

Les Micro-ondes (ou hyperfréquences)

par Régis DAVID

Université Pierre et Marie Curie

Le mot micro-ondes (M.O.) est bien connu de tous par suite du développement croissant et du succès grandissant des fours M.O.

Cet article se propose de démystifier le terme M.O. (ce sont des ondes plus «grandes» que celles de la lumière visible) et de donner sous forme de vulgarisation un éventail de leurs immenses possibilités pour l'avenir.

Les micro-ondes ou «hyperfréquences» sont des radiations électromagnétiques *non ionisantes* ; dont les longueurs d'onde se situent entre celles des radiations infrarouges et celles des ondes radio.

Le tableau ci-dessous montre la place des M.O. dans le spectre des radiations électromagnétiques.

| Nom | Rayons cosmiques | Rayons X | U V | Visible | I R | Micro-ondes | Ondes radio TV TSF |
|-----------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------------------|
| λ | $\approx 10^{-13}\text{m}$ | $\approx 10^{-8}\text{m}$ | $\approx 10^{-7}\text{m}$ | $\approx 10^{-6}\text{m}$ | $\approx 10^{-5}\text{m}$ | $\approx 10\text{ cm}$ | $\approx 3\text{ m}$ 10 m à 3 km |

Le domaine des M.O. est caractérisé en pratique par sa bande de fréquences, un peu comme la lumière visible est caractérisée par sa couleur.

| Nom de la bande | P | L | S | C | X | K | Q | C | W |
|-----------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Fréquence (GHz) | $\approx 0,3$ | $\approx 0,4$ | ≈ 3 | ≈ 5 | ≈ 8 | ≈ 20 | ≈ 40 | ≈ 50 | ≈ 100 |

La longueur d'onde λ est liée à la fréquence ν et à la vitesse de la lumière dans le vide c par la relation :

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad \text{Numériquement : } \nu \text{ (cm)} = \frac{30}{\nu \text{ (GHz)}}$$

Les M.O. possèdent certaines propriétés connues pour la lumière : propagation en ligne droite, réflexion, réfraction, diffusion ; mais à l'inverse de la lumière, elles pénètrent profondément dans beaucoup de matériaux non métalliques et peuvent interagir avec les molécules polaires en leur communiquant une partie de l'énergie qu'elles transportent : c'est cette propriété qui est utilisée pour le chauffage (four M.O.).

La fréquence de relaxation diélectrique de l'eau liquide (eau libre) est située dans le domaine des M.O., ce qui explique l'intérêt des M.O. pour le traitement des matériaux humides.

Un matériau diélectrique est caractérisé par sa permittivité complexe

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' + \frac{\sigma}{\epsilon_0\omega} \quad \text{s'il y a de la conductibilité)}$$

ϵ' caractérise la permittivité et ϵ'' les pertes diélectriques ; on peut également définir l'angle de perte δ par

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

Lors de la traversée d'un matériau diélectrique par une onde électromagnétique, il y a absorption plus ou moins importante de celle-ci selon la région spectrale considérée.

On peut définir l'atténuation par la diminution de l'amplitude du champ électrique E_0 , après une profondeur de pénétration x , par la relation

$$E_x = E_0 e^{-\alpha x} \text{ où } \alpha \text{ est la constante d'atténuation.}$$

Lors de l'absorption, il y a transformation de l'énergie électromagnétique en chaleur par différents mécanismes (rotation dipolaire en particulier). La puissance dégradée sous forme de chaleur est proportionnelle à

$$E^2 \omega \epsilon' \tan \delta$$

La profondeur de pénétration des M.O. dans la matière est très variable suivant les matériaux.

Exemple : pour $\nu = 36 \text{ Hz}$, la profondeur de pénétration dans l'eau est 1,4 cm

à 25°C alors que dans la glace, à 0°C, elle est de 1,20 m ; cette grande différence est due au fait que les pertes diélectriques dans la glace sont beaucoup plus faibles que dans l'eau.

Le domaine d'utilisation — permis légalement — des M.O. est situé dans trois bandes «réservées» (pour ne pas perturber les télécommunications).

$$2\ 400 \pm 50 \text{ MHz } (\lambda \approx 12 \text{ cm})$$

$$5\ 800 \pm 75 \text{ MHz } (\lambda \approx 5 \text{ cm})$$

$$22\ 125 \pm 125 \text{ MHz } (\lambda \approx 1,35 \text{ cm})$$

LES PARTICULARITÉS DU CHAUFFAGE PAR M.O.

