

Un frigo silencieux... à 185 décibels!

Grâce à la thermoacoustique, les réfrigérateurs du futur pourraient refroidir les aliments à l'aide d'un puissant haut-parleur.

Raphaëlle Derome

Il y a de cela plusieurs années, une maison du Plateau Mont-Royal arborait un graffiti qui disait: « Le froid n'existe pas; il n'est qu'une absence de chaleur. Signé : Le Diable ». Probablement sans le savoir, le graffiteur avait énoncé le principe de base de la réfrigération : on ne refroidit pas un objet en lui donnant du froid, mais en lui enlevant de la chaleur.

Pour garder les aliments au frais, les réfrigérateurs doivent continuellement pomper la chaleur vers l'extérieur. Le véhicule de choix? Un produit réfrigérant qui circule en boucle entre l'intérieur et l'extérieur de l'appareil.

Dans le frigo, un thermostat contrôle la température. Lorsque celle-ci est trop élevée, le frigo se met en marche. On l'entend qui commence à ronronner : c'est le compresseur qui comprime le gaz réfrigérant. Sous la pression, les molécules s'entrechoquent et le gaz s'échauffe. Mais comme le gaz circule dans les serpentins situés derrière l'appareil, la chaleur a tôt fait de se dissiper. Le gaz se condense et se liquéfie.

Le liquide pénètre alors à l'intérieur du réfrigérateur en passant par une valve de décompression. L'effet est immédiat : en prenant de l'expansion, le gaz se refroidit. Plus froid que l'air environnant, il s'évapore, absorbant ainsi la chaleur des aliments. Le même phénomène survient lorsque nous transpirons: en s'évaporant, la sueur absorbe notre chaleur corporelle, ce qui crée l'effet de fraîcheur. C'est la même chose quand on frotte notre peau avec de l'alcool à friction, mais comme l'alcool s'évapore à une température très basse, la sensation de fraîcheur est encore plus marquée.

Les réfrigérants s'évaporent eux aussi à des températures très basses, ce qui permet d'abaisser la température interne du réfrigérateur. Lorsque la température désirée est atteinte, le cycle s'arrête et le compresseur se tait.

C'est ainsi que depuis le début du XX^e siècle, les réfrigérateurs, thermopompes et climatiseurs nous permettent de conserver les aliments plus longtemps, de rendre nos immeubles plus confortables ou de conduire en été sous un soleil de plomb. Le problème, c'est que ces appareils font tous appel à des gaz nocifs pour l'environnement (voir encadré 1).

La thermoacoustique, une nouvelle technologie qui mêle physique et génie, pourrait justement permettre d'éliminer les réfrigérants polluants en refroidissant plutôt les aliments... à l'aide d'ondes sonores!

À l'épicerie du coin et dans l'espace

Depuis 20 ans, une poignée de chercheurs mènent des travaux en ce sens. Pour l'instant, les réfrigérateurs thermoacoustiques ne sont pas encore aussi efficaces que les réfrigérateurs à compresseur traditionnels. Mais d'ici à ce qu'ils le soient, « ils pourraient avoir des applications, combler certaines niches », souligne le Dr. Roydon Fraser, professeur de génie mécanique à l'Université de Waterloo, Ont.

Steven Garrett, professeur-chercheur à la Pennsylvania State University et chef de file dans le domaine, a construit plusieurs prototypes de réfrigérateurs thermoacoustiques. Et bien qu'ils n'aient pas encore débouché commercial, ils sont loin d'être confinés au laboratoire. En 1992, son *Space ThermoAcoustic Refrigerator* (STAR) a passé 11 jours en orbite à bord de la navette spatiale *Discovery*. Un autre prototype a servi à refroidir les systèmes radar d'un navire de la Marine américaine, le USS-Deyo.

Mais son plus récent prototype plaira aux plus gourmands : il s'agit d'un congélateur commercial pouvant contenir 200 litres de crème glacée, dont le développement a été financé par Ben & Jerry's, le célèbre fabricant de glaces du Vermont (voir encadré 2). « Ils nous ont donné un congélateur comme on en retrouve dans les dépanneurs et les épiceries, avec deux portes coulissantes vitrées sur le dessus, dit le Dr. Garrett. La seule différence, c'est qu'ils ont retiré le compresseur pour que nous le remplacions par un système thermoacoustique. »

Le système conçu par le Dr. Garrett et ses étudiants tient à l'intérieur d'un cylindre de 25 cm de diamètre et de 40 cm de long, rempli d'hélium sous pression. « L'hélium est un gaz tout à fait inoffensifs pour l'environnement, disponible à prix abordable et facile à trouver », souligne le Dr. Garrett.

