

## Écouter la fraîcheur de vos aliments

*Imaginez ceci. Vous êtes en train de compiler votre liste de courses à l'épicerie. Au lieu d'inspecter les dates de péremption des emballages alimentaires restés dans votre réfrigérateur ou de fouiller dans le tiroir à légumes pour renifler et inspecter la laitue, les carottes et les tomates, votre réfrigérateur IoT connecté "interroge" en temps réel l'état des denrées périssables stockées et envoie les résultats à votre téléphone (et en passant, il vous donne un pouce levé sur la quantité de ressources planétaires que vous avez évité de gaspiller à ce titre).*

On dirait une scène d'un film se déroulant en 2080 ? Laissons de côté la discussion sur ce que pourraient devenir nos habitudes alimentaires dans les années à venir. **Une inspection sans contact et à distance des produits alimentaires emballés** est précisément ce qu'une **collaboration franco-flamande** a développé au cours des quatre dernières années **dans le cadre du projet Terafood** (financé par le programme INTERREG du Fonds européen de développement régional). Un réfrigérateur intelligent ne sera peut-être pas commercialisé avant des années, mais la technologie innovante mise au point par les partenaires de Terafood pourrait avoir un impact considérable sur la lutte contre le gaspillage de nourriture et de ressources tout au long de la chaîne, du producteur à l'utilisateur, dans l'industrie agroalimentaire.

L'idée novatrice du projet Terafood repose sur une question simple et naïve : peut-on obtenir des informations sur la qualité d'un produit alimentaire sans avoir à le sortir de son emballage protecteur ? Ou, en d'autres termes, pouvons-nous effectuer une analyse chimique du contenu de l'emballage sans y avoir un accès physique direct ?

Une énigme scientifique à première vue. Posez cette question autour de vous et l'une des réponses pourrait être : si on ne peut pas le renifler, c'est que ce n'est pas possible. Une sorte de reniflage est précisément le type d'analyse chimique qui est le plus souvent utilisé dans l'industrie alimentaire. L'atmosphère de l'emballage est échantillonnée et sa composition est analysée par spectroscopie de masse. Une technique très précise (bien que coûteuse) mais impossible à employer sans détruire l'intégrité de l'emballage. Et sinon, la couleur ? Le fait de "regarder" l'aliment à travers son emballage peut certainement nous renseigner sur son état? Évidemment, si l'aliment a vraiment un aspect pourri, il n'y a guère de doute. Mais il existe un large éventail d'autres "couleurs" avec lesquelles on peut observer un objet. Tout le monde connaît les caméras infrarouges et la façon dont elles sont liées à la température d'une substance. Mais ce qui serait vraiment utile, c'est de détecter une couleur qui renseigne sur la composition de l'atmosphère de l'emballage. Ce type de rayonnement est au cœur de la technologie du projet Terafood. Les "ondes lumineuses" aux fréquences dites térahertz sont une sorte de manifestation extrême de la lumière infrarouge, et proche du rayonnement micro-ondes.

Le rayonnement térahertz est en ce sens unique qu'il partage des propriétés intéressantes de ces deux voisins : comme le rayonnement micro-ondes, il se propage presque sans perte à travers toutes les substances d'emballage (à l'exception des métaux), et comme le rayonnement infrarouge, il a une sensibilité très spécifique pour les molécules gazeuses - chaque type de molécule ayant sa propre couleur térahertz avec une intensité qui est une indication directe de sa concentration. En termes simples, **regarder un emballage alimentaire avec des lunettes-térahertz nous donnerait une vision de la composition chimique de son atmosphère**. C'est ce que les scientifiques appellent la "spectroscopie

térahertz". Dans le cadre du projet Terafood, une collaboration entre des universitaires et des partenaires industriels français et belges a démontré pour la toute première fois une technologie de détection spectroscopique térahertz efficace qui permet d'observer la qualité des aliments emballés à travers leur matériau d'emballage.

Au cours de la dégradation, des traces d'indicateurs gazeux sont générées dans l'espace de tête des aliments emballés. Bien que le profil précis de la concentration de ces espèces volatiles dépende de nombreux facteurs (type de denrées alimentaires, conditions d'emballage, ...), les **indicateurs les plus pertinents sont principalement les amines, les alcools et les sulfures, à des niveaux de l'ordre de 1 part par million**. Les chimistes de l'Université de Gand ont utilisé une spectroscopie de masse précise (mais intrusive) sur des échantillons extraits d'emballages alimentaires (en l'occurrence du saumon de l'Atlantique) pour parvenir à ces conclusions.

