

ART & SCIENCE

Des ferrofluides pour des œuvres de pointe

Les liquides ferromagnétiques sont des suspensions de petits aimants.

Soumis à un champ magnétique, ils se hérissent de pointes.

Certains artistes en font des sculptures mouvantes.

Loïc MANGIN

Quel est le point commun entre un billet de un dollar, les disques durs, l'imagerie par résonance magnétique et un amortisseur de voiture ? Tous utilisent les propriétés des fluides ferromagnétiques, c'est-à-dire des liquides qui contiennent des particules de taille nanométrique en suspension et dotées de propriétés magnétiques. Nous reviendrons en détail sur leur composition.

Les ingénieurs ne sont pas les seuls à exploiter les comportements étonnants de ces substances. Plusieurs artistes en ont également fait leur matière première. Parmi eux, citons l'Allemand Martin Frey, le groupe australien *Pendulum*, le Suisse Fabien Oefner... et la Japonaise Sachiko Kodama, dont plusieurs œuvres sont représentées ici (*Protrude, Flow* en a, c et d ; *Morpho Tower* en b). En 2014, elle a exposé à l'Université Stony Brook, aux États-Unis, et au Musée d'art contemporain de Shanghai (*Power station of art*), en Chine.

Les ferrofluides ont été inventés dans les années 1960 par Stephen Papell, un ingénieur de la NASA qui souhaitait, dans le cadre du programme *Apollo*, fabriquer un carburant pour fusées. Pour ce faire, il mélangea de la poudre de magnétite (un oxyde de fer, Fe_3O_4) à du kérosène et à de l'acide oléique puis broya l'ensemble pendant dix mois ! Il obtint le premier ferrofluide.

Aujourd'hui, la plupart des liquides ferromagnétiques sont toujours élaborés avec de

la magnétite, même si on lui préfère parfois la maghémite ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) qui est une forme oxydée de la magnétite. Étonnamment, ces deux substances, présentes dans les cellules nerveuses des pigeons, seraient la clef du sens de l'orientation de ces oiseaux !

Quel est le rôle de l'acide oléique ? Le lipide joue le rôle de tensioactif qui permet à la magnétite de rester en suspension dans le liquide. Sans lui, le ferrofluide ne serait pas stable et les nanoparticules magnétiques (de 5 à 15 nanomètres de diamètre) sédimenteraient. Les parties hydrophiles du lipide s'associent avec les particules

Les pics apparaissent quand le champ magnétique est suffisant pour vaincre la tension de surface du fluide et la gravité.

tandis que les parties hydrophobes sont en contact avec le solvant : les particules restent en suspension grâce au mouvement brownien. L'acide oléique est toujours utilisé lorsque le solvant n'est pas polaire. Dans le cas contraire, on doit privilégier, par exemple, une solution d'acide nitrique pour charger électriquement les particules, de façon à ce qu'elles se repoussent.

En l'absence de champ magnétique, l'aimantation de chaque nanoparticule est orientée au hasard, ce qui conduit à une aimantation globale nulle. En revanche, en présence d'un champ magnétique extérieur,

