

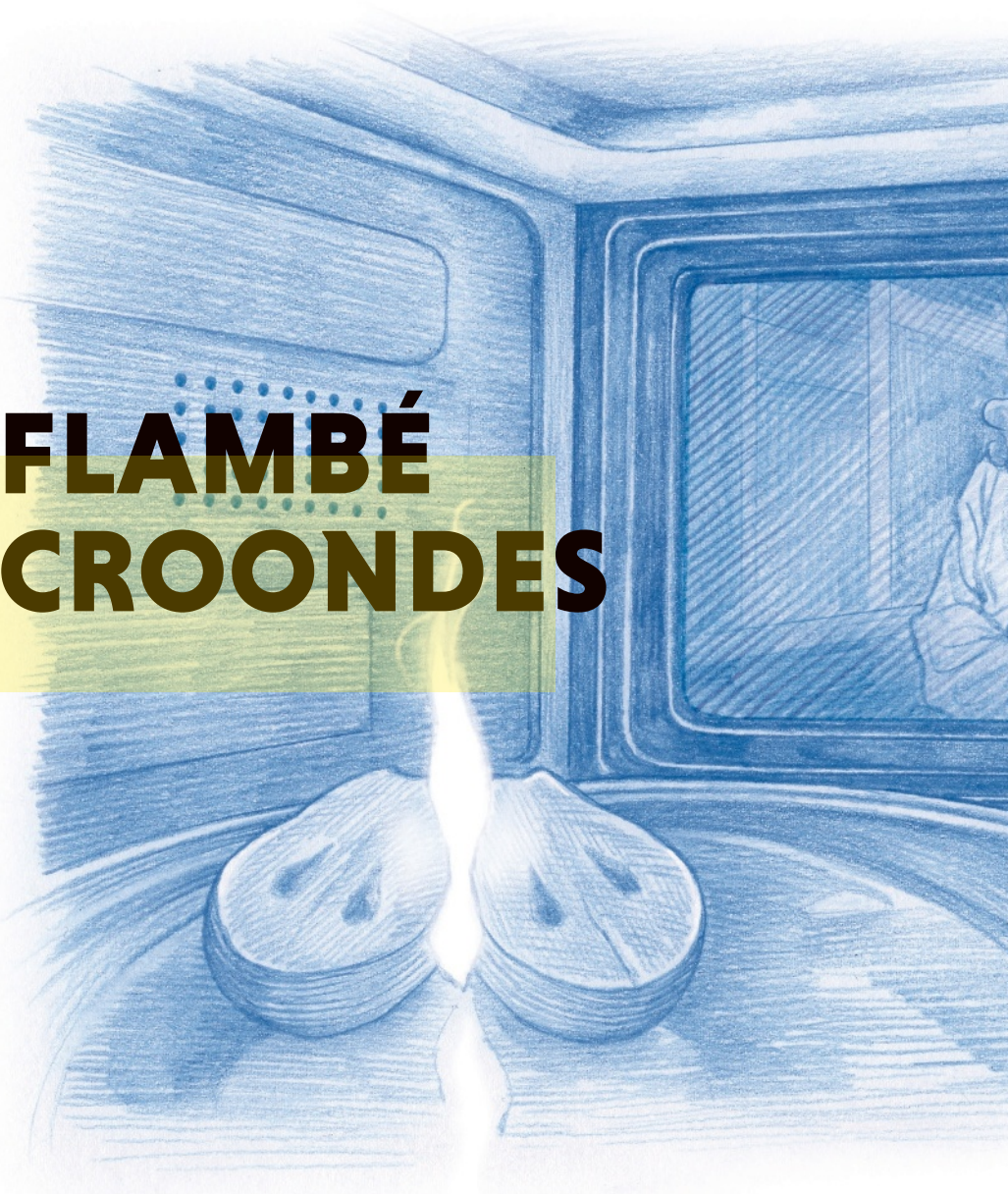
LES AUTEURS



**JEAN-MICHEL COURTY
ET ÉDOUARD KIERLIK**
professeurs de physique
à Sorbonne Université, à Paris

RAISIN FLAMBÉ AUX MICROONDES

Dans un four à microondes,
de fortes concentrations
d'énergie peuvent apparaître
dans la région qui sépare
deux aliments très proches.



