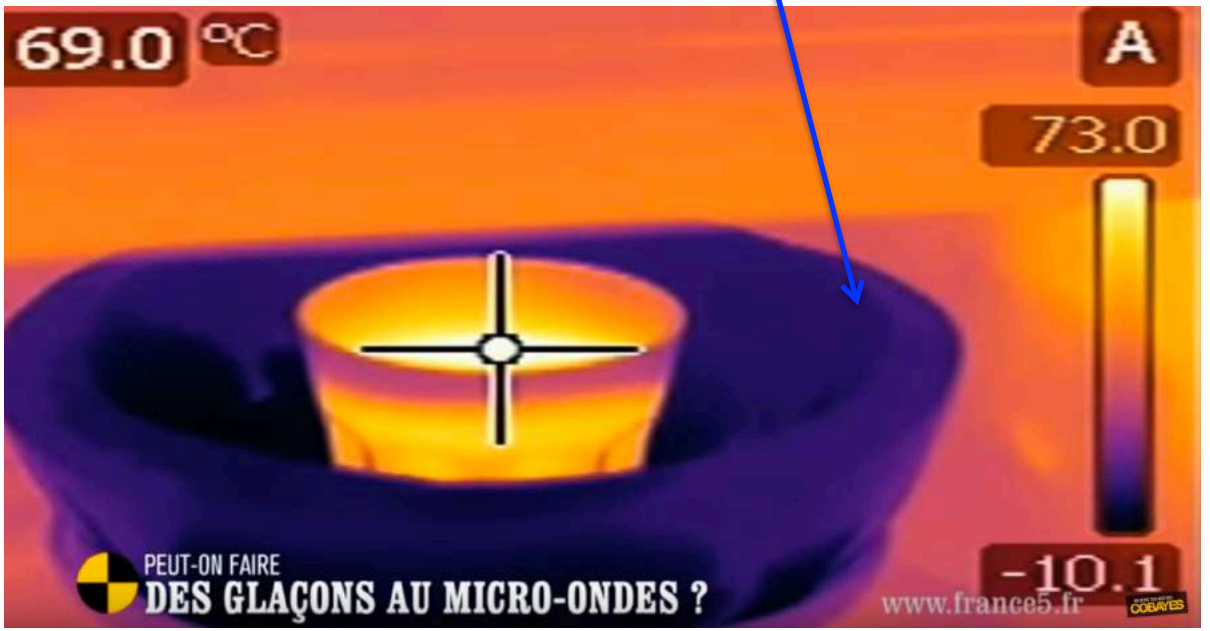
Pour un même temps de chauffage, la température de l'eau s'est élevée de plus de 10^{0}C alors que le glaçon a à peine fondu

Conclusion: le glaçon a reçu moins d'énergie que l'eau liquide

Expérience: eau liquide & glaçon

Eau liquide

glace



Expérience: Huile versus eau

Capacités calorifiques:

- Eau: 4.18 Joule/g/K
- Huile: 2 Joule/g/K

$$E = M \times C \times \Delta T$$

→ Pour une masse de liquide donnée, il faut 2 fois moins d'énergie pour augmenter la température de l'huile de 1 degré

→ Avec une même énergie déposée, la variation de température de l'huile devrait être 2 fois plus importante que pour l'eau.

Pour un même temps de chauffage, la température de l'eau s'est élevée bien plus que celle de l'eau.

Conclusion: l'eau a reçu plus d'énergie que l'huile

Expérience: pain frais & sec

Prenons maintenant un morceau de pain frais et de pain sec.
Qu'observe-t-on ?

Pour un même temps de chauffage, le pain frais chauffe plus que le pain sec, ce dernier contenant moins d'eau que le premier.

Conclusion: l'eau semble jouer un rôle dans le chauffage des aliments

Expérience: les contenants

Prenons maintenant différents contenants:

- Verre
- Assiette
- Récipient en plastique

Qu'observe-t-on ?

Pour un même temps de chauffage, les récipients chauffent très peu au regard de leur contenu (de l'eau ou des aliments)

Conclusion: l'eau semble jouer un rôle dans le chauffage des aliments

Expérience: pomme

Chauffons une pomme au four à micro-ondes.
Après chauffage, coupons la pomme et mesurons la température en différents points.

Qu'observe-t-on ?

La température au centre de la pomme est plus importante que la température en surface.

Conclusion: le chauffage n'est pas compatible avec un mode de transfert par conduction. Le chauffage s'effectue dans l'ensemble du « volume », pas en surface.

Quiz

Que se passe-t-il si l'on chauffe très longtemps un oeuf au four à micro-onde ?

Mentimeter

Expérience: un oeuf

Expérience: tomate

Comparaison des modes de chauffage

Comparons les temps nécessaires pour chauffer 1 litre d'eau avec les trois appareils présentés ci-dessus. Comparons les rendements obtenus.

Qu'observe-t-on ?

Question:

Quel est le mode de chauffage de l'eau ayant le meilleur rendement ?

Mentimeter

Expérience: rendement ?

On choisit ici de définir le **rendement** comme le rapport entre l'énergie utile au chauffage de l'eau (thermique) et l'énergie électrique consommée:

$$\frac{\text{Capacité calorifique x (Masse d'eau) x (différence de température)}}{\text{Puissance électrique x (temps de chauffage)}}$$

Rappel: Capacité calorifique = 4.18 KJ/kg/K

Expérience: rendement ?

	Bouilloire	Plaques	Micro-ondes
Puissance (W)	2080	1180	1460
Temps (s)	60	120	120
Energie consommée (J)	124800	141600	175200
Masse d'eau (kg)	1	1	1
Différence de température	25	24,9	21,2
Energie transmise (J)	104500	104082	88616
Rendement	0,8373397	0,73504237	0,5057991

Ces chiffres sont issues d'une seule mesure.
Les résultats pourrait varier si l'on changeait les conditions (volume, choix du récipient, etc …). Toutefois la conclusion principale resterait la même.
Mesures à reproduire dans le cas d'un aliment différent de l'eau

Conclusion: le rendement est supérieur dans le cas de la bouilloire (83%)

Question: pourquoi la puissance électrique du four à micro-ondes est différente de celle qui est indiquée sur le bouton en façade ?

Expérience: position

Comparons l'évolution de la température pour trois verres identiques contenant la même quantité d'eau mais placés à différents endroits

Qu'observe-t-on ?

Conclusion: Le chauffage dépend de la position des verres

Expérience: tablette de chocolat

Plaçons une tablette de chocolat et chauffons la en désactivant le plateau tournant.

Qu'observe-t-on ?

Conclusion: le chauffage n'est pas uniforme.

Il y a des points chauds et des points plus froids.

Conclusions des expériences

- L'eau liquide est mieux chauffée que l'huile ou la glace ou que les contenants
  - La chaleur reçue n'est pas proportionnelle à la capacité calorifique
  - L'énergie reçue dépend du corps et de son état
  - **Question**: Pourquoi l'eau reçoit plus d'énergie ?

- L'énergie semble déposée dans le volume et non pas provenir de l'extérieur
  - Ne correspond pas à un chauffage par conduction
  - **Question**: Quel est le mode de transport de l'énergie ?

- Le chauffage n'est pas uniforme
  - Nécessité d'avoir un plateau tournant
  - **Question**: A quoi correspond la répartition des zones chaudes & froides ?

Remarque: il n'est si trivial d'établir une correspondance directe entre le temps de chauffe et la température obtenue

Menu du jour

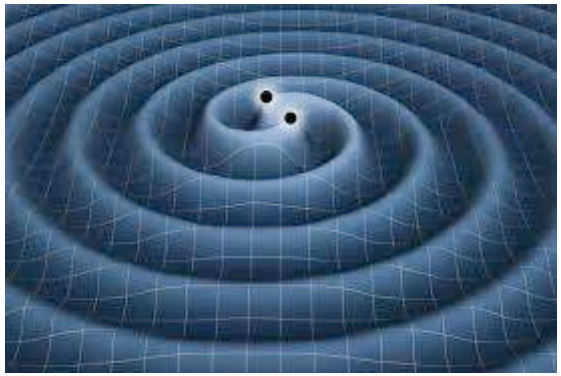
- Expériences avec un four à micro-ondes
- **Qu'est-ce qu'une onde ?**
- Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ?
- Le principe du four à micro-ondes
- Questions sur son fonctionnement

Les ondes

Ondes électromagnétiques

Ondes mécaniques

Ondes gravitationnelles



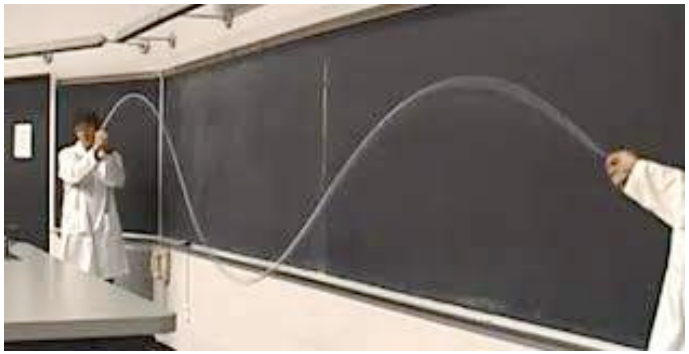
Qu'est-ce qu'une onde ?

