

# Refroidissement de composants électroniques

Des développements vraiment « cools »

Reg Miles

regmiles@lycos.co.uk

Si l'est un facteur qui peut caractériser l'industrie électronique depuis son passage des tubes aux semi-conducteurs, c'est que tant les composants que les produits ont vu leur taille diminuer énormément. La conséquence inévitable de cet état de fait est, qu'en fonctionnement, les composants voient leur température augmenter et que l'on dispose de moins en moins d'espace pour le refroidissement. Le présent article voudrait passer en revue certains des développements et innovations récents ayant marqué la technologie du refroidissement.

Le radiateur ne constitue plus la solution universelle qu'il constituait auparavant, mais son utilisation reste fréquente. L'efficacité de n'importe quel concept dépend de l'aire des ailettes et du coefficient de transfert de la chaleur (l'efficacité de dissipation de la chaleur par la surface). Le problème de l'utilisation de l'air à cet effet est que l'air est un assez bon isolant. Il n'en reste pas moins que ce fluide présente des avantages certains -dans le domaine des applications grand public en particulier.

D'habitude, les ailettes de radiateur sont minces et plates. Plus récemment cependant, on mis sur le marché des ailettes galbées faites de feuilles de métal extrudé, fixées par soudage ou autre technique à la surface de base du radiateur.

Ce concept a été introduit à l'origine dans les

applications militaires et aérospatiales où l'on avait grand besoin de grandes surfaces sous un poids faible; il s'est rapidement répandu dans les autres domaines de l'électronique. Dans le cas de flux d'air omnidirectionnels la transformation d'ailettes plates en sections de forme cylindrique se traduit par une amélioration de près de 20% par rapport aux ailettes bi-directionnelles. De nouvelles techniques soit ajoutent un galbe au bord d'attaque ou au bord de fuite vertical des ailettes séparées (ailette torsée) ou découpent et recourbent les ailettes pour leur donner la forme d'un diapason de manière à créer une certaine turbulence; cette approche améliore le

transfert calorifique par fragmentation, au niveau des ailettes, de la couche d'air au déplacement lent, décrochage causé par la friction entre les particules d'air et le métal, région connue sous la dénomination de couche-limite. Les ailettes en aiguille (colonnes rondes elliptiques ou hexagonales) produisent le même effet -et peuvent toujours encore rendre d'excellents services par convection naturelle dans le cas d'une masse d'air se mouvant à faible vitesse.

La plupart des radiateurs sont fait en aluminium. On utilise également le cuivre lorsque sa meilleure conduction pèse plus lourd que les augmentations de poids et de coût

qu'entraîne son utilisateur. Le carbure silicique d'aluminium (AlSiC), apparu récemment sur le marché, constitue une alternative; il est léger, solide et bon conducteur, mais reste coûteux pour le moment.

Le graphite naturel est un autre nouveau-venu; il présente la conductivité du cuivre tout en ayant une densité plus de 4 fois moindre. Le graphite pyrolytique et les matériaux basés sur les fibres de graphite voient leurs propriétés de conductivité s'améliorer sans cesse; leur fabrication requiert des températures supérieures à 3 000 °C, ce qui est coûteux et partant réservé, pour l'instant, aux applications aérospatiales et aéronautiques. Notons au passage que les matériaux à base de graphite présentent de fortes propriétés anisotropes avec des conductivités différentes selon les axes directionnels, ce qui limite leurs domaines d'applications.

## Pâtes pour radiateur

On a coutume, en vue de maximiser la conduction entre le(s) composant(s) et la base du radiateur, d'appliquer, sous une forme ou une autre, un produit thermoconducteur servant à combler les interstices dus aux inégalités des surfaces, de manière à éviter la présence d'une couche d'air à l'effet isolateur. Le produit le plus couramment utilisé est une pâte thermoconductrice à base de silicone; il existe cependant bien d'autres produits de ce genre. L'un des développements récents dans ce domaine est l'utilisation d'un matériau à changement d'état (dit PCM pour *Phase Change Material*). Ce matériau est solide à une température prédéterminée, se liquéfiant lorsque sa température dépasse cette valeur, le forçant à se répandre et à combler les interstices libres.