L'extrémité du tube comporte un haut-parleur ultra-puissant, qui émet des ondes sonores. Ces vibrations font danser le gaz dans le cylindre... mais pas n'importe comment! Quand l'onde sonore passe, les particules de gaz font comme les amateurs de danse en ligne : elles oscillent sur de petites distances, mais restent toujours autour de la même position. Seule l'onde voyage d'un bout à l'autre du tube.

Avec leurs allers-retours, les particules de gaz créent de minuscules variations de pression et de température : comme dans le réfrigérateur classique, le gaz comprimé se réchauffe; puis se refroidit en prenant de l'expansion. « S'il n'y a rien pour entraver le passage de l'onde, les variations continuent indéfiniment : chaud-froid, chaud-froid... mais rien ne se passe », explique le Dr. Fraser. C'est que les variations de température produites par l'onde sonore dans le gaz sont minimales: même à une intensité de 120 décibels, le seuil de douleur de l'oreille humaine, la température n'oscille que de 0,02 degrés! Impossible, donc, de condenser et de faire évaporer le gaz pour refroidir les aliments.

Pour exploiter d'aussi faibles variations de température et créer un mécanisme efficace de pompage de chaleur, il faut mettre le gaz en contact avec un solide. « On veut quelque chose qui conduit rapidement la chaleur », dit le Dr. Fraser. On place donc, à une distance stratégique devant le haut-parleur, un ensemble de plaques de métal superposées qu'on appelle une « pile » en raison de sa ressemblance avec une pile d'assiettes.

Lorsque l'onde sonore se propage, elle force le gaz à passer dans les minces canaux situés entre les plaques de la pile. « C'est là qu'on génère la différence de température », poursuit le Dr. Fraser. Au moment où le haut-parleur émet une impulsion sonore, le gaz est comprimé vers l'avant et il se réchauffe. Il transmet alors cette énergie aux parois de métal qui l'entourent : la pile se réchauffe à son tour. Puis, une fois l'onde passée, le gaz, débarrassé de sa chaleur, retourne à sa position initiale. C'est alors la pile qui lui transmet de la chaleur, qu'il transportera un peu plus loin une fraction de seconde plus tard, lors de la deuxième impulsion sonore.

« Cela fonctionne comme des pompiers qui se passent des chaudières d'eau à la chaîne pour éteindre un feu, » explique Chris Davies, qui a fait sa maîtrise en thermoacoustique sous la direction du Dr. Garrett. Chaque pompier reste à son poste, mais l'eau finit par se rendre de la rivière à l'incendie. « De la même façon, chaque petite oscillation du gaz permet de pousser la chaleur un peu plus loin le long de la pile. »

Comme l'onde sonore voyage toujours dans le même sens, la chaleur se déplace toujours vers la même extrémité de la pile. Assez rapidement après la mise en marche du haut-parleur, la pile sera devenue chaude d'un côté et froide de l'autre : on a réussi à transporter de la chaleur grâce au mouvement des ondes sonores! Il ne reste plus qu'à rattacher le côté froid de la pile à un tuyau rempli d'alcool qui circulera à l'intérieur du congélateur, et le côté chaud à un serpentin qui dissipera la chaleur dans la pièce.

La puissance du son

Évidemment, plus les ondes produites par le haut-parleur sont puissantes, plus on pourra déplacer de chaleur. Malheureusement, la plupart des hauts-parleurs disponibles sur le marché actuel sont très peu efficaces, ne transformant que 1% de l'énergie électrique en vibration sonore.

Comme l'explique le Dr. Fraser, « les fabricants d'enceintes acoustiques ne cherchent pas à convertir l'énergie électrique en énergie acoustique, mais plutôt à reproduire la musique le plus fidèlement possible. » Leurs hauts-parleurs doivent donc pouvoir émettre l'ensemble des fréquences audibles par l'homme, de la contrebasse au piccolo en passant par Pavarotti et Céline Dion.