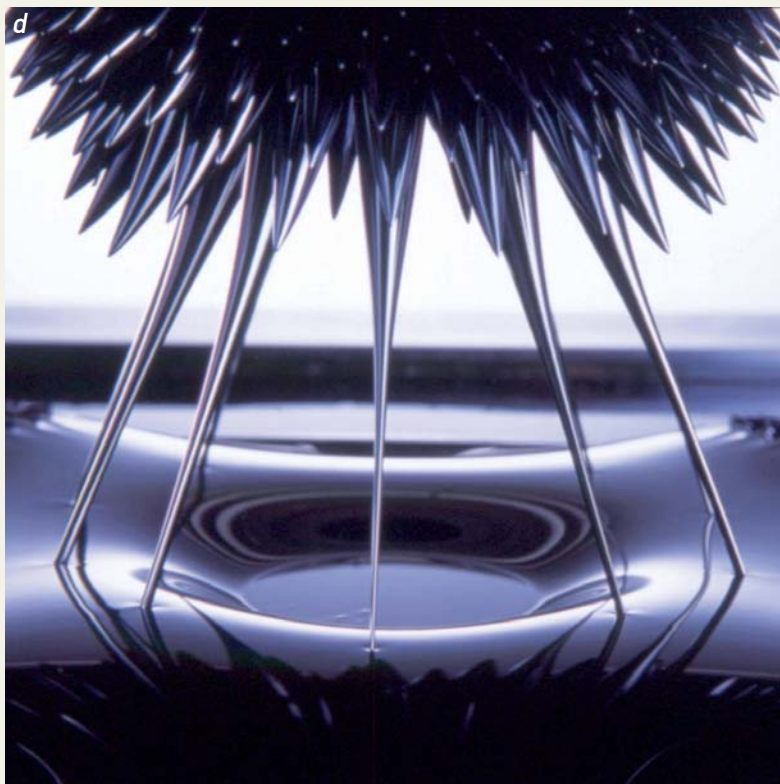
l'aimantation des nanoparticules s'oriente, en moyenne, dans le sens du champ, bien que l'aimantation de chaque particule puisse basculer aléatoirement sous l'effet de l'agitation thermique.

Les pics observés apparaissent spontanément quand le champ magnétique, fourni par des électro-aimants, est suffisamment intense pour vaincre la tension de surface du liquide et la gravité. Ces pointes suivent les lignes du champ appliqué et leur forme, notamment la hauteur, dépend des paramètres du champ.

Dans *Protrude, Flow*, la première œuvre de S. Kodama (2001) fondée sur les ferrofluides, six électro-aimants étaient installés autour du récipient contenant le ferrofluide, mais l'encombrement réduisait la visibilité. Aussi, pour pallier cet inconvénient, dans *Morpho Tower* (2006), un électro-aimant unique est façonné en une sorte de tour conique spiralée autour de laquelle s'enroule puis se hérissent le ferrofluide à mesure que le champ magnétique s'intensifie.

Dans certaines de ses œuvres, l'artiste a ajouté un dispositif qui modifie le champ magnétique selon l'environnement, tels les sons, de façon à obtenir des sculptures mouvantes et dynamiques. ■

S. Kodama, *Dynamic ferrofluid sculpture : Organic shape-changing art forms*, *Commun. of the ACM*, vol. 51(6), pp. 79-81, 2008. Une vidéo de *Protrude, Flow* : <http://bit.ly/1xayZJN>



© S. Kodama

IDÉES DE PHYSIQUE

Du soleil pour chauffer... et refroidir

En jouant sur les différences de densité entre les régions chaudes et froides, on peut créer une circulation au sein d'un fluide et un transfert de chaleur. Des chauffe-eaux et des climatiseurs solaires fonctionnent sur ce principe.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Comment disposer d'eau chaude dans son habitation tout en se passant d'électricité ? Chauffer l'eau avec des capteurs solaires n'est pas tout ; encore faut-il assurer la circulation de l'eau dans ces capteurs pour les alimenter en eau froide et acheminer l'eau chaude dans le réservoir qui la stockera jusqu'à son utilisation.

La solution ? Réaliser un thermosiphon, c'est-à-dire provoquer une circulation grâce à la différence de masse volumique entre l'eau chaude et l'eau froide, différence responsable de mouvements dits de convection. En adaptant ce principe à la circulation de l'air, il est aussi possible d'utiliser la chaleur du soleil pour, paradoxalement, rafraîchir une maison en plein été.

La convection thermique en guise de moteur

Comment fonctionnent ces dispositifs, qui n'ont pas besoin de pompes ? Commençons par le phénomène de convection. Lorsqu'on place une casserole d'eau sur un feu ou une plaque chauffante, on peut voir que l'eau se met en mouvement bien avant que l'ébullition ne débute (voir la figure 1). Cette convection a pour origine les écarts de température au sein du liquide, qui créent des différences de masse volumique.

La masse d'un litre d'eau est de un kilogramme à 4°C sous pression atmosphérique. Mais ce n'est pas le cas à d'autres

températures. Plus la température est élevée, plus les molécules d'eau s'agitent et brisent les liaisons intermoléculaires qui confèrent au liquide sa cohésion, de sorte que l'eau se dilate : la masse d'eau contenue dans un litre diminue. À 20°C, cette diminution est minime – un peu moins de deux grammes. Mais à 50°C, la différence atteint déjà 12 grammes, et à 100°C elle est de 42 grammes. Un litre d'eau fait alors 958 grammes, et la différence est notable.