On peut également utiliser ce type de matériau pour éviter que des composants ne dépassent une certaine température de fonctionnement voire pour refroidir des composants travaillant en mode transitoire. Il se dilate lorsqu'il change de phase et se liquéfie, absorbant ainsi l'excédent de chaleur (cf. figure 1); lorsque la température retombe, le matériau se resolidifie prêt à entrer à nouveau

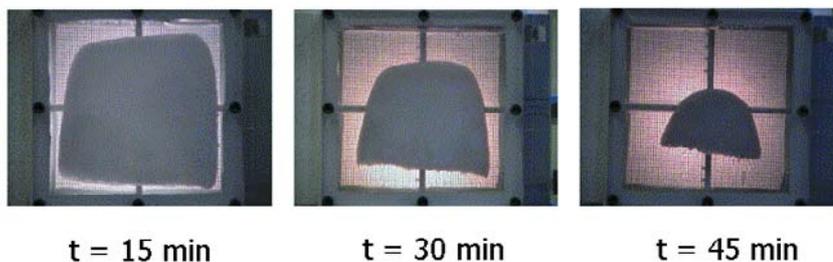


Figure 1. Représentation du stockage de l'énergie par changement de phase (avec l'autorisation du Consortium de recherche sur les technologies du refroidissement)

en action lorsque la température regrippe. Il existe des radiateurs remplis de PCM, sachant que l'on peut fixer des réservoirs de PCM à des platines ou à des composants spécifiques.

## Ventilateurs et jets

Lorsque l'on se trouve en présence de composants chauffant beaucoup la solution prend probablement la forme d'un ventilateur. Le pulseur d'air (*jet actuator*) est un développement récent. Ce dispositif prend la forme d'une cavité dite chambre associée à un petit diaphragme piloté électromagnétiquement et qui par ses mouvements aspire de l'air pour le rejeter ensuite. Cette approche impulsioneuse permet d'éviter les problèmes de couche-limite évoqués plus haut, vu que la couche d'air va s'amincir entre les jets. Une version miniaturisée de ce produit baptisée Micro-Jet Array a été mise au point; le pulseur peut être placé juste en dessous du composant sur lequel il « souffle » de l'air à une vitesse de l'ordre de 70 km/h.

## Thermosiphon & Co.

Une autre méthode pour éviter les points chauds, plus efficace au demeurant, consiste à évacuer la chaleur produite par le composant vers un endroit où il est possible de refroidir à proximité de la sortie (voire même à l'extérieur du boîtier si tant est que cela soit réalisable). Cela peut être réalisé à l'aide d'un thermosiphon ou *heat-pipe* (caloduc semble être meilleur que la traduction pipe à chaleur proposée par Google) sans qu'il n'y ait besoin de la moindre énergie externe. Un ther-

mosiphon prend la forme d'un tube fermé, la plupart du temps en cuivre, contenant une petite quantité de fluide, très souvent de l'eau. Comme le fluide se trouve dans le vide, l'application de chaleur se traduit par sa vaporisation aisée, transition qui permet d'absorber une quantité importante de chaleur, la valeur montant vers l'autre extrémité du tube où se fait l'évacuation de la chaleur et où prend place la condensation de la valeur sur la paroi intérieure du tube, de sorte que le liquide redescend et le cycle reprend au début. Il suffit d'une faible chute de température pour obtenir la condensation de la vapeur de sorte que le système est très efficace.

L'intérieur d'un caloduc est recouvert d'une couche poreuse qui entraîne une recirculation du liquide par capillarité vers l'extrémité chaude. Plus la structure des pores est fine, mieux la capillarité sera en mesure de vaincre la gravité : des tubes à structure interne striée et à écran fin ne permettent qu'une légère inclinaison du dispositif, l'évaporateur ne se trouvant que très légèrement au-dessus du condenseur, alors que des tubes dotés d'un revêtement interne à base de poudre métallique peuvent s'accommoder de n'importe quelle orientation.

