

Caractérisation et optimisation d'un processus de chauffage micro-ondes

Intrigués par une conférence de Jean-Michel Courty faisant chauffer des pommes de terre au micro-ondes, puis observant des points chauds à l'intérieur grâce à une caméra thermique, nous avons décidé d'étudier les phénomènes à l'origine de l'apparition de ces inhomogénéités de température et de proposer de potentielles applications.

La chauffe des aliments au four à micro-ondes fait apparaître des zones de transitions thermiques plus ou moins fortes, signe d'un champ micro-ondes hétérogène. La forme et l'environnement de l'aliment peuvent l'expliquer et la théorie de Mie répond plus généralement à ce phénomène.

Ce TIPE fait l'objet d'un travail de groupe.

Liste des membres du groupe :

- *BEAUMONT--THOMAS Lise*

Positionnement thématique (ÉTAPE 1) :

- *PHYSIQUE (Physique Ondulatoire)*

- *PHYSIQUE (Physique de la Matière)*

- *CHIMIE (Génie Chimique)*

Mots-clés (ÉTAPE 1) :

Mots-clés (en français)

Mots-clés (en anglais)

Champ électromagnétique

Electromagnetic field

Inhomogénéité de température

Temperature inhomogeneity

Guide d'onde

Wave guide

Onde évanescente

Evanescent field

Chimie micro-ondes

Microwave chemistry

Bibliographie commentée

Les méthodes de chauffage habituelles produisent souvent de grandes quantités de gaz de combustion, d'eaux usées et de déchets solides, avec une consommation d'énergie substantielle. C'est la raison pour laquelle le chauffage par micro-ondes, plus économique et respectueux de l'environnement, est une technologie utile pour la transition énergétique dans de nombreux domaines [1].

De plus, cette technologie permet des expériences de physique surprenantes comme celle de Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik, qui ont mis en évidence des **inhomogénéités ponctuelles de chauffe** lors du passage de pommes de terre au four à micro-ondes, alors que les moyens de chauffage traditionnels font apparaître une diffusion de la chaleur de la surface vers le cœur de la pomme de terre [2]. En effet, dans leur expérience, la pomme de terre préalablement coupée présente deux points chauds, qui sont observés grâce à une caméra thermique. Ces inhomogénéités de température se trouvent sur un maximum de la distribution de puissance électromagnétique emprisonnée dans la pomme de terre et qui satisfait aux équations de Maxwell. Cette solution entraîne une distribution hétérogène du **champ électromagnétique** au sein du milieu.

Ainsi, lors de la chauffe, la pomme de terre est sujette à une résonance de Mie, en raison de sa forme quasi sphérique et de sa taille caractéristique proche de celle de la longueur d'onde du micro-ondes, c'est-à-dire quelques centimètres. Mais aussi en raison de l'écart entre l'indice « optique » associé à la pomme de terre et celui de l'air pour les micro-ondes, la puissance électromagnétique se retrouve confinée dans la pomme de terre.

La plupart du temps, les scientifiques et les ingénieurs souhaitent faire disparaître les inhomogénéités, qui peuvent réduire l'efficacité des procédés techniques.

Par exemple, en chimie, les micro-ondes permettent de réaliser plus rapidement la synthèse des esters, un sujet qui était d'ailleurs évoqué dans l'épreuve du bac 2023, que nous avons passé. En effet, l'apport d'énergie par les micro-ondes permet, d'après la loi d'Arrhenius, d'améliorer la vitesse de réaction. Mais il est intéressant pour les chimistes d'obtenir une densité homogène de puissance micro-ondes.

Néanmoins, ce qui semble être un problème peut se révéler utile : cartographier le champ de température permettrait d'exploiter ses maxima. En effet, dans sa thèse sur la réalisation de synthèses dans le domaine de la **chimie micro-ondes**, Nassima Benamara a effectué ce travail dans des cubes de gel SiC avant de s'en servir pour une synthèse d'ester [3].

À une tout autre échelle, ce problème se retrouve dans la fabrication des nano-antennes électroniques, car leur **chauffe inhomogène** peut entraîner des contraintes mécaniques problématiques sur le matériau qui les constitue [4].