Pour en revenir à la casserole chauffée, l'eau au-dessus du feu s'échauffe plus vite que l'eau située à la périphérie du récipient. La colonne d'eau au centre est donc moins

dense et exerce au fond de la casserole une pression inférieure à celle de la colonne d'eau périphérique.

Cette différence de pression amorce un mouvement d'ensemble du fluide qui facilite le transfert thermique : au centre, remontée de l'eau chaude et moins dense vers la surface, refroidissement au contact de l'air ambiant, descente de l'eau refroidie et plus dense à la périphérie, réchauffement au fond, et ainsi de suite. On retrouve l'analogie de ce phénomène à l'échelle des océans de notre planète (la circulation thermohaline), mais en beaucoup plus complexe, car la salinité modifie aussi la masse volumique de l'eau de mer.

Comment mettre la convection à profit pour faire circuler sans pompe de l'eau dans un chauffe-eau solaire ? En reproduisant le même phénomène au sein des canalisations du chauffe-eau (voir la figure 2).

Une partie de ce circuit est composée des capteurs solaires et contient de l'eau chaude. C'est un ensemble de tuyaux peints en noir, placés dans une boîte plate au fond noir et au couvercle de verre, afin d'absorber toute la lumière du soleil et d'optimiser le rendement thermique.

Dans une seconde partie se trouve l'eau non encore chauffée, destinée à aller vers les capteurs. Étant donné l'écart de température entre les deux parties, une circulation naturelle peut s'établir. Il existe cependant une différence notable par rapport à la casserole. Dans cet ustensile de



1. DANS UNE CASSEROLE placée sur le feu, l'eau au centre s'échauffe plus vite que celle située en périphérie. Moins dense, elle finit par s'élever, se refroidit au contact de l'air et, devenue plus dense, replonge un peu plus loin. Des rouleaux de convection naissent ainsi.

cuisine, l'écoulement est libre et se déroule à petite échelle (quelques centimètres). Dans un chauffe-eau, en revanche, la différence de pression due aux différences de densité entre l'eau chaude et l'eau froide doit compenser la perte de charge (diminution de la pression le long de l'écoulement) qui résulte de la résistance d'un fluide visqueux à l'écoulement dans de longs tuyaux.

Compenser la perte de charge

Lorsque l'écoulement n'est pas turbulent, cette perte de charge obéit à la loi dite de Poiseuille : elle varie comme le produit du débit par la longueur du tuyau et la puissance quatrième de son diamètre.

Pour s'assurer de la faisabilité du dispositif, comparons la différence de pression entre le bas d'une colonne d'eau à 20 °C et le bas d'une colonne identique d'eau à 50 °C (température aisément atteinte dans un chauffe-eau solaire à usage domestique). La différence de masse volumique entre ces deux températures étant d'une dizaine de grammes par litre, la différence de pression hydrostatique vaut environ 100 pascals (un millième d'atmosphère) pour une colonne haute de un mètre.

Pour calculer la perte de charge, il faut estimer le débit de l'installation. Atteindre 50 °C dans le ballon d'eau chaude nécessite une hausse de 30 °C par rapport à la température ambiante. Comme il faut 4 kilojoules pour élever de un degré la température d'un litre d'eau, il faudra, avec un capteur solaire de deux mètres carrés, environ une minute pour chauffer convenablement un litre d'eau si l'on suppose que toute la puissance lumineuse (de l'ordre de un kilowatt par mètre carré) est convertie en chaleur. Avec un débit de un litre par minute dans des tuyaux de diamètre intérieur de l'ordre du centimètre, on trouve une perte de charge d'environ 70 pascals par mètre de tuyau.