En thermoacoustique, c'est le contraire : on veut un haut-parleur le plus puissant possible, et on ne travaille qu'avec une seule note! Pour réaliser ses prototypes, le professeur Garrett a donc dû développer ses propres modèles de hauts-parleurs, dont l'efficacité atteint 90%.

Mais même les hauts-parleurs les plus efficaces ne peuvent émettre les sons aussi forts que requis. Le tube thermoacoustique est donc construit de façon à ce que les ondes sonores rebondissent de façon optimale sur les parois du cylindre. À chaque fois qu'une onde résonne, elle ajoute à la puissance du haut-parleur : « C'est comme quand on pousse un enfant sur une balançoire, explique le Dr. Garrett. On n'a pas besoin de le pousser très fort au départ, car chaque petite poussée ajoute au mouvement. Il suffit de pousser au bon moment, et l'enfant va rapidement se balancer très haut ».

Résultat : le moteur thermoacoustique du congélateur Ben & Jerry's peut atteindre 185 décibels. « Pour vous donner une idée, l'oreille humaine est endommagée au-delà 120 décibels. Un jet qui décolle émet 140 décibels. Et à 165 décibels, vos cheveux prennent feu! », s'exclame le Dr. Garrett.

Mais les tignasses ne s'enflammeront pas de sitôt au dépanneur du coin, puisque les ondes sonores sont bien emprisonnées dans le cylindre de métal. D'ailleurs, « il serait impossible de créer des sons aussi forts dans des conditions normales », précise le Dr. Garrett.

Le seul moyen est d'utiliser un gaz sous pression. Dans le congélateur Ben & Jerry's, l'hélium est pressurisé à 10 atmosphères (ou 147 PSI, soit environ 3 fois la pression d'un pneu de bicyclette). « Cela permet de concentrer plus d'énergie dans un petit volume, dit le Dr. Garrett. Si jamais le réservoir devait briser, la pression s'en échapperait et le son s'éteindrait aussitôt. »

Et lorsque le réfrigérateur est en marche, seul le gaz vibre. Le réservoir cylindrique, lui, reste immobile. Pour qu'on entende quelque chose de l'extérieur, il faudrait que la bouteille elle-même se mette à vibrer, de la même façon qu'un locataire qui marche trop fort fait vibrer le plancher de son appartement... et le plafond de son voisin d'en bas! Ironiquement, les réfrigérateurs thermoacoustiques pourraient donc être plus silencieux que les modèles à compresseur.

Des avantages nombreux, mais des défis à relever

Outre le fait d'être silencieux, les réfrigérateurs thermoacoustiques devraient aussi offrir un meilleur contrôle de la température. À l'heure actuelle, il n'y a pas de juste milieu : les réfrigérateurs fonctionnent à plein régime pendant 15 minutes, puis s'arrêtent complètement. Au contraire, « le haut-parleur d'un réfrigérateur thermoacoustique fonctionne comme une chaîne stéréo, dit Chris Davies. Si vous voulez que votre frigo soit plus froid, vous augmentez le volume. Si vous voulez qu'il soit moins froid, vous le diminuez, tout simplement. »

Et comme on élimine le compresseur, l'appareil ne comporte plus aucune pièce mobile. Il devrait donc durer plus longtemps, avec un entretien moins coûteux et une fiabilité accrue. « C'est un avantage important quand on sait que les 200 contenants de crème glacée qui sont stockés dans le congélateur valent deux fois plus cher que le congélateur lui-même! », souligne le Dr. Garrett.

Mais en dépit des importantes avancées des dernières années, le Dr. Garrett ne sait pas combien il lui faudra de temps pour mettre au point un réfrigérateur thermoacoustique dont l'efficacité pourra rivaliser avec celle des électroménagers conventionnels. « Le réfrigérateur domestique est une cible mouvante, dit-il. Avec l'évolution des lois, les manufacturiers de réfrigérateurs et de compresseurs pourraient bien augmenter eux aussi l'efficacité de leurs appareils. »

Il faudra aussi que toute l'industrie de la réfrigération s'adapte à une technologie complètement nouvelle. Malgré les avantages manifestes de la thermoacoustique, il reste donc beaucoup de chemin à parcourir avant que Monsieur et Madame Tout-le-monde aient leur propre réfrigérateur thermoacoustique dans la cuisine.