Définition: Propagation (***spatiale***) d'une perturbation (***variation temporelle***) de l'état physique d'un milieu

- **Type de perturbation**
  → ondes mécaniques / électromagnétiques / gravitationnelles
- **Vitesse de propagation (finie):**
  Ex: vitesse du son (dans l'air: ~340 m/s soit ~ 1200 km/h)
  Ex: vitesse de la lumière (dans le vide: ~300 000 km/s)

https://www.youtube.com/watch?v=xjfd-gu1vA4

Expérience corde vibrante

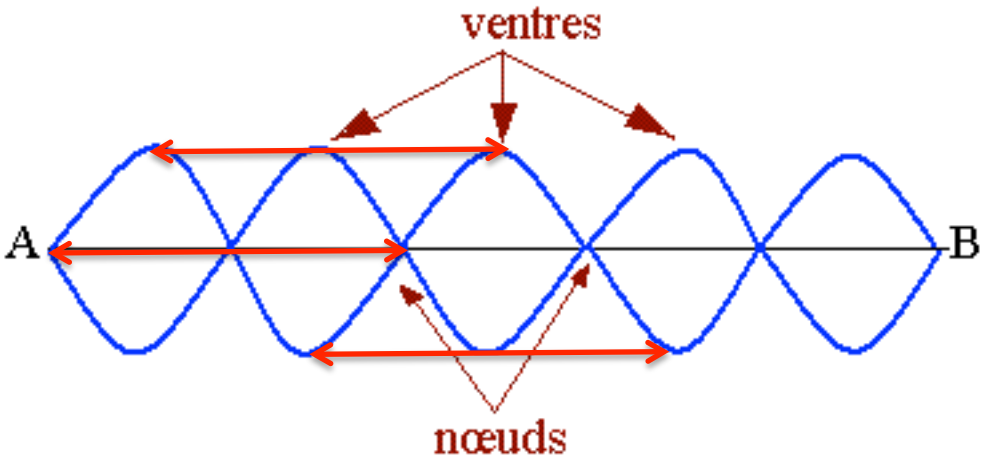


https://www.youtube.com/watch?v=LG7eKsWB4DI

Ondes

On a des motifs (oscillations) qui se répètent dans le temps et dans l'espace.

Longueur d'onde: distance correspondant à une oscillation (un motif).



Noeuds: points fixes - il n'y a pas de variation au cours du temps en ces points.

Ventres: les variations sont extrêmes en ces points

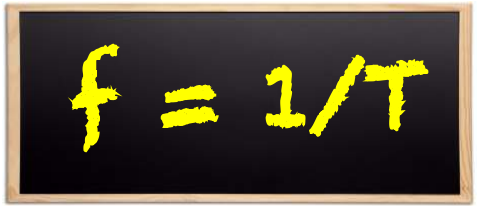
La fréquence

Diapason
Fréquence = 440 Hz
→ Il vibre 440 fois par seconde

Balançoire
Fréquence = 0.5 Hz
→ L'enfant revient à la même position toutes les 2 secondes

Période (T) [s]: temps nécessaire pour effectuer une oscillation

Fréquence (f) [Hz=/s]: nombre d'oscillations effectuées par seconde



Longueur d'onde

Longueur d'onde

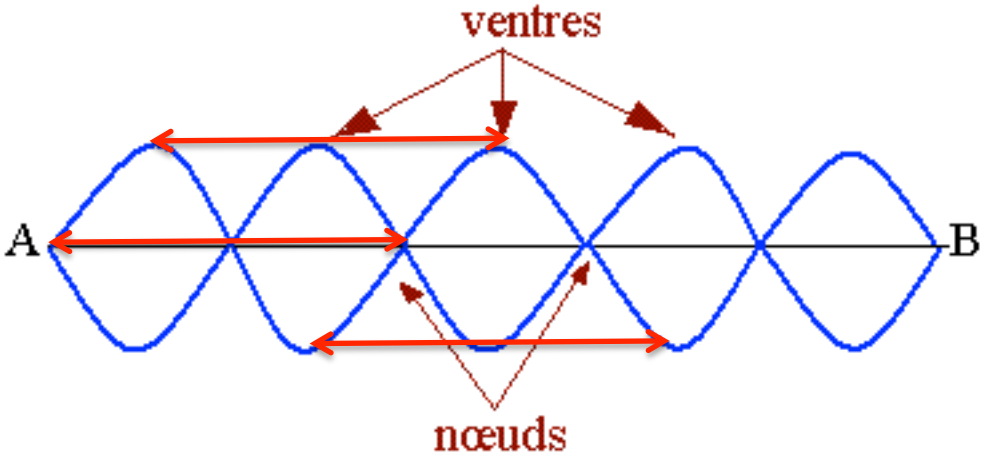
Période

$f = 1/T$

$\lambda = v \times T$

Fréquence

Vitesse de propagation de l'onde



Onde stationnaire

Possible lorsque l'onde se déplace dans un milieu borné

Ex: deux points "fixes" dans la cas de la corde vibrante

Ex: une cuve

L'onde est réfléchie sur les parois

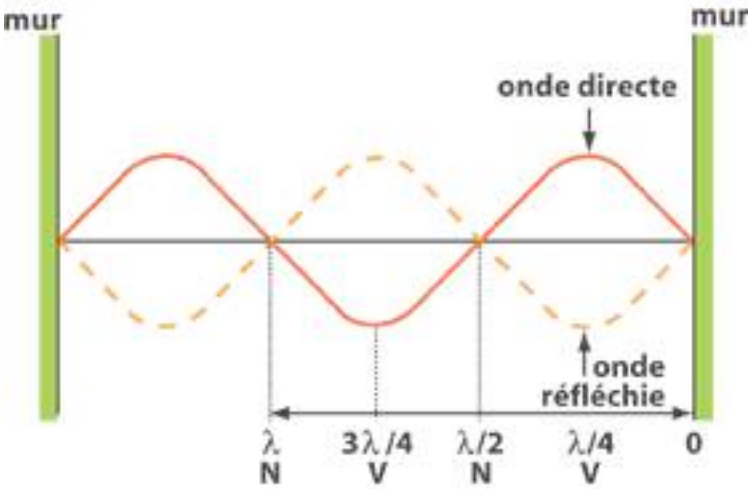


Illustration des réflexions optiques

Les **fréquences** d'établissement des ondes stationnaires dépendent des **dimensions** du milieu (enceinte) et de la **vitesse** de propagation de l'onde

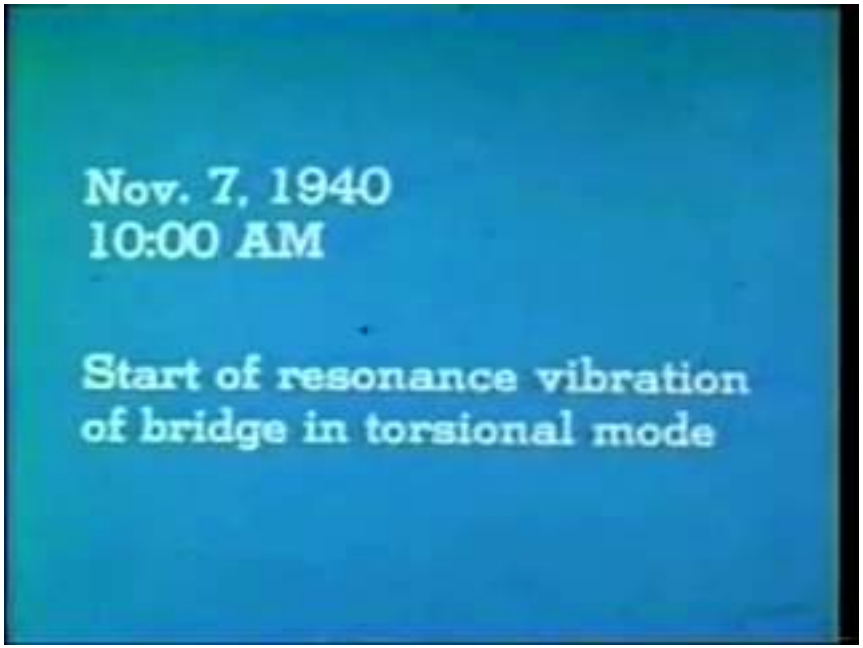
Onde: transférer de l'énergie

https://www.youtube.com/watch?v=JDnNmLkQ3Bc

Les corps possèdent des fréquences de résonances qui dépendent notamment de leurs caractéristiques géométriques

Onde: transférer de l'énergie

https://www.youtube.com/watch?v=uhWQ5zr5_xc



Pont tocama (USA)
7/11/1940

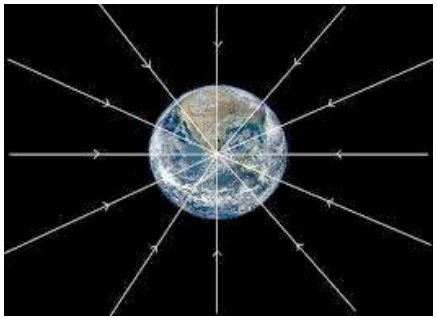
L'amplitude des oscillations est augmentée lorsque l'on fournit de l'énergie au système à une fréquence qui correspond à sa résonance.

Menu du jour

- Expériences avec un four à micro-ondes
- Qu'est-ce qu'une onde ?
- **Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ?**
- Le principe du four à micro-ondes
- Questions sur son fonctionnement

Champ gravitationnel

Présence d'une masse



Champ gravitationnel

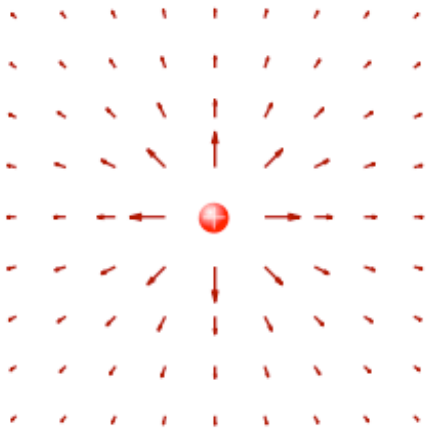
Force gravitationnelle

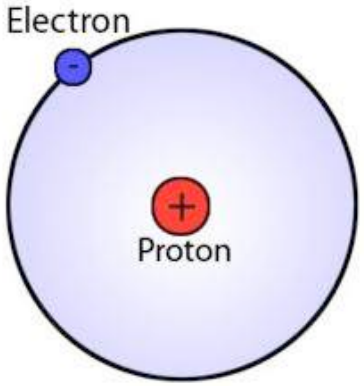
Présence d'un objet massif (ex: Terre)

→ Création d'un champ gravitationnelle

→ Force s'exerçant sur un autre corps massif (ex: Lune)