Or, comme on l'a vu, la différence de pression hydrostatique entre eau chaude et eau froide est d'environ 100 pascals par mètre vertical. Cela signifie que, en ordre de grandeur et à condition d'utiliser des tuyaux pas trop étroits, la convection

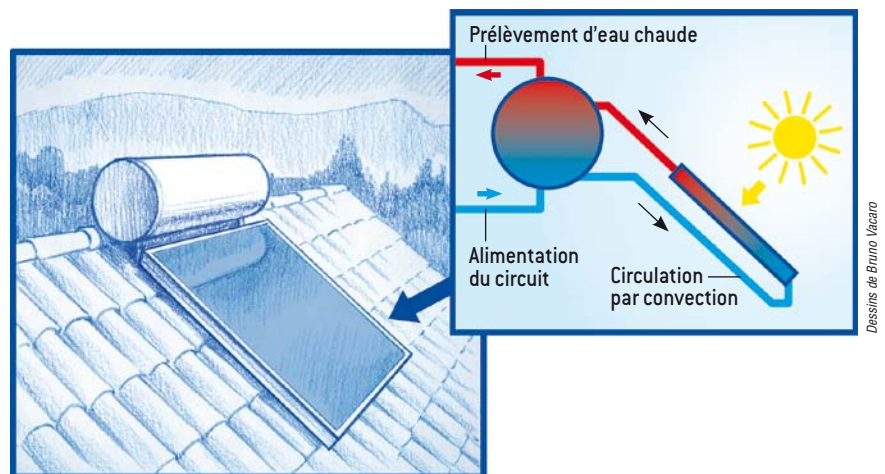
thermique peut faire circuler l'eau dans un tel système. Cela montre aussi que la mise au point et le dimensionnement d'un dispositif efficace exigent un réel savoir-faire, car la marge de manœuvre est faible.

Il y a tout de même un prix à payer. Comme l'eau chaude s'élève, il faut placer le réservoir au-dessus des capteurs solaires, et non au-dessous comme on aurait envie de le faire lorsque les capteurs sont sur le toit d'une maison. Les chauffe-eaux solaires à thermosiphon se reconnaissent ainsi à leur réservoir installé

LES AUTEURS

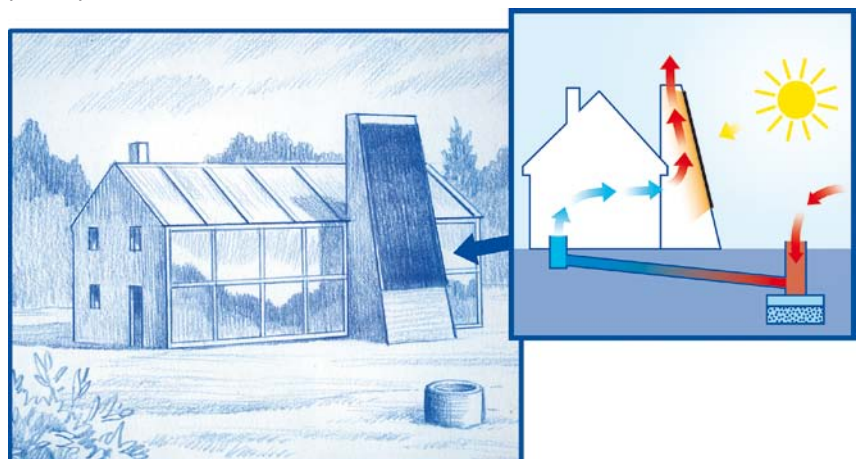


Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>



Dessins de Bruno Vacaro

2. DANS UN CHAUFFE-EAU SOLAIRE, l'eau froide (*en bleu*) est chauffée à l'intérieur d'un panneau qui absorbe le rayonnement du Soleil. Devenue plus chaude donc moins dense (*en rouge*), elle tend à s'élever et crée une circulation qui l'amène au réservoir, surélevé par rapport au panneau.



3. L'EFFET DE THERMOSIPHON peut être utilisé pour rafraîchir une maison. L'air contenu dans la cheminée est chauffé par la façade absorbante, et la différence de température entre cet air et celui qui a été refroidi sous terre crée une circulation. De l'air frais pénètre ainsi dans les pièces à vivre de la maison, tandis que l'air chaud est évacué.