Les thermosiphons et les caloducs deviennent de plus en plus intéressants en raison de leur efficacité et de leur fonctionnement passif. Ils ont également des dimensions compactes, 3 à 4 mm de diamètre, des versions miniaturisées plus fines font leur apparition et, de plus, à la longueur adaptée à l'application. Un téléphone mobile par exemple pourra se contenter d'un caloduc de petite taille et d'ici qu'il utilise l'antenne comme condenseur...

Dans un ordinateur portable, le caloduc sera un peu plus grand et utilisera une plaquette d'aluminium placée sous le clavier ou un radiateur comme condenseur. Plusieurs caloducs pourront être utilisés en vue du transfert de la chaleur produite par plusieurs composants vers un unique radiateur.

Une nouvelle approche du thermosiphon et du caloduc est d'en faire un tore. La vapeur va de l'évaporateur au condenseur et le liquide condensé retourne par un prolongement du tube vers l'évaporateur. L'avantage de l'approche en tore est de permettre d'utiliser pour les lignes de vapeur et de liquide des éléments flexibles et que leur longueur peut être sensiblement plus importante - dépassant le mètre linéaire. Une nouvelle variation sur le thème caloduc est le caloduc à pulsion doté d'un serpentin interne dans lequel les phénomènes d'expansion et de contraction induits respectivement par la vaporisation et la condensation produisent un mouvement pulsateur repoussant la vapeur vers la partie froide et le liquide vers la partie chaude.

## Température contre taille

Le problème du refroidissement des composants électroniques fonctionnant sous des températures de plus en plus élevées est souvent exacerbé par leur petite taille. C'est particulièrement vrai dans des applications comme les télécommunications, où les radiateurs nécessaires pour refroidir des unités comme les amplificateurs HF sont plus grands que ce qu'ils refroidissent. En résultat, on constate un point chaud juste au-dessus de l'unité, causé par une « résistance thermique rampante » -seule cette partie du radiateur remplit sa tâche. La taille et la vitesse du ventilateur peuvent être augmentées pour y répondre, ou l'aluminium remplacé par du cuivre ou d'autres matériaux plus exotiques (un dépôt de vapeur chimique de diamant -CVD, *Chemical Vapour Diamond* -est utilisé comme dissipateur de chaleur lorsque la température est critique). Mais ces alternatives ont leurs inconvénients en terme de bruit, de poids et de coût.

Une solution séduisante consiste à inclure des caloducs dans la base d'un radiateur en aluminium. Ceci élimine la plus grande partie de la résistance, et dissipe relativement uniformément la chaleur. Une solution encore plus efficace consiste à utiliser une chambre à vapeur, enceinte sous vide avec une mèche en tissu fonctionnant exactement sur le même principe que les caloducs : partout où la chaleur se manifeste, le fluide contenu à cet endroit dans la mèche est vaporisé ; et partout où la vapeur rentre en contact avec une partie plus fraîche, sa chaleur latente s'échappe et se recondense dans la mèche. Un projet de la DARPA (*US Defence Advanced Research Projects Agency* = agence des projets de recherche avancés de la Défense des Etats-Unis), conduit par l'Université internationale de Floride, travaille sur un dissipateur