En régime harmonique, la puissance réelle transmise à l'intérieur d'un échantillon de volume V est égale à la somme de la puissance dissipée par pertes diélectriques (rotation des dipôles d'eau) et de la puissance dissipée par conduction (effet Joule), soit :

$$P = \frac{\nu}{2} \int_V (\mu'' \vec{H} \cdot \vec{H}^* + \epsilon'' \vec{E} \cdot \vec{E}^*) dV + \frac{1}{2} \int_V \sigma \vec{E} \cdot \vec{E}^* dV$$

Si le matériau n'est pas magnétique (cas le plus fréquent), on peut écrire

$$P = \frac{1}{2} \int_V (\sigma + \nu \epsilon'') E^2 dV$$

où E est la valeur de crête du champ électrique de l'onde.

La conductibilité σ est souvent de nature ionique ; elle est faible dans le domaine des M.O. — sauf à température élevée ou dans le cas des solutions aqueuses ioniques.

Les inhomogénéités s'échauffent, en général plus rapidement, par suite d'un effet Maxwell-Wagner (faible à fréquence élevée) et cette propriété a un certain nombre d'applications.

Notons enfin que, contrairement aux procédés classiques, l'échauffement par M.O. se fait de l'intérieur vers l'extérieur (et dans la masse) *c'est là une des originalités les plus remarquables des M.O.*

Citons quelques exemples :

- On peut noter une différence entre l'action de la chaleur et des M.O. sur un thermomètre à alcool : avec la chaleur le liquide commence à descendre (dilatation de l'enveloppe) puis monte (dilatation du liquide).

Avec les M.O., le liquide monte vite (dilatation du liquide) puis moins vite (dilatation de l'enveloppe).

- On peut réussir à faire bouillir l'eau dans un mélange eau-glace — en l'irradiant rapidement — (avec une forte puissance M.O.) par suite de la différence des pertes entre l'eau et la glace.
- Les M.O. permettent de réaliser un gain d'énergie car on chauffe seulement l'échantillon. Dans un four M.O. on ne chauffe, par exemple, que le morceau de viande alors que dans un four classique, on chauffe tout le four.
- Les particularités des M.O. entraînent un certain nombre de précautions. En chauffage classique des bulles d'air se forment sur les parois et montent à la surface du liquide avant l'ébullition ; en chauffage M.O. il ne s'en forme pas et d'un seul coup le liquide s'échappe du récipient (déboire pour ceux qui veulent faire réchauffer, sans précaution, un biberon de lait dans un four M.O. !).
- Il est possible de laver l'intérieur de matériaux poreux qui ont été souillés en profondeur. Il suffit de plonger une pierre poreuse dans l'eau et de la soumettre aux M.O. (dans des conditions bien précises) ; l'eau ressort entraînant, après solubilisation, toutes les souillures internes ; il est possible de recommencer plusieurs fois l'opération.

APPLICATIONS

Les aspects métrologiques, très importants, ainsi que les aspects médicaux, non moins importants, ne sont pas abordés dans cet article. Les autres applications sont très diverses ; nous allons en présenter un certain nombre en prenant comme classification la température atteinte par l'échantillon.

A — Températures moyennes :

Il est possible :

- de faire cuire de la viande dans une assiette en carton car l'assiette ne s'échauffe pas à cause des faibles pertes diélectriques du carton ; cette façon de faire n'est pas utilisée par suite de la mauvaise présentation de l'aliment après cuisson (aspect de viande bouillie), par contre, le procédé est excellent pour le réchauffage des viandes déjà rôties et conservées au réfrigérateur : cette technique est utilisée dans les restaurants à service rapide.
- de décongeler partiellement et de façon homogène les surgelés. On peut élever la température d'une viande de -30°C à -2°C très rapidement pour la désosser ; une précaution doit toutefois être prise : il faut soumettre la viande

aux M.O. *immédiatement* après sa sortie du congélateur sinon la pellicule d'eau qui se forme en surface absorbe les M.O. et la décongélation cesse.