BIBLIOGRAPHIE

S. A. Kalogirou, *Solar thermal collectors and applications*, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 30(3), pp. 231-295, 2004.

près du faite de la toiture. Ce n'est pas toujours esthétique, mais ces dispositifs ont l'avantage de fonctionner sans coupure de courant et leur entretien est minime : il n'y a pas de pompes, ni d'appareils pour les contrôler !

Une cheminée... rafraîchissante !

Le principe du thermosiphon permet aussi de se passer d'une climatisation électrique et de rafraîchir l'intérieur d'une maison (voir la figure 3). Dans ce cas, ce sont les différences de masse volumique entre air chaud et air froid que l'on met à profit. Si la masse volumique de l'air est un millier de fois inférieure à celle de l'eau, l'effet de l'échauffement est bien plus important : une hausse de 30°C diminue de dix pour cent

la masse volumique de l'air, et non pas de un pour cent comme dans le cas de l'eau.

Pour bénéficier de cette différence de masse volumique, on peut construire une cheminée dont la façade exposée au soleil est peinte en noir, de façon à chauffer l'air qu'elle contient sur une hauteur de plusieurs mètres. Si l'air s'échauffe de 60°C sur une hauteur de cinq mètres, la différence de pression hydrostatique est de l'ordre de dix pascals. C'est peu : environ un dixième de la dépression caractéristique associée à une ventilation mécanique qui crée une circulation rapide de l'air dans les conduits d'aération. Mais, en faisant circuler l'air en sous-sol pour refroidir préalablement l'air ambiant, en utilisant des conduits de gros diamètre ou les grands volumes d'une maison, cela peut suffire, à condition d'éviter toute perte ou tout effet parasite. ■



Retrouvez la rubrique
Idées de physique sur
www.pourlascience.fr

LUMIÈRE SUR LES SCIENCES

62^E CONGRÈS NATIONAL DES PROFESSEURS DE PHYSIQUE & CHIMIE
26 ~ 29 OCT. 2014 / LYON

Informations & renseignements : www.udppc.asso.fr/lyon2014

udppc

Conception et Création graphique : Alice Lavail, Mélissa Jiguet et Marie-Lou Garcia



SciLogs

La nouvelle communauté de
blogueurs scientifiques francophones

De blogs en blogs,
explorez la science en direct
avec ceux qui la font,
commentez les articles
et participez au débat !

Complexités

Vos raisonnements et conceptions seront remis en question par [Jean-Paul Delahaye](#), auteur de la rubrique Logique et Calcul dans *Pour la Science*. Dans son blog, il présente des jeux et énigmes mathématiques, des paradoxes logiques et numériques et des nouveautés en informatique.



Signal sur bruit

Découvrez les réflexions de l'astrophysicien [Richard Taillet](#). Matière noire, énergie sombre et autres découvertes en physique et astrophysique... votre soif de connaissance sera assouvie !

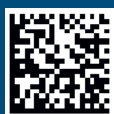


Best of Bestioles

Explorez chaque semaine les merveilles du monde animal, dans le blog de [Loïc Mangin](#), rédacteur en chef adjoint de la revue *Pour la Science*. Insectes, mammifères, crustacés, amphibiens et bien d'autres n'auront bientôt plus de secrets pour vous !



Retrouvez aussi les autres communautés « SciLogs » :
déjà plus de 140 blogueurs scientifiques à l'international !



Connectez-vous
maintenant
pour découvrir
www.SciLogs.fr !



Suivez les dernières actualités
des blogueurs également
sur les réseaux sociaux

Proposé par **POUR LA SCIENCE**

QUESTION AUX EXPERTS

Combien y a-t-il de planètes dans la Voie lactée ?

Notre galaxie compterait au moins 100 milliards d'exoplanètes, selon les estimations statistiques !

Arnaud CASSAN



Notre galaxie regroupe quelque 150 à 200 milliards d'étoiles, qui dessinent dans le ciel une bande diffuse laiteuse – d'où son nom de Voie lactée. Combien d'entre elles abritent des planètes ? Au cours des deux dernières décennies, les astronomes ont détecté assez de ces dernières pour réaliser de premières estimations.