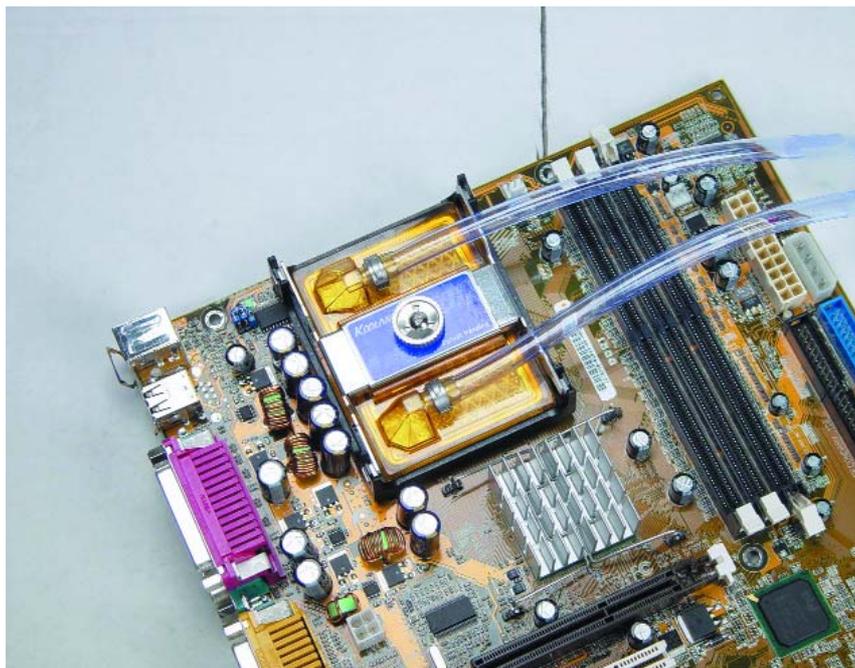


Figure 2. Le refroidisseur d'unité centrale de Koolance installé (avec l'autorisation de Koolance).

de chaleur similaire, mais qui contient une micro-pompe commandée par un quartz piézoélectrique pour transférer le fluide dans un échangeur de chaleur, le tout intégré à la fin dans un seul module.

Lorsqu'il n'y a pas d'objections pratiques ou esthétiques, une plaque froide (ou une poche d'eau) représente une alternative très efficace à la ventilation, aux caloducs et aux chambres à vapeur. On entre dans le domaine du surcadencage des ordinateurs, où l'on ne cherche pas à prolonger la vie du composant, l'unité centrale, mais à pousser celui-ci jusqu'à ses limites. Quoique ce soit aussi, bien sûr, un moyen parfaitement efficace de prolonger la vie de n'importe quel composant soumis à une haute température.

La plaque froide peut être juste un contenant pour le liquide (probablement de l'eau) ou disposer d'un tuyau à liquide incorporé. Selon sa conception, les composants électroniques peuvent être installés sur l'un des côtés, ou sur les deux. Le système, dans sa version la plus simple, consiste à faire circuler de l'eau froide à travers un tube dans le contenant, et vers un autre tube à la sortie. On trouvera plus souvent un système à recirculation d'eau, comportant une plaque froide, un réservoir

ou un vase d'expansion, une pompe, et un échangeur de chaleur (probablement un radiateur à tubes -une version réduite du type utilisé dans les automobiles) avec un ventilateur pour refroidir l'eau (un système d'échange liquide vers air). Le liquide tiède sortant de la plaque froide se déverse dans le réservoir, est pompé dans le radiateur où il est refroidi, et repart à nouveau vers la plaque froide. Si des tuyaux sont incorporés dans la plaque froide, ils peuvent être alimentés en série ou en parallèle : dans le premier cas, à travers un tuyau commençant à un bout et serpentant d'un côté à l'autre de la plaque ; dans le second cas, à travers plusieurs tuyaux traversant directement la plaque depuis un tuyau d'alimentation principal d'un côté vers un tuyau d'évacuation principal de l'autre. Des kits sont déjà disponibles : un chez Maplin ([www.maplin.co.uk](http://www.maplin.co.uk)) ; tout un éventail et des PC refroidis à l'eau chez Koolance ([www.koolance.com](http://www.koolance.com)). La **figure 2** présente leur refroidisseur d'unité centrale CPU-200 installé.

## Le refroidissement par liquide – l'avenir ?

Le refroidissement par liquide est très adapté à une combinaison avec

le refroidissement thermoélectrique (TEC, *Thermoelectric Cooler*) – aussi connu comme unité Peltier. Ceci consiste en deux éléments semi-conducteurs, principalement des tellures de bismuth, fortement dopés pour créer des couples de type n et de type p (cf. **figure 3**). A la jonction froide, la chaleur du composant est absorbée par des électrons propulsés par un courant électrique d'un bas niveau d'énergie dans l'élément de type p vers un niveau d'énergie plus élevé dans l'élément de type n ; à la jonction chaude, les électrons retournent du type n vers le type p de bas niveau et la chaleur est expulsée. Le flux d'électrons est maintenu par le courant continu, qui monte dans un couple et redescend dans l'autre, tandis que le courant porteur, et la chaleur, descendent tous les deux. Normalement, les couples de type n et de type p sont combinés en nombre variés pour constituer un module, dans lequel ils sont connectés électriquement en série et thermiquement en parallèle. Un module peut être petit, mais tout de même produire une différence de température typique de 70 degrés Celsius. Pour un refroidissement plus important, les modules peuvent être montés en cascade.