Une expérience rendue populaire par YouTube consiste à placer dans un four à microondes un grain de raisin coupé en deux, mais dont les deux hémisphères sont encore reliés par un petit morceau de peau, épargné lors de la découpe. Lorsqu'on allume le four, des flammes apparaissent entre les deux moitiés (voir l'illustration). À quoi cela est-il dû ?

La plupart des explications prétendent que les deux hémisphères de raisin agissent comme une antenne et que le courant électrique intense circulant alors dans la peau serait à l'origine du plasma, le milieu gazeux chaud et ionisé formé entre les deux parties du fruit. Des expériences récentes, réalisées par trois physiciens au Canada (voir la bibliographie), montrent qu'il n'en est rien : le plasma est dû à la présence, au point de contact entre les deux

moitiés du grain, d'un champ électromagnétique intense qui vaporise la matière et ionise les atomes de sodium et de potassium présents dans la chair du raisin.

UN ÉCHAUFFEMENT INHOMOGÈNE

Pour mieux comprendre le phénomène, commençons par l'expérience suivante. On place une belle pomme de terre crue dans un four à microondes, actionné pendant une vingtaine de secondes. On coupe ensuite cette pomme de terre en deux et on observe la température intérieure à l'aide d'une caméra thermique. Que constate-t-on ? L'échauffement est très hétérogène, les deux endroits les plus chauds étant au cœur de la pomme de terre et distants d'environ 2 centimètres. Comme l'échauffement de la chair résulte

de l'absorption des microondes, il est proportionnel à l'intensité du champ électromagnétique à l'endroit considéré : cela signifie que le champ microonde présente les mêmes inhomogénéités d'intensité que la température.

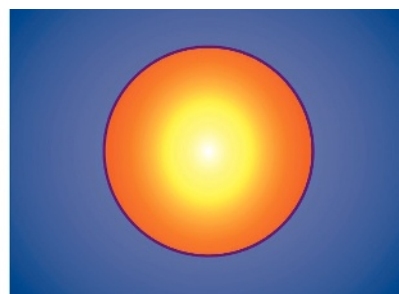
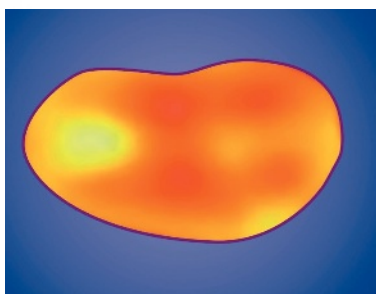
Pourquoi le champ est-il si hétérogène au sein de la patate ? Serait-ce la conséquence de l'onde stationnaire formée par le champ électromagnétique dans le four et qui a pour effet de chauffer différemment les aliments selon l'endroit où ils se trouvent ? La réponse est non, pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, la pomme de terre est posée sur un plateau tournant et se déplace ainsi à travers les nœuds (minima) et les ventres (maxima) de l'onde stationnaire du champ microonde. Elle subit donc un chauffage uniforme en moyenne.



THERMOGRAPHIE D'UNE POMME DE TERRE

Chauffons dans un four à microondes une pomme de terre, puis coupons-la immédiatement en deux et observons la face de coupe avec une caméra thermique. On constate que l'échauffement est bien plus important en certaines régions (en tons clairs) : au centre pour une pomme de terre sphérique, vers les foyers pour une pomme de terre en forme d'ellipsoïde de révolution. En fait, les microondes qui ont pénétré dans le tubercule s'en échappent assez difficilement, en raison des réflexions internes sur l'interface chair-air. De la conjonction de toutes ces ondes internes résultent des « résonances » qui concentrent l'énergie en certains endroits.



Quand on chauffe au four à microondes un grain de raisin coupé en deux et dont les moitiés sont encore reliées ou très proches, beaucoup d'énergie se concentre dans la zone de séparation et crée ainsi un plasma lumineux. Ce phénomène se produit aussi avec d'autres aliments, des pommes de terre par exemple.

Ensuite, la séparation entre deux ventres est de l'ordre de la demi-longueur d'onde du champ microonde, soit 6,5 centimètres (la fréquence des fours à microondes étant de 2,45 gigahertz) ; c'est bien plus que les 2 centimètres séparant les maxima de température constatés.