Champ électrique



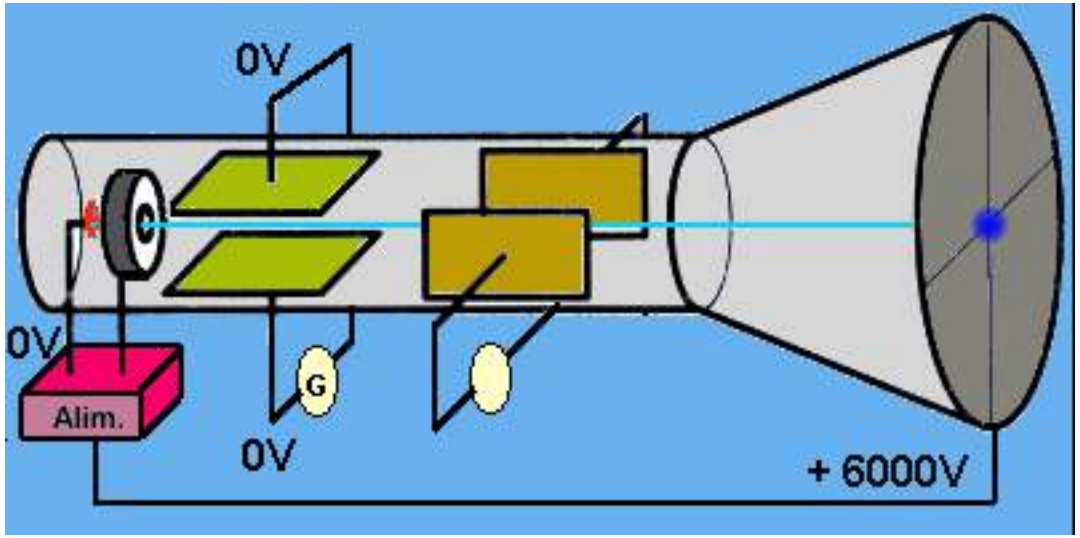


Présence de charge électrique

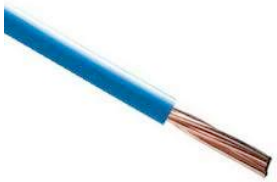
→ Création d'un champ électrique

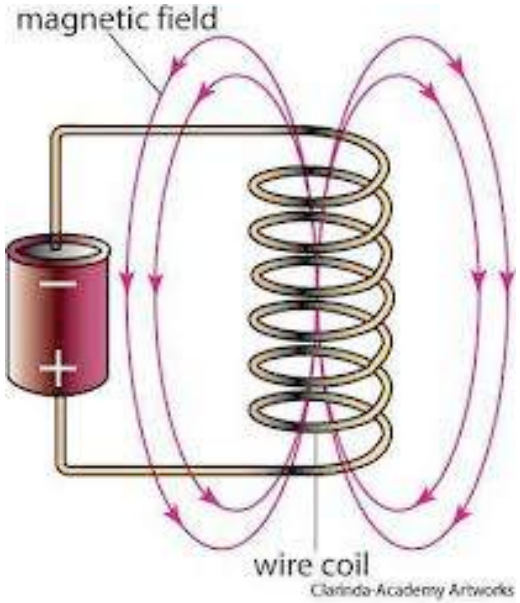
→ Force s'exerçant sur une charge électrique

L'exemple du tube cathodique



Champ magnétique



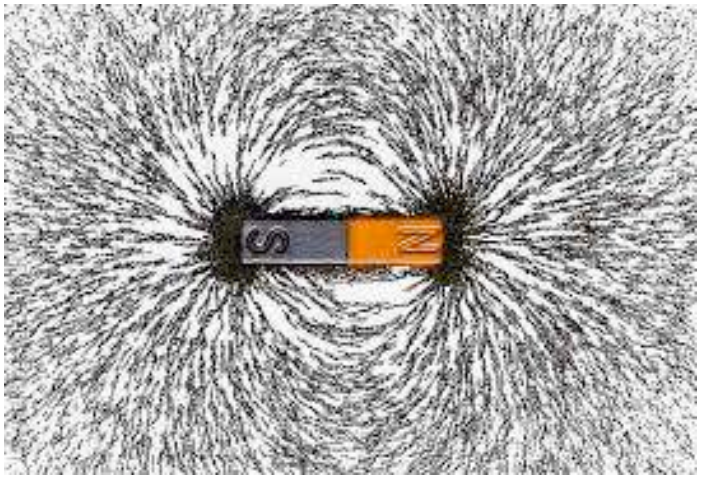


1 - Présence de charge électrique en mouvement

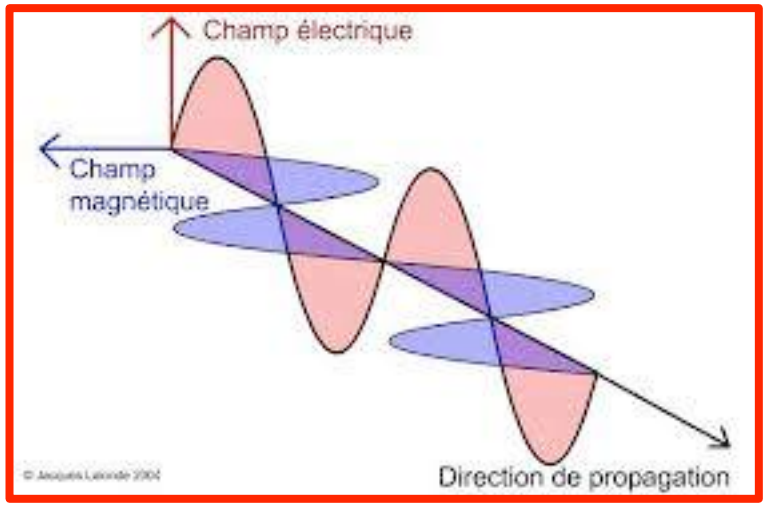
→ Création d'un champ magnétique

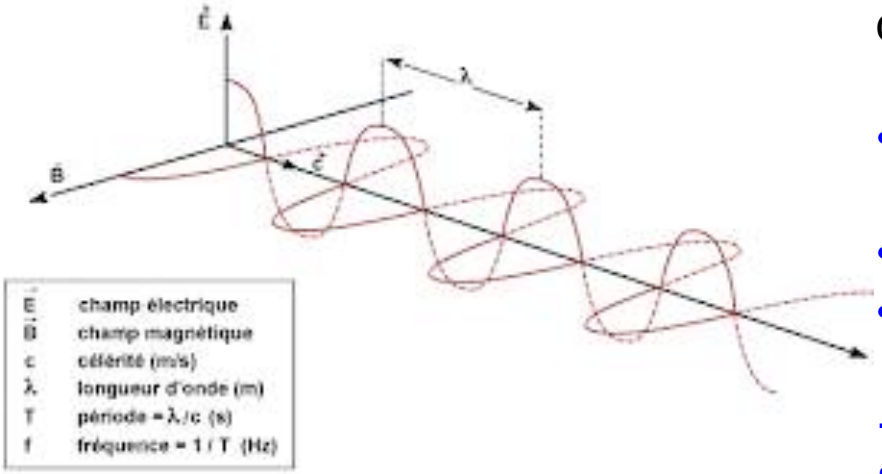
→ Force "déviant" la trajectoire d'une charge électrique

2 – Aimants permanents



Onde électromagnétique





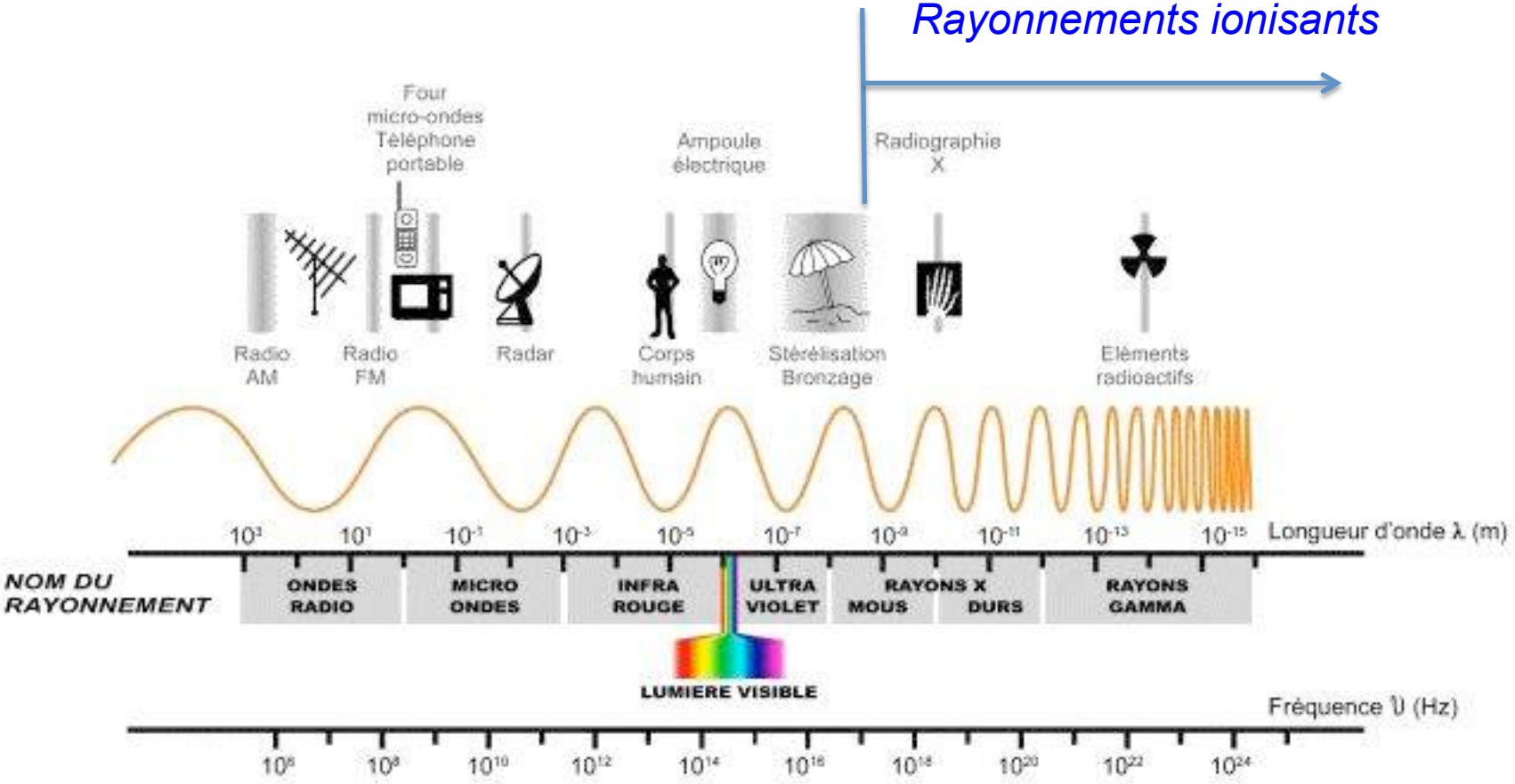
Propagation simultanée d'un champ électrique et d'un champ magnétique (perpendiculaire) variant au cours du temps (et donc de l'espace)