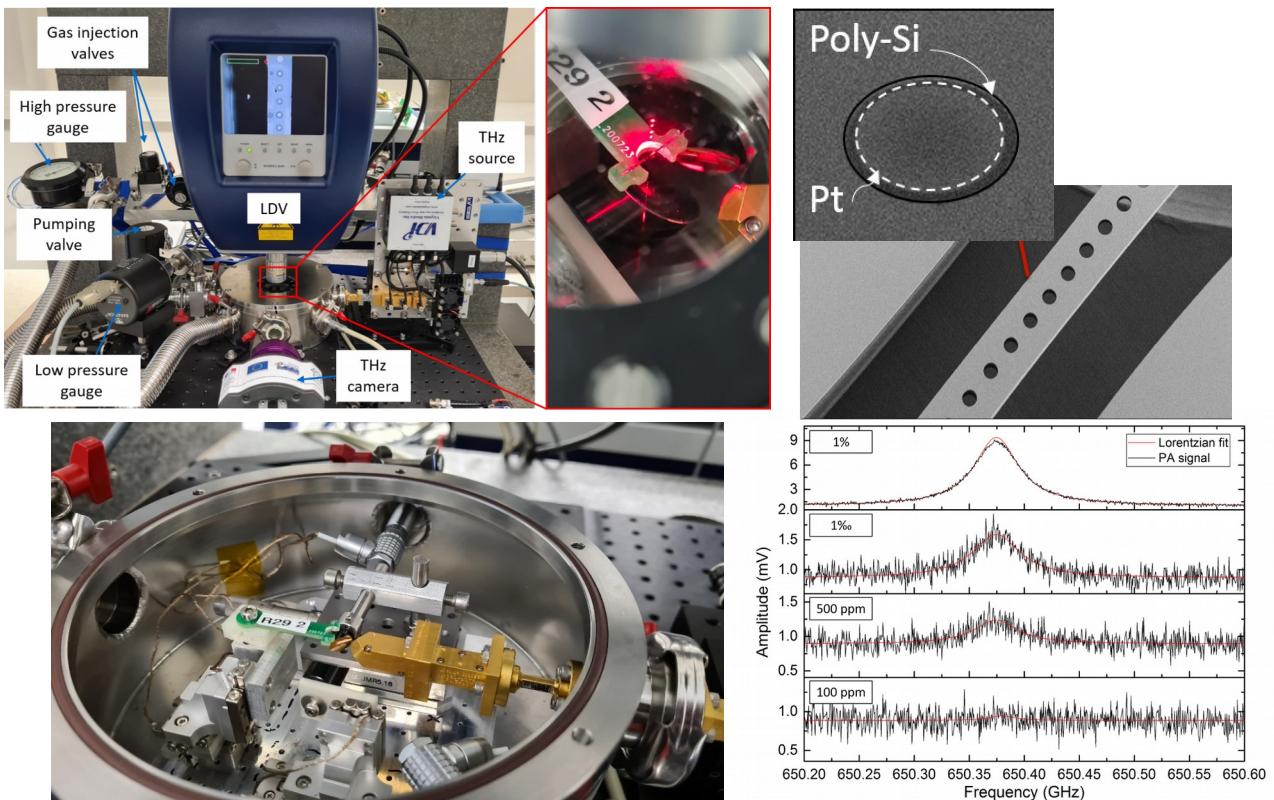
La première question à laquelle il fallait répondre dans le cadre du projet était donc de savoir si ces substances volatiles à des concentrations aussi faibles pouvaient être "vues" par la lumière térahertz avant même de commencer à réfléchir à la manière de "visualiser leur couleur térahertz" à travers un emballage. En **observant des sulfures, des physiciens de l'université de Dunkerque ont pu reproduire avec la lumière térahertz exactement les mêmes prédictions que la spectrométrie de masse**. Mais il y a un hic : le contraste de la couleur térahertz est si faible que la mesure n'est réussie qu'après avoir extrait un échantillon de l'emballage et l'avoir analysé avec une source de lumière térahertz très puissante et un détecteur térahertz très sensible. Loin donc d'être une inspection sans contact, à distance et en temps réel.

C'est là qu'intervient la **véritable innovation du projet Terafood**. Au lieu d'observer des contrastes lumineux difficiles à voir à travers un emballage, les chercheurs du groupe de recherche en photonique de l'Université de Gand et du groupe de photonique THz du laboratoire CNRS IEMN de Villeneuve d'Ascq se sont demandé si ce faible contraste ne pouvait pas être détecté par une technique plus sensible. Pourquoi, par exemple, ne pas plutôt "l'écouter" avec un microphone très sensible ? **Écouter la lumière...** L'idée peut sembler saugrenue, mais en fait, l'utilisation de la lumière pour générer un son était déjà une découverte du grand Graham Bell à la fin du XIXe siècle. Lorsque la lumière interagit par intermittence avec une substance qui l'absorbe, cette dernière commence à chauffer légèrement et à libérer cette chaleur. Cela produit une minuscule onde de pression qui peut être captée par un microphone sensible. **Cette technique est connue sous le nom de photo-acoustique**. Aujourd'hui, la détection photo-acoustique avec la lumière infrarouge est une technique largement utilisée. En revanche, la photoacoustique avec la lumière térahertz en est encore à ses débuts. L'originalité du projet terafood était non seulement de démontrer que cette technique est réalisable, mais surtout qu'elle peut être effectuée à l'intérieur d'un emballage alimentaire avec une sensibilité suffisante.