Enfin, les microondes sont absorbées progressivement en pénétrant dans les aliments : l'intensité diminue environ des deux tiers pour chaque centimètre traversé dans les fruits et légumes. Par conséquent, ne devrait-on pas observer un échauffement maximal non pas au cœur mais en surface, là où le champ n'est pas encore atténué par l'absorption ?

Il faut donc chercher une autre explication. Si l'on assimile la pomme de

terre à un ellipsoïde de révolution, le champ semble s'être concentré aux foyers de cet ellipsoïde. Cela suggère que les microondes ont été fortement réfractées à leur entrée dans la pomme de terre. Pour savoir si tel est bien le cas, il faut s'intéresser à l'« indice optique » de la chair de la pomme de terre, c'est-à-dire au rapport entre la célérité de la lumière dans le vide et sa célérité dans le tubercule.

RÉFLEXIONS INTERNES

La pomme de terre est composée surtout d'eau : or, à 2,45 gigahertz, l'indice de l'eau est considérable et égal à 8,9 (à comparer avec 1,5, qui est l'indice du verre pour la lumière visible). En conséquence, la réfraction des microondes est effectivement forte lors de la traversée de l'interface air-pomme de terre et, une fois

rentrées dans le tubercule, il leur est difficile d'en sortir. Ainsi, à l'intérieur de la patate, toute onde qui atteint l'interface avec une incidence supérieure à $6,5^\circ$ (par rapport à la perpendiculaire à l'interface) subira une réflexion totale. Même sous des incidences plus faibles, une partie significative de l'onde est réfléchie (en incidence perpendiculaire à l'interface, près de 63% de l'énergie est réfléchie).

Cela signifie donc que l'onde qui a pénétré dans la pomme de terre et qui s'y propage pourra être réfléchie plusieurs fois à l'interface avec l'air. Bien entendu, elle

Les auteurs ont notamment publié :
En avant la physique !,
une sélection de leurs
chroniques (Belin, 2017).



sera atténuée à cause de l'absorption et des parties transmises dans l'air aux faibles incidences, mais elle n'en demeure pas moins partiellement piégée: la patate constitue donc pour le champ électromagnétique une espèce de cavité où ce dernier peut former une onde stationnaire. Même si cette cavité a un taux d'atténuation élevé, elle peut exhiber des résonances, c'est-à-dire des modes ondulatoires présentant des maxima et minima marqués, qu'une caméra thermique peut visualiser en raison de l'échauffement associé.

UN CHAMP BIEN CONCENTRÉ

Pour s'assurer de ces idées, on peut réaliser l'expérience de façon bien plus contrôlée avec une bille de polyacrylate de sodium (un matériau hyperabsorbant pour l'eau) gonflée d'eau, l'avantage étant que l'on peut choisir le diamètre de la bille et calculer complètement l'intensité du champ électromagnétique à l'intérieur et à l'extérieur.