Comme tout type d'onde, une onde électromagnétique est caractérisée par 3 quantités interdépendantes:

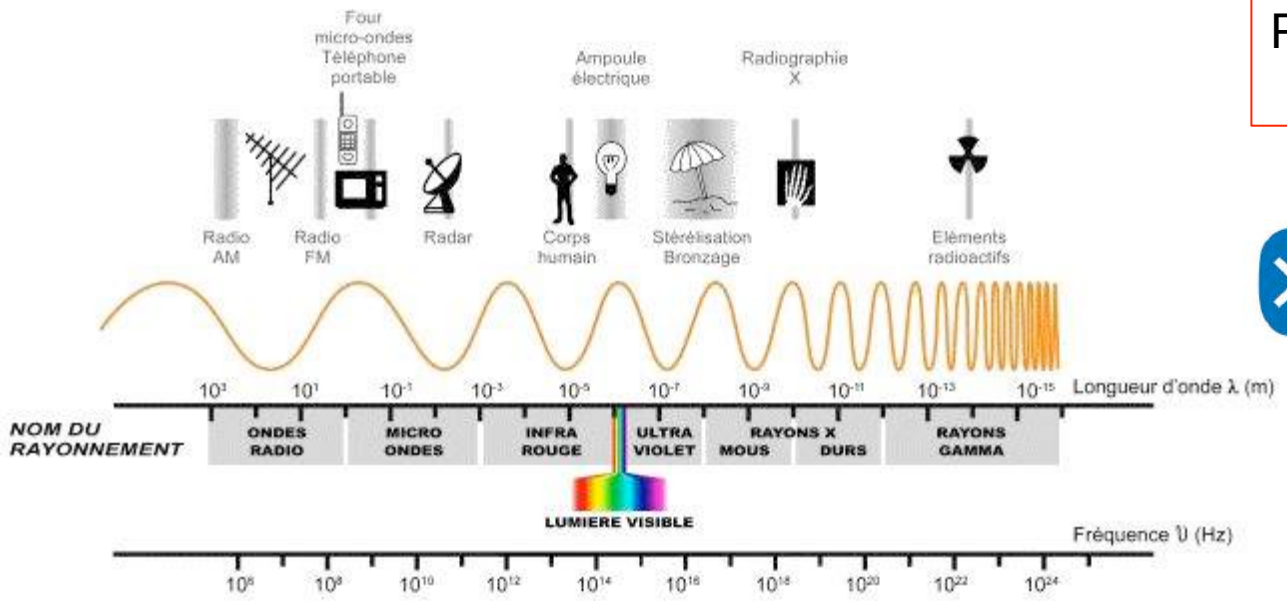
- Vitesse: (300 000 km/s dans le vide, mais moins dans la matière)
- Fréquence
- Longueur d'onde

→ La vitesse étant fixée, il suffit de connaître la fréquence (ou la longueur d'onde)

Les ondes électromagnétiques



Les micro-ondes



Plage de 1 GHz à 300 GHz
soit 30 cm à 1 mm

Four à micro-ondes: 2.45 GHz

Bluethooth	2.4-2.5 GHz
Wifi	2.5 – 5 GHz
Téléphonie	plages entre 0.7 et 2.6 GHz
GPS	1.2 et 1.5 GHz
Radar routier	24 GHz

- Micro sans fil
- Les babyphones
- Détecteurs de mouvements
- …

Menu du jour

- Expérience avec un four à micro-ondes
- Qu'est-ce qu'une onde ?
- Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ?
- **Le principe du four à micro-ondes**
- Questions sur son fonctionnement

Quiz

L’eau peut-elle se mouvoir en présence d’un champ électrique ?

Mentimeter

Expérience

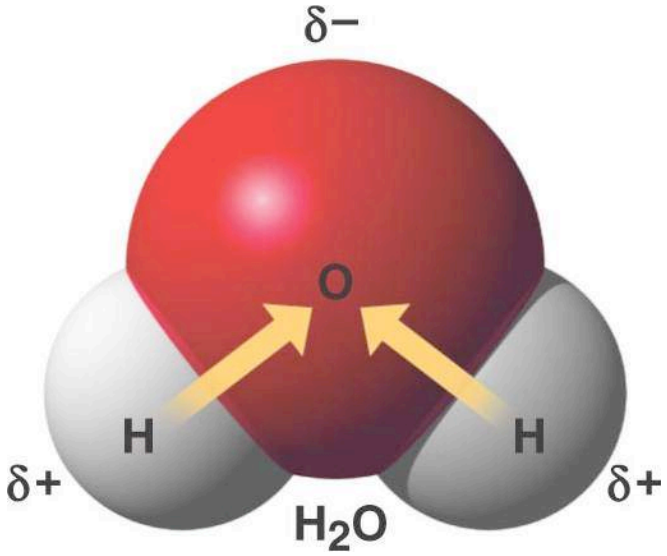
https://www.youtube.com/watch?v=amANIY-PI_g

Conclusion: l'électricité statique permet de dévier un filet d'eau.

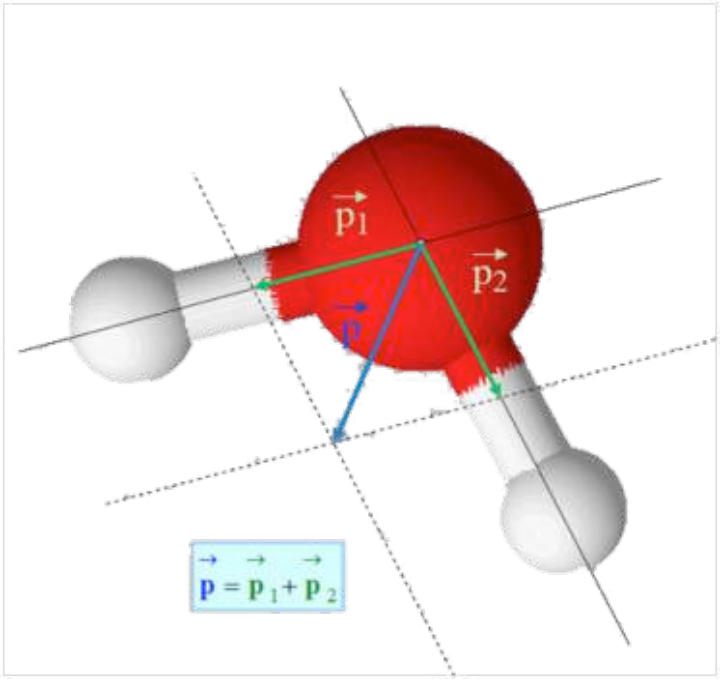
→ L'eau est "sensible" à la présence de charges (champs) électriques.

Les molécule d'eau: H_2O

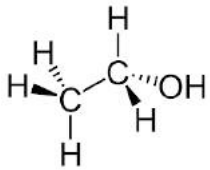
PISTE ROUGE

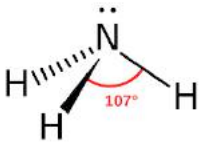


- La molécule d'eau est globalement électriquement neutre → charge totale nulle
- Les atomes d'Hydrogène et d'Oxygène attirent plus ou moins les électrons
- La molécule d'eau n'étant pas symétrique, elle possède un moment dipolaire

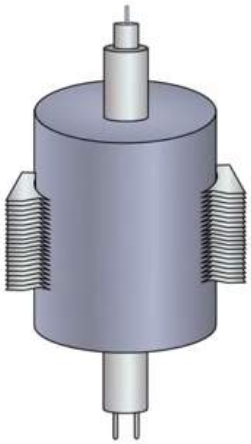


- La molécule d'eau n'est pas la seule à posséder un moment dipolaire:
  - L'éthanol (C_2H_5OH)
  - L'ammonique (NH_3)
  - etc …