Fin mai 2014, on avait confirmé la détection d'environ 1 800 exoplanètes (planètes en orbite autour d'autres étoiles que le Soleil). Elle sont réparties dans près de 1 100 systèmes planétaires, qui sont loin de ressembler au nôtre. Nombre d'entre eux comprennent par exemple des « jupiters chauds », planètes géantes si proches de leur étoile que l'année (la période de révolution autour de l'étoile) n'y dure que quelques heures ou quelques jours. Dès lors, le Système solaire ne peut servir de référence pour l'estimation de l'abondance des planètes.

L'une des difficultés d'une telle estimation est que chaque technique d'observation a un domaine de sensibilité limité. Ainsi, une planète n'est repérable par la méthode des transits (où l'on détecte son passage devant l'étoile) que si elle est assez proche de son étoile. Les diverses techniques disponibles ont des domaines de sensibilité complémentaires, mais des zones d'ombre demeurent. En outre, en dehors des cas où deux méthodes sont requises pour confirmer une détection, une même étoile n'est souvent scrutée qu'avec l'une d'elles. On ne détecte donc jamais toutes les planètes d'un système donné.

Seules des méthodes statistiques permettent alors d'estimer l'abondance des exoplanètes. La première étape consiste à choisir un échantillon représentatif d'étoiles et à extrapoler les détections réalisées, un peu comme on estime le résultat d'une élection à partir d'un sondage. Chaque analyse est effectuée pour une méthode de détection donnée et ne concerne donc que les gammes de distances orbitales et de masses stellaires et planétaires auxquelles cette méthode est sensible. On déduit ensuite le nombre de planètes par un traitement statistique du nombre global de détections et d'absences de détection, en prenant en compte la sensibilité de la méthode. Ces études nécessitent d'importantes bases de données, dont la construction prend souvent plusieurs années.

Premières statistiques

On commence à obtenir des résultats. Une étude publiée en 2011 par l'équipe de l'astronome suisse Michel Mayor indique qu'au moins une étoile de type solaire sur deux abrite une planète – la Galaxie comptant plusieurs dizaines de milliards de ces étoiles. En 2012, j'ai trouvé avec mes collègues une valeur moyenne d'environ une planète par étoile dans la Voie lactée (notre étude couvrirait un plus grand intervalle de masses et de distances orbitales que celle de M. Mayor). Au total, en tenant compte des marges d'erreur, l'ordre de grandeur serait donc d'au moins 100 milliards d'exoplanètes.

De quel type sont ces planètes ? Selon nos travaux, deux tiers des étoiles ont une

super-Terre (planète rocheuse de masse comprise entre deux et dix fois celle de la Terre), la moitié ont une planète de la masse de Neptune et un sixième une planète du type de Jupiter. De façon générale, toutes les études indiquent que les planètes sont d'autant plus abondantes que leur masse est faible. En 2012, Xavier Bonfils, de l'Observatoire des sciences de l'Univers de Grenoble, et ses collègues ont estimé qu'au moins 64 milliards de super-Terres sont en orbite dans la zone habitable (la région où de l'eau peut exister à l'état liquide) d'étoiles de type naine rouge. Trop peu de planètes de la taille de la Terre ont été détectées pour qu'on estime leur nombre, mais elles pourraient aussi être très abondantes.

Tous ces chiffres sont des minimums, puisque chaque estimation ne concerne qu'un intervalle de masses et de distances orbitales donné. Qu'en est-il du maximum ? Les théories de formation planétaire indiquent qu'un système ne peut comprendre plus d'une dizaine de planètes. La Galaxie abriterait donc moins de 2 000 milliards d'exoplanètes !

La vie s'est-elle alors développée ailleurs que sur Terre ? La réponse est encore hors de portée. Mais avec la découverte récente que la présence de planètes autour d'une étoile est la règle plutôt que l'exception, les chances que certains de ces mondes lointains soient habitables, voire habités, ne semblent pas nulles...

Arnaud CASSAN est chercheur à l'Institut d'astrophysique de Paris.

SCIENCE & GASTRONOMIE

La cuisson des pâtés lorrains

Cette cuisson doit être assez longue pour que la viande se contracte et libère des composés dont s'enrichira le goût de la pâte.