En réussissant à prédire la localisation des points chauds, grâce aux équations de Maxwell [5], il serait possible de se servir des inhomogénéités comme **guide d'onde**, pour concentrer l'énergie

du **champ électromagnétique** en des points stratégiques et ainsi réaliser des synthèses chimiques de manière optimale.

Concernant les résonances de Mie, l'article de Jean-Michel Courty évoquait l'expérience des raisins faisant apparaître du plasma dans un micro-ondes. Cette expérience a été étudiée et expliquée par des cartographies précises du champ électromagnétique durant son déroulement [6]. Ce phénomène est une conséquence de la présence d'**ondes évanescentes** entre les deux raisins [1]. Autrement dit, l'onde incidente émergeant du premier raisin voit son amplitude décroître exponentiellement depuis l'interface raisin/air, ce qui entraîne l'apparition d'une zone de plasma à son maximum d'amplitude entre les raisins.

Problématique retenue

Comment caractériser et exploiter les inhomogénéités du champ micro-ondes se propageant dans certains milieux ?

Objectifs du TIPE du candidat

- Utiliser les calculs faits à partir des équations de Maxwell pour prédire la position des points chauds.
- Utiliser les homogénéités de chauffage dans une synthèse chimique micro-ondes.

Références bibliographiques (ÉTAPE 1)

- [1] LEI SHEN, JUN ZHOU, XINGYI ZHANG : In situ investigation of the thermal characteristics of microwave resonance-induced focused hotspots in dimers for improving microwave heating uniformity : <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104052>
- [2] J.M.COURTY, E.KIERLIK : Raisin flambé aux microondes : *Pour la Science*, octobre 2021, n°528 p 88-90
- [3] NASSIMA BENAMARA : Intensification de procédés par chauffage micro-ondes pour la chimie verte : *Génie des procédés. Normandie Université*, 2017. Français. NNT: 2017NORMIR13. tel-02918024
- [4] ADRIEN LALISSE : Optimisation thermique de nanostructures plasmoniques: conception, modélisation et caractérisation. : *Physique. Université Pierre et Marie Curie- Paris VI*, 2017. Français. NNT: 2017PA066081. tel-01613506
- [5] H.W YANG, S. GUNASEKARAN : Comparison of temperature distribution in model food cylinders based on Maxwell's equations and Lambert's law during pulsed microwave heating : *Journal of food engineering* 64(2004) 445-453
- [6] H. K. KHATTAK, P. BIANUCCI, A. D. SLEPKOV : Linking plasma formation in grapes to microwave resonances of aqueous dimers : *PNAS*, vol. 116(10), pp. 4000-4005, 2019

DOT

[1] : Mai 2024 : Exposé de Jean Michel Courty à l'Université Pierre et Marie Curie et démonstration de l'expérience des pommes de terre.

[2] : Juin 2024 : Lecture de la documentation citée par Jean Michel Courty qui nous a permis de mieux comprendre le phénomène observé dans nos patates.

[3] : Septembre 2024 : Mise en place de notre protocole de cartographie du champ de température dans les pommes de terre avec une caméra thermique.

[4] : Octobre 2024 : Confection des guides d'ondes comprenant la modélisation 3D, l'impression et le protocole de remplissage avec de l'agar-agar pour obtenir un guide d'onde homogène de forme et de volume voulu.

[5] : Novembre et Décembre 2024 : Bibliographie sur les réactions chimiques nécessitant un apport important d'énergie que le micro-ondes peut fournir. Choix d'une réaction proposée dans le sujet B du Bac 2023, mise au point et réalisation d'un protocole de synthèse chimique.

[6] : Janvier 2025 : Invalidation de notre première hypothèse selon laquelle la puissance était focalisée aux foyers géométriques de la pomme de terre.

[7] : Février 2025 : Étude théorique et observation expérimentale des ondes évanescentes dans les pommes de terre grâce au même protocole que plus tôt.

[8] : Mai 2025 : Étude et résolution des équations vérifiées par le champ dans nos ellipsoïdes grâce à la solution proposée par le sujet de Physique B du concours Centrale 2025. Approche mathématique qui a permis une simulation Python du champ dans nos pommes de terre.