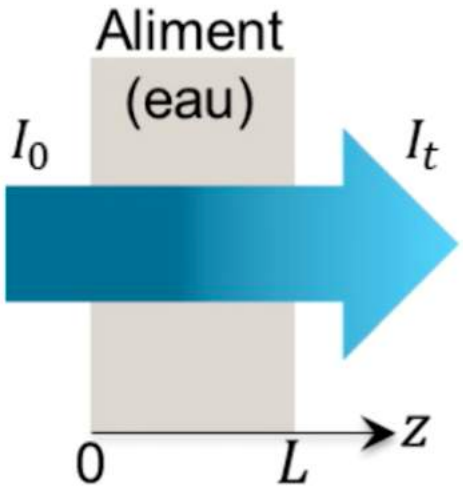


Chauffer en “bougeant” les molécules

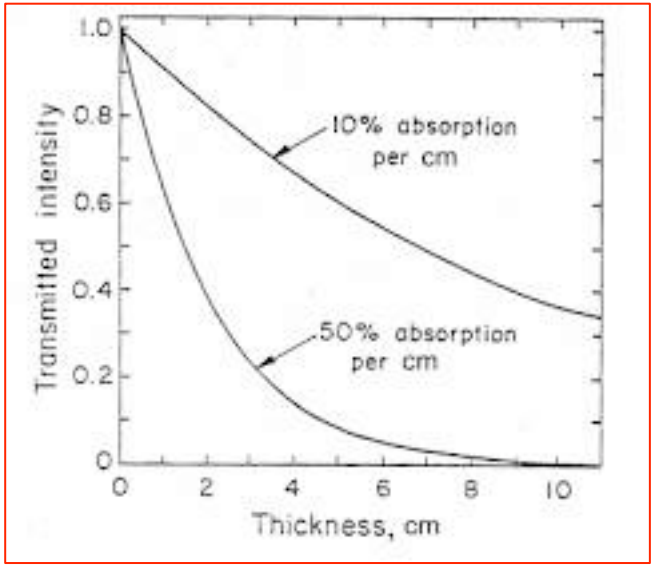


https://www.youtube.com/watch?v=a4o-MJ1X5aw

Absorption des ondes



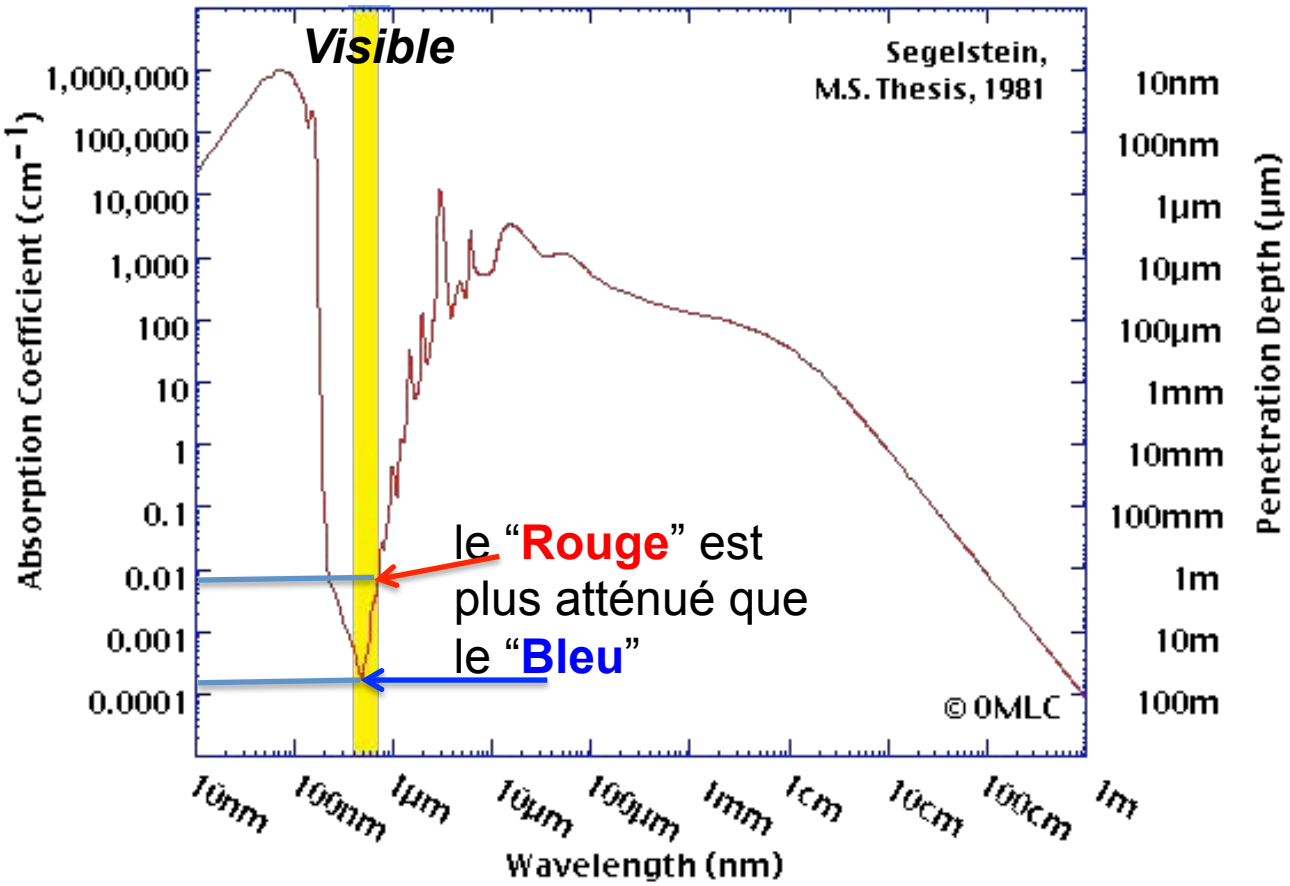
$$I_t = I_0 e^{-\alpha(f)L}$$



- L'intensité de l'onde électromagnétique décroit de manière exponentielle avec l'épaisseur du milieu traversé.
- Le coefficient d'absorption dépend de la fréquence de l'onde électromagnétique

Absorption des ondes

PISTE ROUGE



$$I_t = I_0 e^{-\alpha(f)L}$$

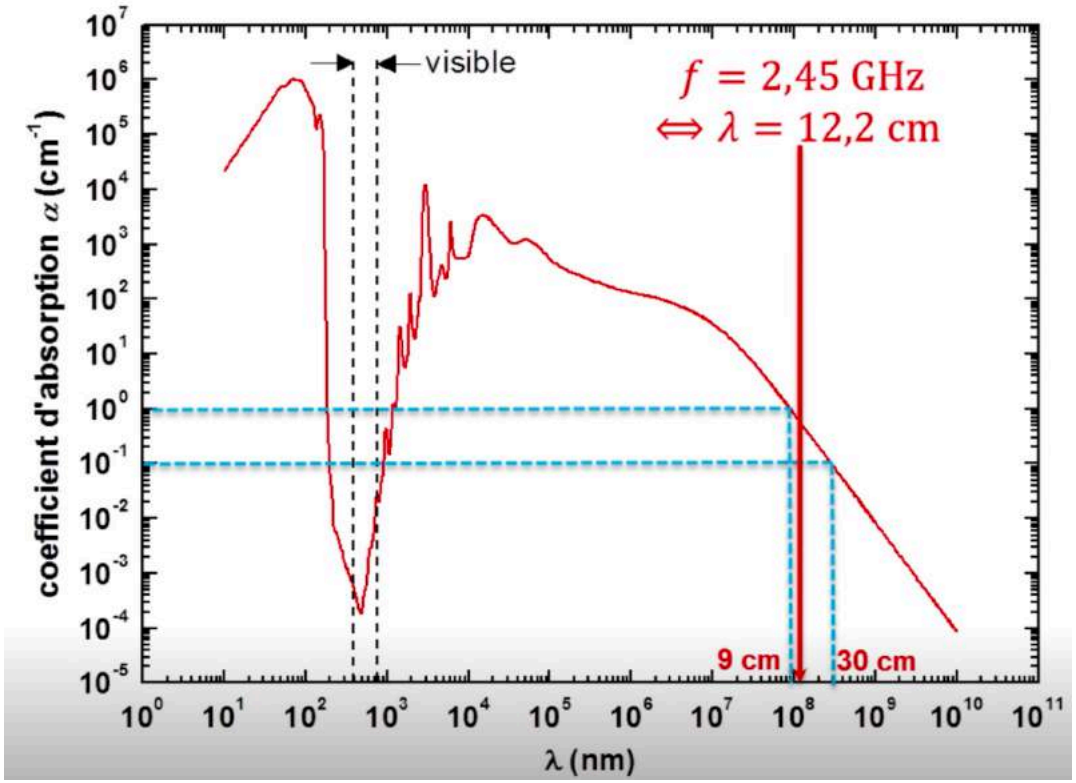
- L'absorption est faible dans le "visible"

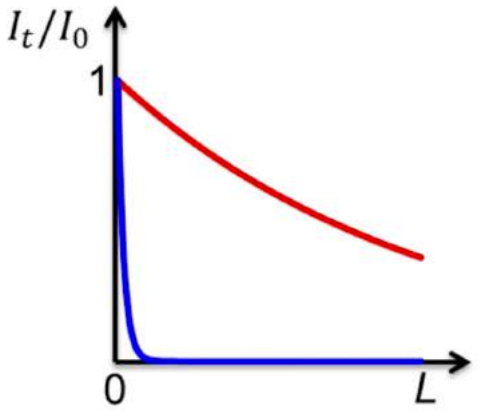
→ l'eau liquide semble quasiment transparente (il faut plusieurs mètres d'eau pour percevoir l'effet → eau « bleue »)

- L'absorption est beaucoup plus forte pour d'autres valeurs de longueur d'onde

Absorption des ondes

PISTE ROUGE





$$I_t = I_0 e^{-\alpha(f)L}$$

- On souhaite que l'essentiel du dépôt d'énergie se fasse dans le volume d'un aliment (L ~ 1 à 10 cm) → 0.1 cm^{-1}<α<1 cm^{-1}
- Le micro-onde fonctionne avec une fréquence de 2.45 GHz et donc une longueur d'onde de 12.2 cm
- Le coefficient d'absorption est d'environ 0.5 cm^{-1} → 2/3 de l'énergie est absorbée sur ~2 cm