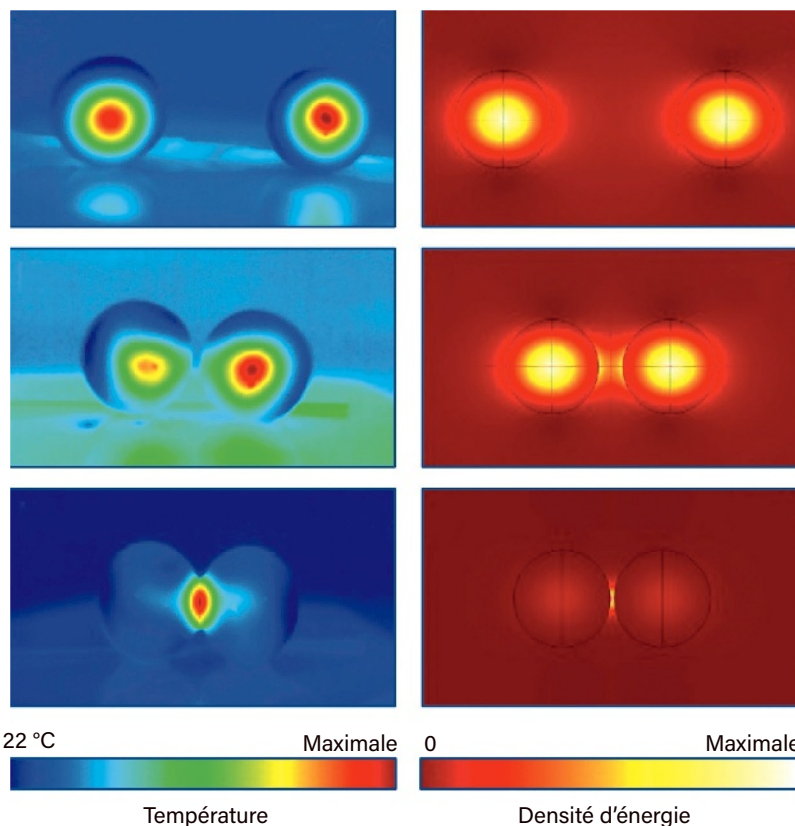
Après avoir chauffé la bille au four à microondes puis l'avoir coupée en deux, on observe un point chaud au centre. Cela confirme que le champ microonde ne se contente pas de traverser la bille, mais qu'il s'y concentre. La bille, quelle que soit sa taille, est le siège d'une «résonance de Mie», du nom du physicien allemand Gustav Mie qui, au début du ^{xx}e siècle, a étudié en détail les résonances au sein des sphères. Les calculs montrent que le maximum de cette résonance est situé au centre de la bille. En outre, ils rappellent l'existence d'une «onde évanescente» dans l'air, à l'extérieur de la bille: il s'agit d'un champ d'amplitude non négligeable qui déborde de l'objet, qu'on ne peut pas révéler par un échauffement, mais qui joue un rôle crucial dans la suite.

Considérons à présent deux billes identiques que l'on rapproche peu à peu. Lorsque leur écart est supérieur à leur diamètre, la structure du champ dans chacune des billes reste inchangée ou presque. Cependant, l'onde évanescente, à l'extérieur, s'intensifie sur l'axe qui joint les deux billes. À des distances plus courtes, la structure du champ finit par changer profondément: lorsque les deux billes deviennent très proches (0,5 millimètre de distance pour un diamètre de 16 millimètres), l'essentiel de l'énergie se voit concentré dans l'espace entre les billes et non plus en leurs centres, ce qui est très surprenant!

L'échelle typique de variation d'intensité dans les ondes stationnaires formées à partir d'ondes progressives est en général

CARTES DE TEMPÉRATURE ET D'ÉNERGIE

La répartition de la température au sein de deux grains de raisin soumis au chauffage par microondes (colonne de gauche) dépend de la distance entre les deux objets. Lorsque les deux grains sont bien écartés, chaque grain a un point chaud au centre. Lorsqu'ils se touchent presque, c'est la zone intermédiaire qui devient chaude. Ces cartes de température mesurée correspondent assez bien aux cartes de la densité d'énergie électromagnétique établies par des simulations numériques (colonne de droite).



de l'ordre de la longueur d'onde du rayonnement. C'est ce que nous observons à l'intérieur de la pomme de terre. En revanche, dans le royaume des ondes évanescentes, il n'y a pas de limite: l'énergie peut se concentrer sur des zones de taille bien plus petite que la longueur d'onde.

Avec les deux billes très proches, nous en avons un exemple remarquable. L'épaisseur de la zone dans laquelle est confiné le champ est cent fois plus faible que la longueur d'onde de ce dernier, et son diamètre est une vingtaine de fois plus petit. L'intensité du champ électromagnétique à cet endroit est alors si élevée que la matière présente s'échauffe jusqu'à se vaporiser. Dans le cas de l'expérience avec le grain de raisin, le spectre de la lumière émise suggère que ce sont les atomes de sodium et de potassium présents dans la chair du raisin qui sont ionisés et qui forment le fameux plasma. ■

BIBLIOGRAPHIE

H. K. Khattak, P. Bianucci et A. D. Slepko, **Linking plasma formation in grapes to microwave resonances of aqueous dimers**, *PNAS*, vol. 116(10), pp. 4000-4005, 2019.

J.-M. Courty, **Vidéo de Merci la Physique ! sur l'expérience avec les pommes de terre :** https://youtu.be/y_LKYulyXQc

J.-M. Courty, **Vidéo de Merci la Physique ! sur les modes ondulatoires dans le four à microondes :** <https://youtu.be/YfJeRYToXIM>