### Bloc super-réseau

Un nouveau développement venant du Research Triangle Institute promet de donner une considérable accélération au TEC. Il utilise des empilages de films minces consti-

tués de deux couches alternées de matériaux semi-conducteurs pour piloter le transport de phonons et d'électrons dans les super-réseaux (*superlattice*) : les super-réseaux de type p Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub>/SbTe<sub>3</sub> bloquent les premiers (pour empêcher la chaleur d'être renvoyée à son origine) et transmettent les seconds. Il est réputé être 2,4 fois plus efficace que le TEC traditionnel ; et répond 23 000 fois plus rapidement, grâce à sa minceur.

Apparemment, des points de ce matériau uniquement placés aux points chauds sur un composant électronique seraient plus efficace que le refroidissement du dispositif complet -et économiseraient de la puissance. En attendant, la DARPA finance une recherche dans les plaques intégrées réfrigérantes thermoélectriques à liquide, pour remplacer le duo TEC-liquide refroidissant séparé plus onéreux et moins efficace -un projet conduit par la CFD Research Corporation.

L'unité de refroidissement thermoélectronique est une variante du TEC. Elle utilise deux matériaux séparés par une couche-barrière d'environ un micron d'épaisseur ou un espace de vide de quelques nanomètres : au fur et à mesure que les électrons absorbent la chaleur et gagnent de l'énergie, ils franchissent un tunnel depuis le côté froid (émetteur) vers le côté chaud (collecteur), aidés par une tension polarisée -et la couche-barrière ou, plus particulièrement, l'espace de vide empêchent les phonons de

revenir en arrière. La basse tension signifie que le refroidissement peut être obtenu sans réchauffement non désiré. Le problème principal du modèle utilisant un espace de vide est d'obtenir un espace d'une certaine taille à travers une zone mesurée en centimètres carrés -au laboratoire, puis ensuite en production.

### L'approche frigidaire

En revenant au refroidissement par liquide, un tel système peut utiliser le refroidissement traditionnel pour rafraîchir le liquide. Dans ce système à liquide réfrigéré (appelé aussi liquide à liquide), le réfrigérateur remplace l'échangeur de chaleur. De la même façon, l'eau est probablement le liquide circulant. S'il faut la refroidir à des températures en dessous de zéro, elle peut-être mélangée à de l'antigel -qui réduit les propriétés de très bon transfert de chaleur de l'eau et augmente la viscosité, mais pas significativement. Autrement, le système peut devenir un réfrigérateur lui-même, ce que l'on appelle habituellement un refroidisseur par compression de vapeur. VapoChill ([www.vapochill.com](http://www.vapochill.com)) propose une gamme de stations de travail, de PC de puissance, et un kit pour les constructeurs amateurs (cf. **figure 4**). Pour gagner de la place, un tube capillaire est utilisé pour réduire la pression avant l'évaporateur monté sur l'unité centrale, sinon cela ressemble à un réfrigérateur normal. Ces systèmes sont prévus pour être utilisés à basse température, entre +20 et -40° C. Parce que c'est le réfrigérant lui-même qui circule, le flux peut être inférieur qu'avec un liquide de refroidissement réfrigéré. Un projet conduit par l'Université de Stanford pour le compte de la DARPA étudie l'utilisation d'un micro-refroidisseur, utilisant une pompe électrocinétique et un micro-évaporateur incorporant un capteur de température. Le but à long terme est de développer des unités réfrigérantes basées sur des compresseurs originaux pour la phase de vapeur utilisant la technologie électrocinétique.