Encadré 1

Le problème des réfrigérants

Depuis les années 1930, l'industrie de la réfrigération utilise les CFC (chlorofluorocarbones) comme gaz réfrigérants. Non-toxiques, non-explosifs, ils avaient l'avantage de ne poser aucun danger pour la santé en cas de fuite ou de bris d'équipement. Cependant, les CFC allaient causer de graves problèmes en haute atmosphère.

C'est dans les années 1970 qu'on a découvert que les CFC attaquent la couche d'ozone qui nous protège des rayons nocifs du soleil. « En conformité avec le Protocole de Montréal, nous avons cessé de produire des CFC dans les années 1990 », déclare Frederic Dawson, responsable des questions réglementaires chez DuPont Canada. Les chimistes ont donc mis sur le marché deux nouvelles familles de gaz : les HCFC et les HFC.

Mais ces produits de remplacement ne règlent pas le problème. Les HCFC, bien que moins dommageables, ont quand même un certain potentiel destructeur d'ozone. De leur côté, les HFC sont inoffensifs pour l'ozone, mais sont des gaz à effet de serre extrêmement agressifs. Selon DuPont, « Le HFC-134A est 300 fois plus puissant que le CO₂ ».

L'industrie est donc à la recherche d'alternatives. En Europe, certains fabricants utilisent des mélanges d'hydrocarbures (propane, butane...) comme gaz réfrigérants. Mais en Amérique du Nord, ces modèles sont interdits en raison des risques d'explosions. Une crainte non-fondée, selon Peter Tam, président de HC-Tech Inc, une compagnie qui distribue les gaz réfrigérants à base d'hydrocarbures : « Il y a un certain danger, mais l'important c'est d'éduquer les gens... Personne ne refuse d'utiliser sa voiture; pourtant, il est assez inquiétant de savoir que la pompe risque d'exploser si vous fumez en faisant le plein! » Pour l'instant, les réfrigérants à base d'hydrocarbures ne sont autorisés qu'en petites quantités, comme dans les refroidisseurs d'eau, mais « les normes sont à l'étude », précise Jean Carbonneau, d'Environnement Canada.

Encadré 2

Le congélateur Ben & Jerry's

Il y a deux ans, la compagnie Ben & Jerry's confiait au Dr. Garrett le mandat de développer un prototype thermoacoustique qui pourrait refroidir un congélateur commercial. « Nous devons réussir à conserver 200 litres de crème glacée à une température de -20°C. » C'est maintenant chose faite, et le prototype sera lancé en grande pompe à New York le 22 avril 2004, lors des célébrations du Jour de la Terre.

« Grâce aux percées réalisées par mon collègue Greg Swift, du Laboratoire National Los Alamos, nous avons réussi à dépasser les limites d'efficacité », souligne le Dr. Garrett. En effet, le congélateur qu'il a construit avec ses étudiants est plus efficace que les modèles commerciaux existants, des modèles qui sont jusqu'à deux fois moins efficaces que les modèles résidentiels!

« Il faut comprendre que congélateurs de ce type sont donnés gratuitement aux détaillants par les fabricants de crème glacée », qui s'assurent ainsi d'un espace réservé exclusivement à la vente de leurs produits. « Une fois le congélateur au magasin, c'est le marchand qui paie la facture d'électricité, alors les fabricants de crème glacée ont tendance à privilégier les modèles les moins chers à l'achat. Ce ne sont donc pas les meilleures machines du monde, mais le fait que nous ayons réussi, en seulement deux ans, à battre l'efficacité des modèles existants est très encourageant. »

Cependant, Ben & Jerry's ne s'occupera pas du développement commercial du congélateur thermoacoustique : « Nous sommes dans l'industrie de la crème glacée, pas des congélateurs », souligne Chrystie Heimert, directrice des relations publiques chez Ben & Jerry's. « Si quelqu'un part à la recherche d'un manufacturier de congélateurs, ce sera les gens de l'Université d'État de Pennsylvanie. »

Un argument convaincant pour convaincre les manufacturiers : le nombre de clients potentiels. Selon le Dr. Garrett, il y aurait trois millions de ces congélateurs à l'échelle mondiale : Unilever (la société-mère de Ben & Jerry's) et Nestlé en possédant chacun 1,5 million. Coca-Cola et Pepsi pourraient aussi être intéressées à se procurer des distributrices automatiques moins dommageables pour l'environnement.