Hervé THIS



Les pâtés lorrains sont des préparations faites de viande de veau et de porc marinées au vin blanc, puis cuites dans une pâte (sans oublier persil, échalote, sel, poivre, noix muscade, œuf battu pour dorer la pâte...). Tous les ans, se tient un concours mondial du pâté lorrain, et les meilleurs produits ont un goût très particulier. Comment l'obtient-on ? Il y a dix ans, pour explorer cette question, nous avons produit une série de pâtés lorrains tous identiques qui ont été cuits ensemble, dans le même four, pendant des temps différents. Le goût délicieux survenait après environ une heure de cuisson.

Pourquoi ? La question est restée lancinante, jusqu'au dernier Concours général agricole, où les terrines (un système analogue, mais sans pâte) ne méritaient pas de médaille. Pourquoi ? Parce que cette méléée de viande et d'épices exige une cuisson attentive. Selon une « précision culinaire » des milieux professionnels, les terrines perdent leur goût après une heure et quart de cuisson. Vrai ? Faux ?

Lors d'un récent séminaire, nous avons testé cette idée en cuisant des terrines identiques dans un même four, à la température bien réglée. Pour nous assurer de la constance des températures dans un four où, malgré la ventilation, des zones de différentes températures sont produites, nous avons repris la pratique professionnelle, qui consiste à appliquer une température de consigne de 180 °C, mais en plaçant les terrines dans un bain-marie.

Première observation : les recettes, qui indiquent une durée de cuisson et une température à cœur du produit, ne donnent pas des indications fiables, car la taille des terrines n'est pas toujours prise en compte. Ainsi, dans nos terrines cuites le moins de temps, la température à cœur est restée inférieure à la température de cuisson des protéines de la viande les plus facilement coagulables ; autrement dit, les terrines n'étaient pas cuites.

Nous avons enregistré les températures à cœur de toutes les terrines : dans la croûte, au centre, au fond. Évidemment, la partie supérieure de la croûte est à 180 °C, l'eau de la viande hachée étant évaporée. Cette température diminue progressivement à mesure que l'on s'approche de la partie inférieure de la croûte, où la température ne dépasse pas 100 °C. C'est au cœur des terrines que la température est la plus basse.

Finalement, les terrines cuites plus d'une heure et quart étaient de faible goût. Cependant, la matière grasse qui avait suinté de la préparation était... salée ! Salée alors que le sel ne se dissout pas dans l'huile ? Il fallait que le sel soit présent sous la forme de cristaux, ou bien dissous dans de petites gouttes de solution aqueuse dispersées dans l'huile.

À la réflexion, cette observation est probablement la clef du mystère du pâté lorrain. Dans les deux cas, il y a de la viande que l'on cuit. Or on sait que le tissu animal chauffé se contracte, en raison notamment de la dénaturation du collagène, la protéine

formant le tissu qui limite les fibres musculaires et les réunit en faisceaux. C'est pour éviter cette contraction que l'on entaille les poissons avant de les griller, et que les cuisiniers préfèrent cuire les viandes sur leur os : l'adhérence du tissu musculaire à l'os évite la rétraction des chairs.

Pourquoi cette rétraction est-elle nuisible ? Passeulement pour des raisons esthétiques, mais aussi parce que la viande qui se contracte expulse son jus. D'où le résidu brun, dans la cocotte, quand on cuit un rôti de bœuf, par exemple. Plus la température est augmentée, même avant la température d'ébullition de l'eau, même dans l'eau d'un bouillon, plus la viande perd de sa masse.

D'où, dans les terrines, la matière grasse qui entourait la chair coagulée ; d'où la perte de goût et du sel. Ce qui est nuisible dans une terrine, en raison des pertes, est bénéfique pour les pâtés lorrains, dont la pâte boit les produits expulsés par la coagulation. Et c'est pourquoi il faut un long temps de cuisson pour faire de bons pâtés lorrains. ■



Hervé THIS est physico-chimiste dans le Groupe INRA-AgroParisTech de gastronomie moléculaire et directeur scientifique de la Fondation Science & culture alimentaire (Académie des sciences).



Retrouvez la rubrique Science & gastronomie sur www.pourlascience.fr