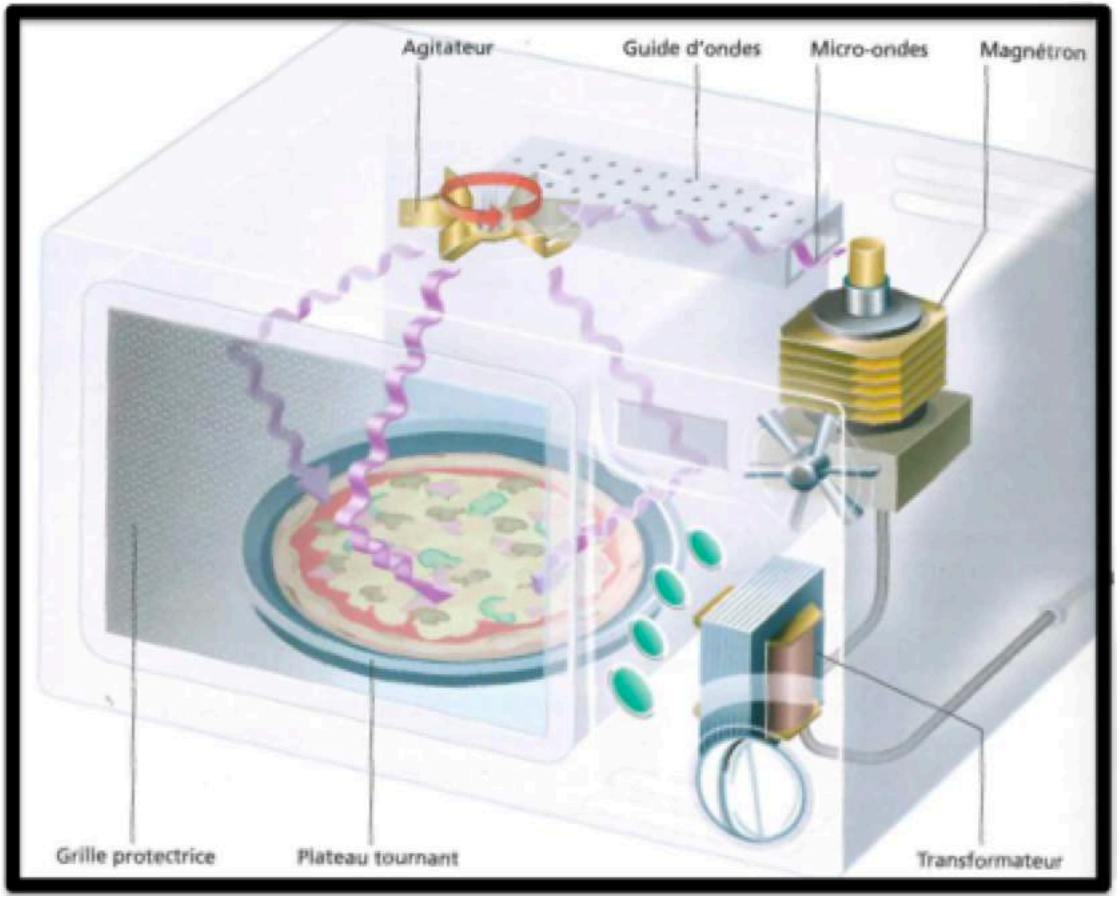
L'invention du four à micro-ondes

1946: Découverte accidentelle par un ingénieur américain Percy Spencer de l'action d'un magnétron, conçu pour les radars, sur une barre de chocolat

1947: Commercialisation du 1er four à micro-ondes « Radarange ». 1m 80 – 340 kg

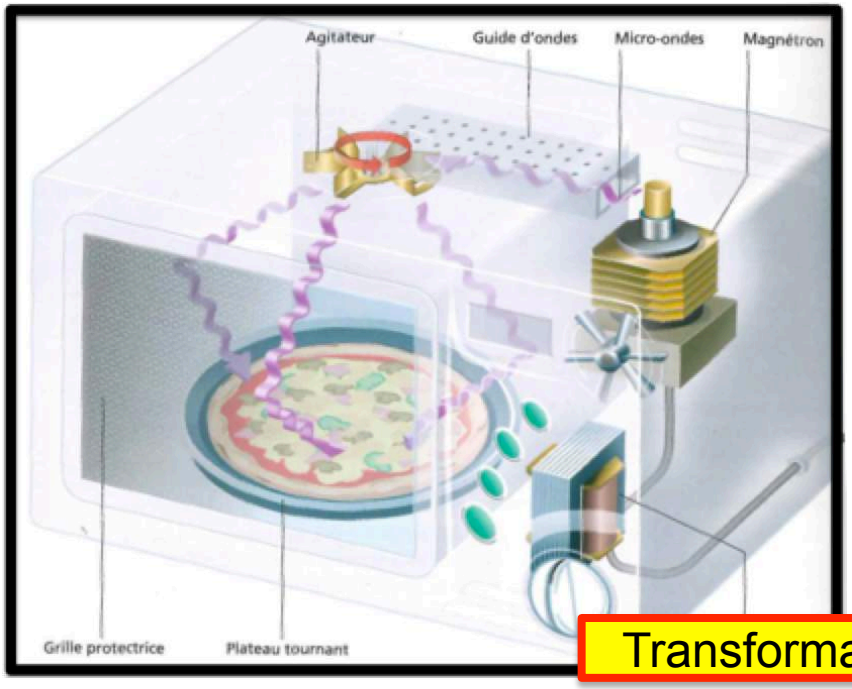
1975: après un effort de miniaturisation, des modèles grand public voient le jour.

Schéma



@ Physique par les objets quotidiens
Ray-Poizat –BELIN – Pour la science

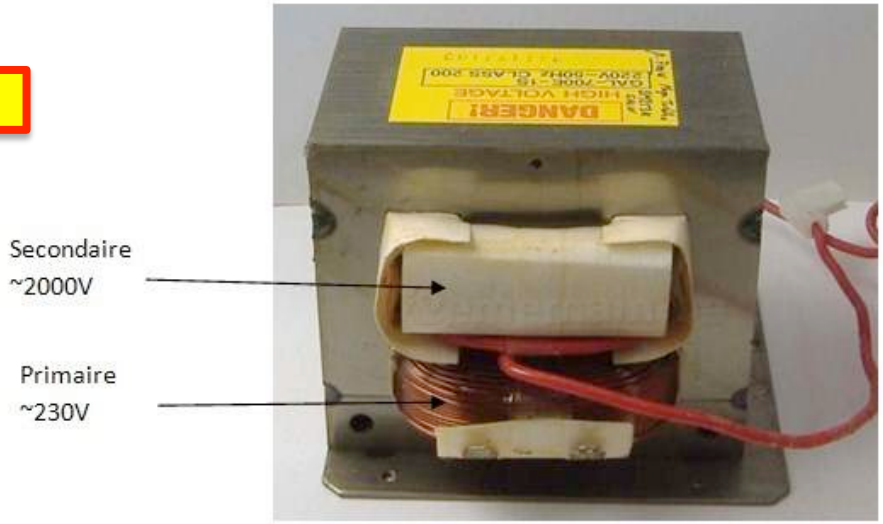
Le transformateur



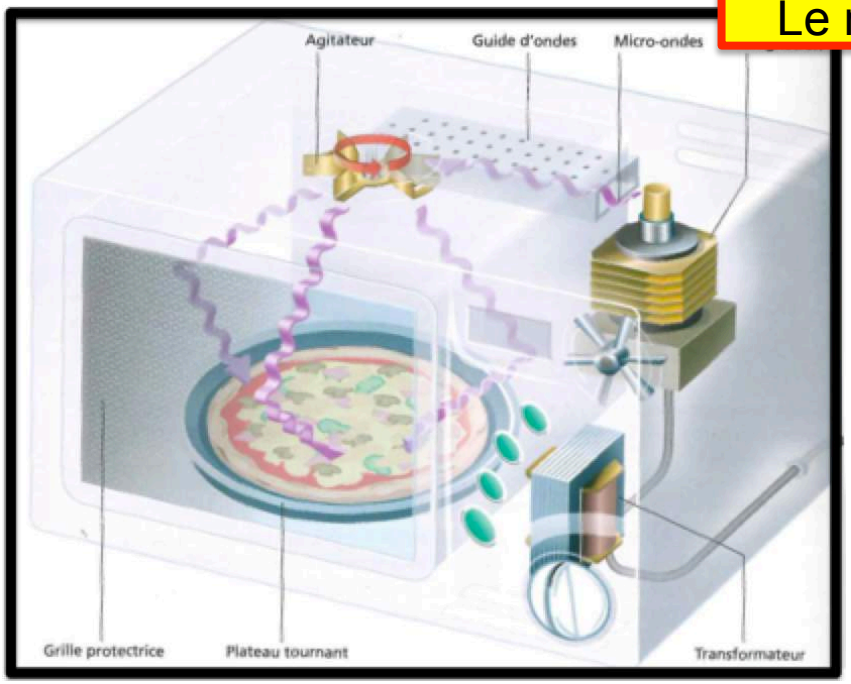
Transformateur

- Le transformateur va permettre d'obtenir une tension d'environ 2000 V à partir du 220 V.
- Il est basé sur 2 bobines ayant des nombres de spires différents.
- La puissance P = U x I étant constante, l'intensité est réduite d'un facteur ~ 8

→ Principe déjà évoqué pour transporter le courant sur des lignes à haute tension



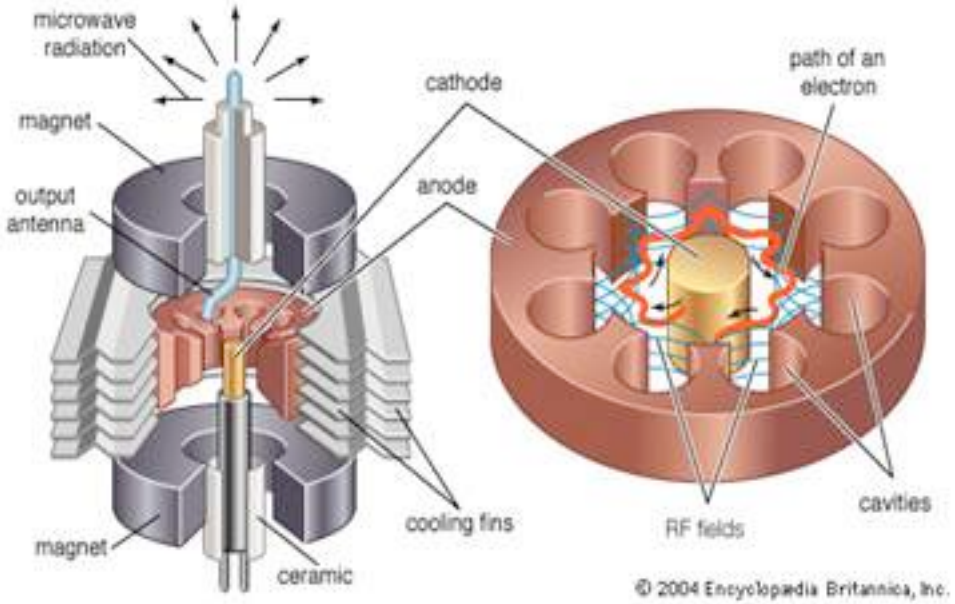
Le magnétron



Champ magnétique permanent fourni par 2 aimants.
La fréquence des ondes émises dépend de la taille des cavités résonantes.