En faisant fonctionner des unités CMOS à basse température, on obtient une augmentation significative de performance. C'est principalement dû à une diminution exponentielle des courants de fuite et à une augmentation de la vitesse de basculement des transistors. Cette dernière provient d'une amélioration de la mobilité, qui augmente lorsque la température baisse parce que les vibrations thermiques dans le réseau moléculaire du semi-conducteur diminuent et, avec elles, la diffusion électro-phononique qui ralentit la vitesse porteuse (la vitesse de basculement des transistors étant propor-

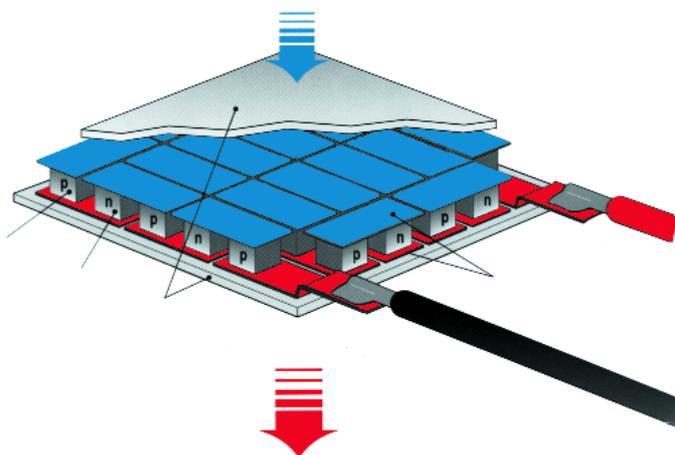


Figure 3. Structure de base d'un refroidisseur thermoélectrique (TEC) (avec l'autorisation de Melcor)

tionnelle à la vitesse porteuse moyenne dans l'unité). Toutefois, certaines unités peuvent défaillir à cause de défauts d'appariement dans l'expansion thermique de leurs matériaux, ou de défaillances électroniques dues à des effets de porteuse chaude -elles doivent être adaptées pour l'usage à ces basses températures.

Un autre obstacle à l'utilisation du refroidissement par liquide réfrigéré est la condensation qui se forme lors du contact entre l'air ambiant, chaud et moite, et les parties froides du système. Toutes les parties internes du système de refroidissement doivent donc être isolées pour prévenir la formation de condensation.

Une technologie de réfrigération qui semble particulièrement prometteuse pour le refroidissement des dispositifs électroniques (et il existe plusieurs alternatives au système traditionnel par compression de vapeur) est celle de l'unité de réfrigération thermo-acoustique (TRD, *Thermoacoustic Refrigeration Device*) ou refroidisseur thermo-acoustique (TAC, *Thermoacoustic Cooler*). Il utilise les ondes acoustiques stationnaires dans une cavité fermée pour comprimer ou dilater mécaniquement un gaz sous pression (normalement de l'hélium), en conjonction avec un cœur thermo-acoustique consistant en une pile poreuse de plaques. Il opère à la manière d'une pompe : l'expansion du gaz permet d'absorber la chaleur, alors que sa compression expulse la chaleur ; lorsque les molécules de gaz oscillent dans la pile à travers les plaques, elles refroidissent la pile en absorbant la chaleur dans un sens, et la réchauffent dans l'autre – ce qui crée un gradient de température dans la pile. On exploite ce mécanisme par un échangeur de chaleur chaude et un de chaleur froide à chaque extrémité, traversés par un fluide circulant (eau, avec ou sans antigel).

Parce que cette technique semble très efficace sans nécessiter de liquides réfrigérants ni de pièces mécaniques mobiles (sauf pour le pilote acoustique), elle s'adapte parfaitement à la miniaturisation. La DARPA a lancé un projet, conduit par le Rockwell Scientific Center, de développement d'une version système micro-électromécanique (MEMS, *microelectromechanical*) utilisant des matériaux piézoélectriques et des transducteurs pour obtenir une production acoustique de haute performance. Un autre projet en relation avec ce dernier, conduit par l'Université de l'Utah, consiste à l'intégrer dans des microcircuits électroniques. Un avantage supplémentaire de l'unité TRD est de pouvoir régler l'amplitude du degré de rafraîchissement, au lieu de la mettre en et hors service comme un réfrigérateur ordinaire.