En **collaboration avec les ingénieurs de la start-up française Vmicro** (spécialisée dans la micro et nanofabrication de microsystèmes sur puce), une **micropuce en silicium a été conçue**. Ce **microsystème sert de microphone très sensible capable de capter le "son" des molécules indicateurs d'altération!** Il est constitué d'une membrane silicium sous tension d'une épaisseur de 750 nm (soit environ un centième de l'épaisseur de cheveu humain) et d'un diamètre d'environ un quart de millimètre. Cette membrane est conçue pour réagir fortement sous l'action d'une minuscule onde de pression qui la frappe à la bonne fréquence. La structure complète du microphone sur puce joue un triple rôle : 1) elle capte la lumière térahertz qui est projetée sur elle, 2) puis elle concentre fortement

cette lumière dans une petite zone proche de la membrane, 3) qui finalement capte le son généré par les molécules en interaction avec cette lumière. Il est important de noter que Vmicro est spécialisée dans la production à l'échelle de plaques entières de telles structures micromécaniques. Plusieurs copies du même capteur peuvent être fabriquées en une seule étape sur le même substrat. Cela permet de fabriquer plusieurs dizaines de capteurs en une seule fois, réduisant le coût final par capteur.

En avril 2021, dans les laboratoires du groupe Photonique THz, **un premier prototype de microphone térahertz a été testé dans une cellule à gaz** spécialement conçu à cet effet. Bien qu'il ne s'agisse pas exactement d'un emballage alimentaire, l'atmosphère de cette cellule peut être contrôlée pour reproduire les différentes conditions des emballages réels. Au cours de l'expérience, la cellule est préparée pour contenir une quantité calibrée de H<sub>2</sub>S sous une pression et une concentration choisies, puis scellée. La lumière térahertz est injectée en courtes impulsions à une cadence d'environ 35 000 impulsions par seconde (très proche de la fréquence de résonance de la membrane). Si la "bonne couleur" de lumière THz (c'est-à-dire la couleur térahertz unique du sulfure d'hydrogène) est injectée de cette manière, les molécules de H<sub>2</sub>S en proximité du microphone térahertz capteront (puis re-lâcheront) l'énergie de la lumière térahertz au même rythme. L'onde de pression générée ainsi frappe la membrane exactement au bon rythme pour l'exciter. La force de cette vibration est directement proportionnelle à la quantité d'énergie absorbée ou donc à la concentration des molécules. Le dernier élément de ce capteur sont les "oreilles" qui enregistrent le "son" capté par le microphone. Un vibromètre Doppler peut "lire" ce son en mesurant avec une lumière laser visible le déplacement de la membrane dans l'emballage.



*Une photographie des détails de la cellule d'essai de gaz dans laquelle les capteurs terafood sont testés. Le vibromètre laser à effet Doppler lit le "son" du microphone Poly-Si (en haut à droite) avec le spot laser rouge à travers la fenêtre de la cellule à gaz. Les spectres photoacoustiques en bas à droite sont les premières détections photoacoustiques mondiales en temps réel de H<sub>2</sub>S aussi bas que 100 ppm.*

La figure illustre certains des concepts ci-dessus et, surtout, montre les toutes premières expériences au niveau mondial de détection de concentrations de gaz de l'ordre du ppm à travers l'emballage. Ce résultat est frappant à plus d'un titre : **un premier prototype atteint des sensibilités déjà proches des exigences** de la chaîne alimentaire ; la mesure est totalement **autonome et en temps réel (un spectre est mesuré en 6 ms)** et surtout, il y a 4 ans, la photoacoustique intégrée THz était quasi-inexistante !

Si vous souhaitez en savoir plus sur les développements récents des technologies térahertz pour l'alimentation et l'agriculture ou si vous êtes intéressés par les développements futurs de la spectroscopie photoacoustique térahertz, **vous êtes cordialement invités à l'événement de clôture du projet terafood le 8 décembre 2021 au laboratoire CNRS IEMN sur le Campus technologique de l'Université de Lille** (Av. Henri Poincaré, Villeneuve d'Ascq). Des experts français, flamands et wallons donneront un aperçu des évolutions en cours et relèvent les défis de l'emballage alimentaire et du gaspillage alimentaire. Des solutions potentielles utilisant la technologie des capteurs Terahertz seront présentées. L'événement se terminera par une démonstration du capteur développé dans le cadre du projet INTERREG Terafood. En plus des résultats obtenus dans le projet, deux entreprises françaises leader des systèmes de inspection THz viennent présenter les récents développements de leur technologie et portfolio de produits Terahertz.

- 
- retrouvez le programme de la journée de clôture et les liens d'inscription en cliquant [ici](#). *La participation est gratuite.*
  - pour plus d'information détaillée sur le projet, n'hésitez pas à contacter le coordinateur Mathias Vanwollegem: [mathias.vanwollegem@iemn.fr](mailto:mathias.vanwollegem@iemn.fr)
  - Vous trouverez plus d'informations sur le projet dans [ce reportage récent sur la chaîne Euronews](#).