Le magnétron

Au sein d'un **tube à vide** les électrons émis par une cathode se dirigent vers une anode sous l'effet du champ électrique (plusieurs kVolts) . Ils sont déviés par un champ magnétique en une trajectoire en spirale. L'interaction entre le faisceau d'électrons et l'anode produit l'onde électromagnétique.



Le magnétron & puissance

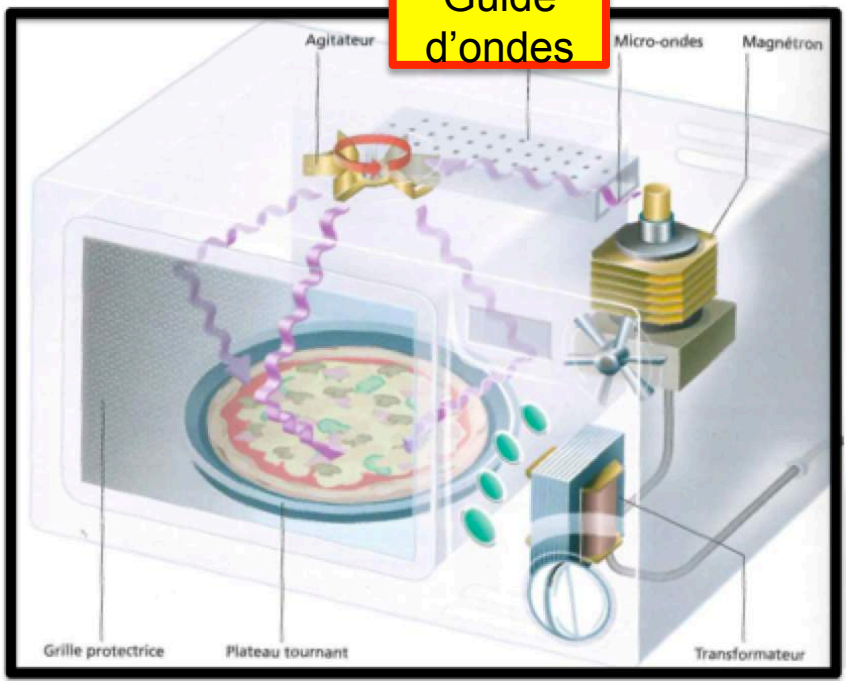
Les fours à micro-ondes proposent plusieurs puissances pour le chauffage des aliments.

Néanmoins le magnétron n'est pas réglable.

Lorsqu'il tourne à pleine puissance, il est alimenté en continu.

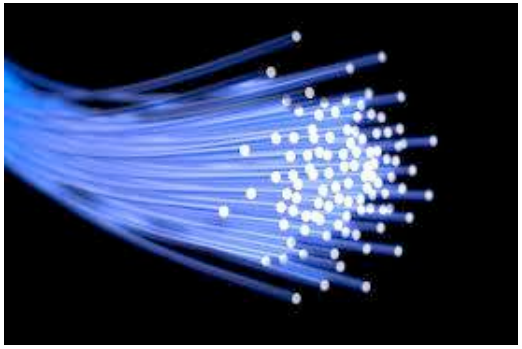
Lorsque la puissance choisie est réduite, il fonctionne de manière alternative
→ **Principe du "tout ou rien"**

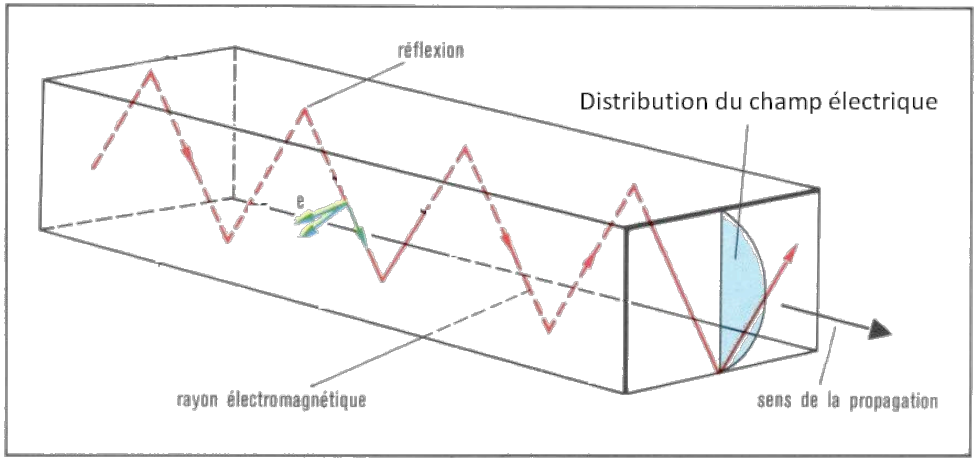
Le guide d'onde



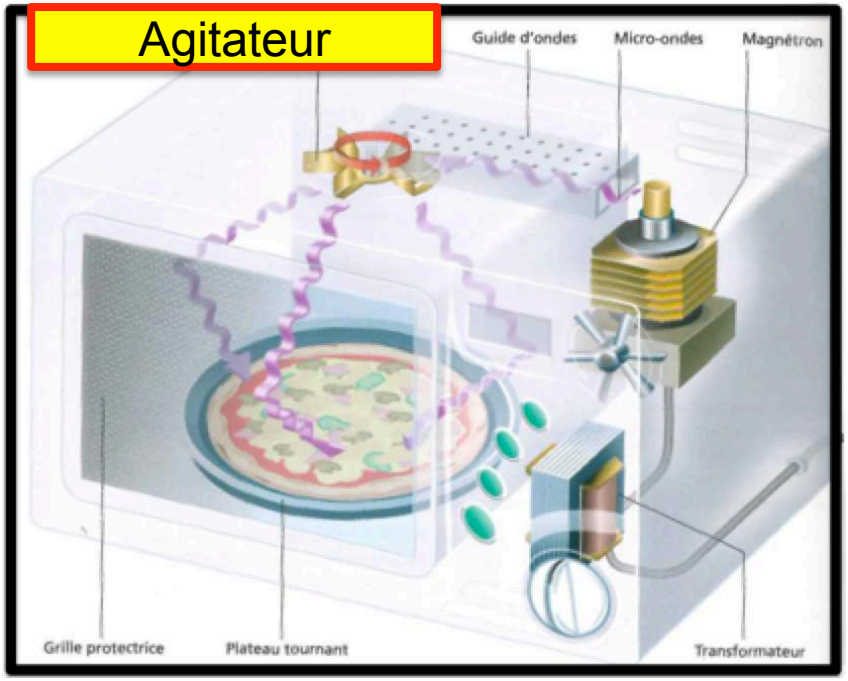
Pour "guider" les ondes, on les confine au sein d'un milieu pour qu'elles se propagent du magnétron jusqu'à l'agitateur.

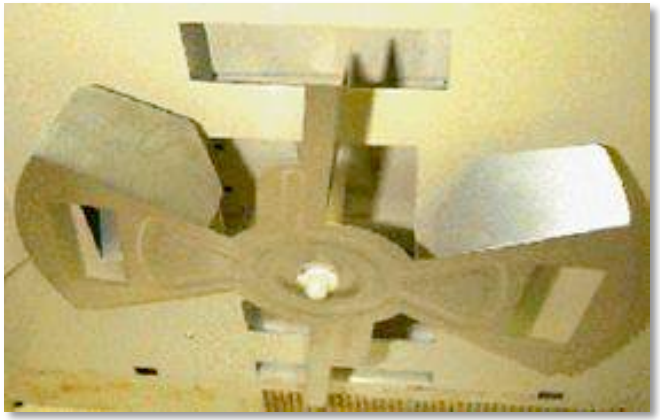
Les ondes vont être réfléchies à chaque fois qu'elle arrivent sur la surface interne du guide.





L’agitateur





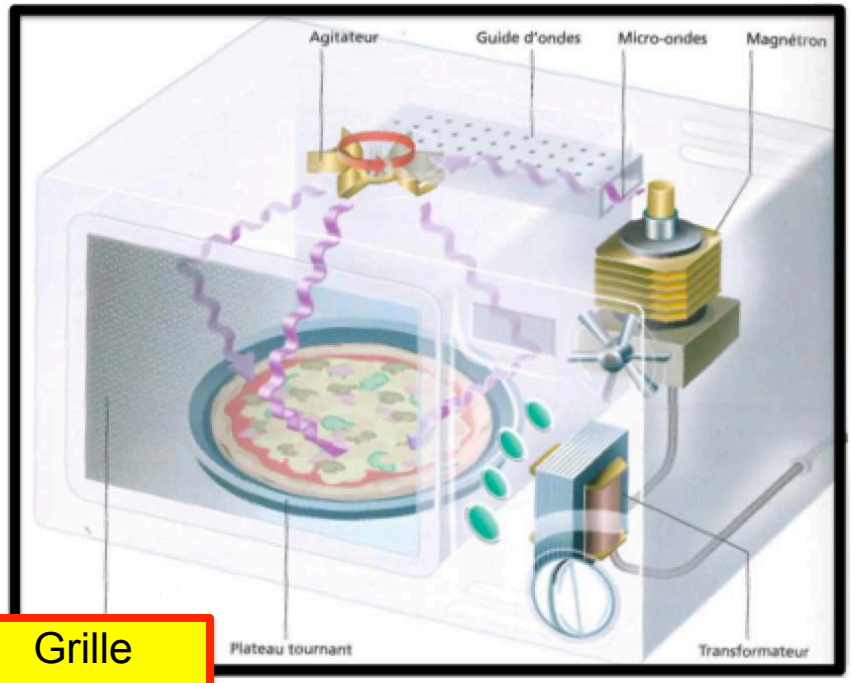
Agitateur ou brasseur d’ondes

C’est un réflecteur d'ondes qui tourne grâce à une courroie et un moteur.