## Surveillez vos calories

En plus des systèmes de réfrigération utilisant des liquides ou des gaz pour obtenir le refroidissement, la recherche se poursuit dans des systèmes employant l'effet magnétocalorique. Cet effet est obtenu en appliquant par cycles un champ magnétique à un solide paramagnétique pour lui faire expulser la chaleur absorbée lorsque le champ est en fonction, parce que tous les spins des électrons sont alignés et l'entropie (et sa capacité à garder la chaleur) réduite ; et pour lui laisser absorber la chaleur lorsque le champ est coupé, parce que les spins des électrons se repositionnent au hasard, accroissant ainsi sa capacité d'absorption.

Lorsque le réfrigérant (qui peut être de l'eau additionnée d'antigel, ou n'importe quel autre liquide adéquat) est pompé et entre en contact du matériau paramagnétique alors que le champ magnétique est coupé, sa chaleur est absorbée et le liquide froid refroidit le(s) composant(s) électronique(s) ; le liquide réchauffé revient alors auprès du matériau (le champ magnétique étant mis en fonction) et emporte la chaleur précédemment absorbée vers un échangeur à ventilation. Le cycle se reproduit ensuite.

Jusqu'à récemment, on avait besoin pour ce procédé d'un aimant supraconducteur. Mais les chercheurs des Laboratoires Ames, travaillant en partenariat avec l'Astronautics Corporation, ont développé un réfrigérateur utilisant un aimant permanent, et un disque tournant contenant un alliage de gadolinium, de silicium et de germanium (GdSiGe) comme matériau paramagnétique. Des matériaux nanocomposites ont aussi été proposés pour augmenter encore l'effet magnétocalorique.

Une variante de la réfrigération magnétocalorique consiste en une réfrigération électrocalorique, qui utilise des champs électriques pour obtenir les mêmes effets. Elle a été développée à l'origine par des chercheurs en Russie.

Son avantage est que les champs électriques sont plus faciles et plus économiques à produire que les champs magnétiques. La recherche sur les matériaux paramagnétiques continue, pour trouver la combinaison optimale qui permettra d'obtenir des changements de température réalistes.

## Autres développements

Pour être exhaustif, il faut citer aussi une paire d'autres méthodes de refroidissement par liquide utilisées



Figure 4. Système de refroidissement par compression de vapeur pour les constructeurs amateurs (avec l'autorisation de Vapochilla/Asetek).

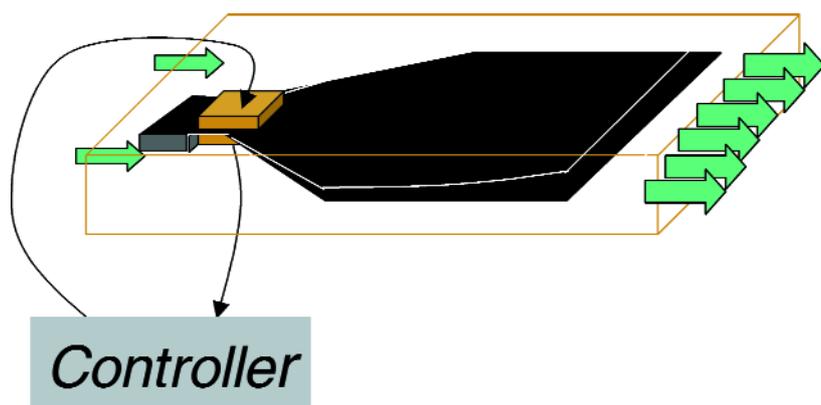


Figure 5. Principe du "battement" des ventilateurs thermoélectriques (avec l'autorisation du Consortium de recherche sur les technologies de refroidissement).