L'utilisation des M.O. permet d'effectuer l'opération très rapidement ce qui évite :

a) l'altération superficielle de la viande (noircissement) et éventuellement la contamination microbienne pendant la décongélation.

b) la modification de la consistance des fibres par suite d'une exsudation de liquide qui donne une présentation médiocre.

Dans le cas d'une viande inhomogène (gras + maigre), il faut combiner le chauffage par I.R. et par M.O., car les micro-ondes seules échaufferaient le maigre beaucoup plus vite que le gras et ce serait encore pire pour les viandes entrelardées et salées.

• de sécher à cœur des matériaux qui ne renferment qu'une très faible quantité d'eau : on peut ainsi achever de sécher le bois ou bien les pièces de poterie avant de mettre ces dernières au four.

• d'effectuer un séchage par M.O. très intéressant dans le cas où une matrice à faibles pertes contient des inclusions à fortes pertes qui peuvent ainsi être détruites sans endommager la matrice. On peut citer comme applications :

a) la destruction des vers à bois (*Anobium*) qui sont tués dès que la température de leur corps dépasse 65° (les œufs sont également détruits pour la même raison). On peut traiter de cette façon des pièces de bois de 20 cm d'épaisseur.

b) la destruction des charançons dans la farine

c) la destruction des champignons responsables de la pourriture sèche du bois (*Merulius lacrymaris*) ; il suffit de traiter le bois pendant une dizaine de minutes à 40°C pour qu'il soit «assaini».

• de stériliser des liquides (lait, jus de fruit) dans des emballages en carton paraffiné.

N.B. : le chauffage par M.O., à température moyenne permet encore la polymérisation homogène de certaines matières plastiques, la vulcanisation du caoutchouc et la soudure de produits qui sont des isolants thermiques (fibre de verre, résines).

Certaines applications sont possibles dans l'avenir si on arrive à maîtriser de façon simple les configurations de champ, par exemple :

a) la polymérisation, in situ, de matières plastiques sur de la tôle, réalise l'équivalent d'un «émaillage» ; sur des bouteilles réalise une économie de verre, etc...

b) le séchage à la chaîne de nombreux objets (bouteilles)

c) le séchage rapide d'encres à l'eau — donc moins toxiques que les encres classiques — dans le domaine de l'imprimerie.

d) la régénération des zéolithes après usage comme absorbeur d'humidité.

B — Températures élevées :

- Les essais les plus spectaculaires portent actuellement sur le frittage de l'alumine. La poudre d'alumine comprimée et préalablement chauffée à 5 ou 600°C peut être frittée par traitement M.O. qui élève rapidement la température jusque vers 1700° (il y a augmentation des pertes par élévation de température). Le frittage s'accompagne d'une légère diminution de volume. L'alumine frittée a de nombreuses applications, par exemple, la confection des plaquettes de freins pour avions.

- des méthodes quelque peu plus élaborées permettent de tirer de longues fibres de silice (qui peuvent ensuite être gainées) utilisables pour les communications par voie optique sur de petites distances (dans quelques années ces dispositifs remplaceront peut être les téléphones intérieurs des grands établissements).

- d'autres applications sont peut être envisageables, par exemple la fabrication de céramiques vitrifiées dans la masse, obtenues par cuisson du mélange de barbotine et d'argile, alors que les céramiques actuelles sont seulement vitrifiées en surface. Un tel procédé pourrait ouvrir une ère nouvelle à l'industrie des céramiques.

Les applications possibles sont loin d'être exhaustives, nous avons voulu seulement en signaler quelques-unes pour montrer l'intérêt d'un domaine de la physique et de la technique en pleine expansion.

RÉFÉRENCES

Montgomery

Techniques de Mesures en micro-ondes. Ed. Chiron, Paris (1951)

Lefevre

Hyperfréquences. Ed. Dunod, Paris.

Berteaud

Les hyperfréquences. Coll «Que sais-je ?» n° 1643. Ed. PUF, Paris

Raoult

Les ondes centimétriques. Ed. Masson, Paris

Metaxa et Meredith

Industrial microwave heating. Ed. Peter Peregrinus Ltd (1983), Exeter. UK.

F. Henry and A.J. Berteaud

J. of Microwave Power, 15, 4 (1980)

R. David et F. Henry

Bull. Soc. Chim. de France n° 7-8 (1984)

R. David et F. Henry

J. de Chimie Physique et Biologique (1986)