L’objectif est de distribuer de manière homogène les ondes.

Plusieurs technologies sont proposées selon les fabricants.

Cavité et grille protectrice

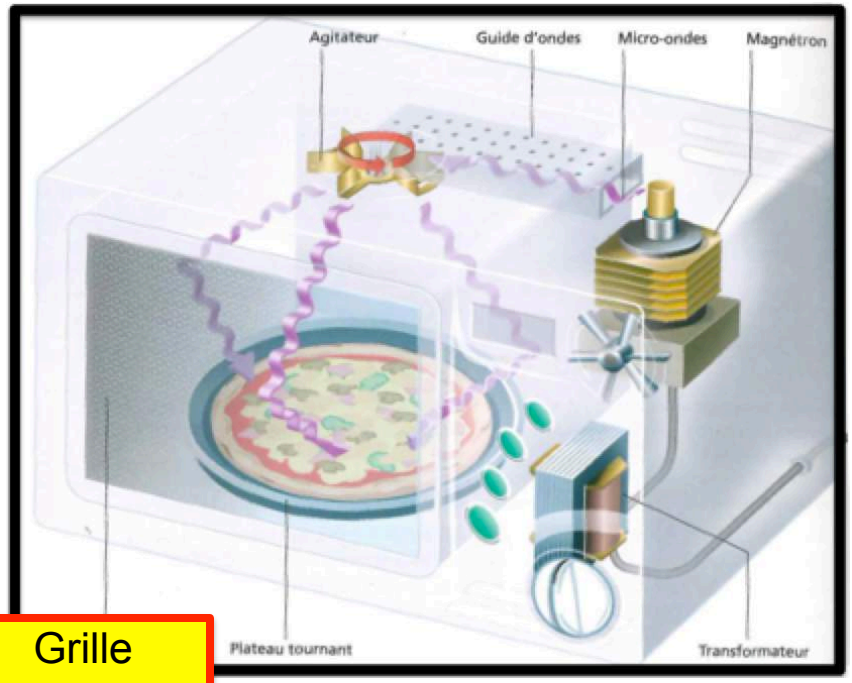


Grille protectrice

- Les parois de la cavité réfléchissent les ondes.
- Une onde stationnaire s'installe.
- Etablissement de « ventres » et de » nœuds » en 3D: points chauds et froids

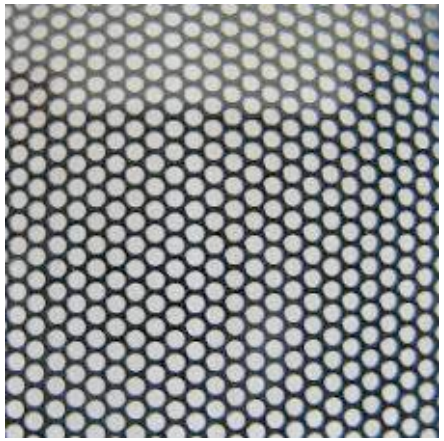
https://www.youtube.com/watch?v=a4o-MJ1X5aw

Cavité et grille protectrice

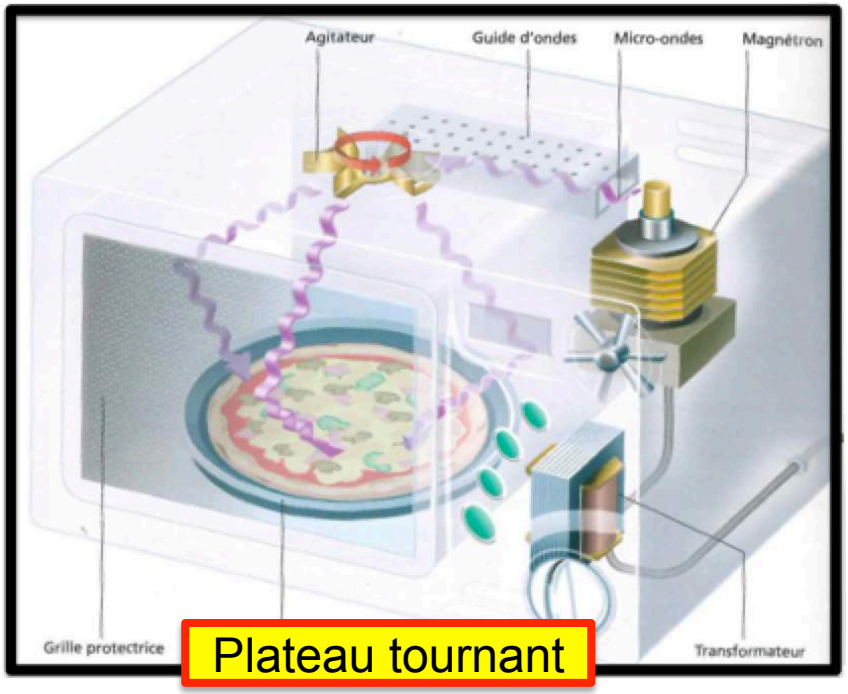


Grille protectrice

- La porte doit également réfléchir les ondes.
- Cependant elle n'est pas opaque à la lumière.
- Elle possède une structure métallique grillagée.
- Les dimensions de ces « trous » doivent être bien inférieures à la longueur d'onde (12 cm)



Le plateau tournant



L'objectif est d'homogénéiser le chauffage des aliments.

→ cf expérience avec la tablette de chocolat

→ Une onde stationnaire s'installe au sein de la cavité

Menu du jour

- Qu'est-ce qu'une onde ?
- Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ?
- Expérience avec un four à micro-ondes
- Le principe du four à micro-ondes
- **Questions sur son fonctionnement**

Précautions d'emploi

- Ne pas mettre de produits inflammables

- Les récipients peuvent être chauds (conduction)

→ Risque de brûlure

- Ne pas toucher les parois intérieures du four

→ Risque de brûlure

- Ne couvrez pas les orifices de ventilation avec des torchons/papiers

→ Risque d'inflammation

- Ne pas faire fonctionner le four à micro-onde à vide

→ Peut endommager les parois (extrait de notice)

- Ne pas chauffer des récipients hermétiquement fermés

→ Augmentation de la pression → explosion

→ S'applique aussi aux tomates/oeufs/noix …

Attention: surchauffe de l'eau

1. On fait chauffer une première fois de l'eau au four à micro-ondes pour la porter jusqu'à ébullition.
2. Après quelques instants, on chauffe de nouveau cette eau
3. On verse par la suite du sucre (ou du sel) dans cette eau (prendre des précautions)

Qu'observe-t-on ?

- L'eau (purifiée) a été portée à une température supérieure à 100^0C.
- L'introduction de corps étranger va provoquer brusquement ce changement d'état.
- La vapeur d'eau produite a une température de 100^0C.

Question:

Pourquoi ne faut-il pas placer d'objets métalliques à l'intérieur d'un four à micro-ondes?

Mentimeter

Du métal dans le four

https://www.youtube.com/watch?v=Ir5-MUBrkVQ

Du métal dans le four

Les surface métalliques réfléchissent les micro-ondes

→ Empêche les aliments d'être chauffé.

→ Réflexions sur les parois du four qui pourraient endommager des composants.

L'effet de pointe

→ La présence d'un champ électrique dans un conducteur induit un déplacement de charges électriques.

→ En cas d'aspérités (feuille d'aluminium froissée, dents d'une fourchette, …) l'accumulation de charges électriques localisées peut engendrer des arcs électriques à l'intérieur de l'appareil.

Pomme / aluminium

https://www.canal-u.tv/video/universite_de_bordeaux/le_four_a_micro_ondes_le_chauffage_dans_un_four_a_micro_ondes_et_un_peu_de_cuisine_amusante.38715

Ce qu'il fallait retenir

- **Onde**: *propagation d'une perturbation de l'état physique d'un milieu*

- **Ondes électromagnétiques**:
  - *propagation simultanée de champs électriques et magnétiques*
  - Variétés des phénomènes en fonction de la fréquence (communications, lumière, radiographie X, …)
- **Les micro-ondes:** [f = 1 à 300 GHz] [30 cm – 1mm]
  - Applications: Téléphonie, Wifi, Bluethooth, Radar, GPS, etc …
- **Le principe du four à micro-ondes**
  - Le magnétron, alimenté en courant de haute tension, produit des ondes à 2.45 GHz qui sont envoyées dans une cavité où s'installe une onde stationnaire (parois réfléchissantes)
- **Le chauffage des aliments dans un four à micro-ondes**
  - Les molécules d'eau (dipolaires) présentes dans les aliments "vibrent" sous l'action de cette onde → élévation de température qui se communique aux autres molécules
  - Le chauffage se fait en "volume" contrairement à un transfert par conduction

Parlez-en à vos amis …

Site web: http://physiquepourtous.unistra.fr/
Mail: physiquepourtous@unistra.fr
Facebook: https://www.facebook.com/physiquepourtous67

Merci à François Stuber, Marc-Olivier Hunzinger, Eric Baussan, Eric Conte, Thierry Pradier et tous les autres collègues de Physique pour Tous !

Bibliographie

- ✓ En avant la physique ! *42 phénomènes du quotidien déchiffré*

J.M. Courty – E.Kierlik | Edition Belin

- ✓ La physique par les objets quotidiens

C. Ray – J.C. Poizat | Edition Belin

- ✓ Vous avez dit physique ? De la cuisine au salon, de la physique partout dans la maison

K. Fadel – Edition Dunod

- ✓ Toute la physique dans un verre d'eau

C. Santamaria – Edition Ellipes

- ✓ Unisciel: physique à main levée
- ✓ Unisciel: Kezako
- ✓ France TV: C'est pas sorcier
- ✓ France TV: On est pas que des cobayes

Youtube.fr/ScienceClic