pour des applications spécialisées. La première est le refroidissement par pulvérisation, où, comme le nom l'indique, les composants et les platines sont aspergés. Des chercheurs de l'UCLA (Université de Californie Los Angeles) ont annoncé un raffinement de cette méthode : ils ont développé des micro-pulvérisateurs qui refroidissent les composants individuels, en utilisant une matrice de becs de 35 microns de diamètre. Ceux-ci sont fabriqués par gravure à ion réactif, procédé qui donne une paroi interne particulièrement lisse pour minimiser les obstructions par encrassement. L'eau pulvérisée refroidit à la fois par convection thermique et par évaporation. La matrice des becs est personnalisée selon la distribution de chaleur du composant, qui est revêtu d'une couche de Parylène C, un polymère enrobant possédant d'excellentes propriétés diélectriques. La DARPA finance des recherches similaires, conduites par l'Université Carnegie Mellon. Dans ce cas, les gouttelettes atomisées (de fluides diélectriques) sont créées par des coupelles rotatives et des transducteurs piézoélectriques vibrants, aussi bien que par des micro-pulvérisateurs. Il est prévu d'utiliser un logiciel intégré dans la puce pour contrôler la taille des gouttelettes et la fréquence et l'emplacement des pulvérisations, selon la température, les gradients thermiques et l'épaisseur du film détectés simultanément.

La NASA a aussi expérimenté le refroidissement par pulvérisation ; et l'immersion liquide, où les composants sont plongés dans un bain liquide. Ceci permettra à la NASA d'utiliser dans l'espace de plus en plus de composants disponibles dans le commerce ; en leur permettant d'être découplés du châssis et protégés par un bouclier contre les radiations, en plus d'une bonne protection thermique.

Le Consortium de recherche sur les technologies du refroidissement de l'Université Purdue dans l'Indiana a été fondée par Suresh Garimella, professeur d'ingénierie mécanique industrielle à Purdue, et comporte aujourd'hui dix membres : Aavid Thermalloy, Apple, Delphi-Delco Electronics, Eaton Corporation, General Electric, Intel, Modine Manufacturing, Nokia, Rockwell Automation et Sandia National Laboratories. Le Consortium dispose en outre de deux soutiens : Johnson Matthey et Philips Research.

« L'industrie vient nous voir avec des problèmes techniques, et nous conduisons la recherche pour les résoudre », annonce Garimella.

Un certain nombre de projets sont à l'étude, dont l'étude de radiateurs à micro-canaux. Ceux-ci disposent de canaux de la taille de quelques microns qui transportent un liquide réfrigérant ; ils offrent un coefficient de transfert de chaleur bien plus performant que les radiateurs traditionnels refroidis par liquide.

Le Consortium étudie en ce moment les caractéristiques du transfert de chaleur et de mécanique des fluides dans les micro-canaux, qui diffèrent sous plusieurs aspects des conceptions traditionnelles à cause de leur petite taille.

Un autre projet traite des ventilateurs piézoélectriques –développés par Garimella et Arvind Raman, professeur assistant d'ingénierie mécanique à Purdue. Ces ventilateurs disposent de pièces piézocéramiques, attachées sur de minces lames souples vibrant à basse fréquence, pour amener le ventilateur à sa fréquence de résonance – le courant alternatif induit une expansion-contraction de la céramique, provoquant un mouvement de battement (la figure 5 en montre le principe). La technologie est séduisante parce que les ventilateurs peuvent être de petite taille : suffisamment pour entrer dans un téléphone mobile ou un ordinateur portable ; et suffisamment toujours pour être installés sur une puce et la refroidir directement, avec des lames longues de seulement 100 microns. Ils ne consomment que 2 mW d'électricité, à comparer aux 300 mW à peu près consommés par un ventilateur traditionnel. Et, sans aimant, il n'y a pas d'interférences électromagnétiques avec les signaux. Le Consortium étudie et améliore aussi les caloducs plats et les matériaux à changement de phases.

## Conclusion

Le refroidissement était autrefois pris en compte en dernier ressort, et considéré comme un art là où il était appliqué. Mais les récents composants fonctionnant sous haute température ont mis fin à cette approche désinvolte. Il est aujourd'hui essentiel de le prendre en considération dès les premières étapes de la conception, et la recherche transforme dorénavant cette discipline en science.

(020411)

### NdlR :

Le phonon nous vient de l'univers quantique ; cette quasi-particule est une onde sonore quantifiée pouvant naître dans des solides et l'hélium liquide II.

### Addendum :

Maplin ([www.maplin.co.uk](http://www.maplin.co.uk)) propose, en plus d'un kit de réfrigération par liquide, un refroidisseur thermoélectrique, et une gamme de ventilateurs, de radiateurs et de composants thermiques pour le constructeur amateur.