

QUESTION AUX EXPERTS

Saurons-nous bientôt exploiter la fusion nucléaire ?

Il est relativement facile de faire fusionner des noyaux atomiques, mais pas avec un solde énergétique positif. On s'en rapproche cependant.

Christine LABAUNE

Il y a quelques mois, plusieurs journaux rapportaient l'histoire d'un jeune Britannique de 13 ans qui aurait réalisé une expérience de fusion nucléaire. De façon générale, une telle expérience est assez simple : il suffit par exemple de projeter des ions légers sur une cible, après les avoir accélérés dans un champ électrique. Est-ce à dire que nous sommes près de savoir exploiter la fusion, qui fournit l'énergie des étoiles ?

Non, car les expériences de ce type ne créent que quelques réactions de fusion nucléaire et consomment bien plus d'énergie qu'elles n'en produisent. Pour parvenir à un solde énergétique positif, il faut considérablement augmenter la densité et la température du « combustible » utilisé, afin que la fusion puisse s'y développer.

Lors d'une réaction de fusion, deux noyaux atomiques légers s'associent pour produire un noyau plus lourd, ce qui libère de l'énergie. À quantité de matière équivalente, la fusion dégage environ deux millions de fois plus d'énergie qu'une réaction chimique telle que la combustion de pétrole. On cherche à exploiter la fusion nucléaire depuis plus de 60 ans, ce qui fournirait une énergie illimitée à partir de combustibles abondants et répartis sur toute la planète, sans risque d'explosion et presque sans déchets. Moins d'un gramme de combustible par an suffirait à satisfaire les besoins énergétiques d'une personne !

Les deux principales voies étudiées sont le confinement magnétique et le confinement inertiel. Dans la première, on chauffe un plasma

(gaz ionisé) à l'aide de faisceaux de micro-ondes et de particules, et on le confine avec un champ magnétique ; dans la seconde, on obtient le plasma en chauffant et en comprimant une capsule de diverses façons (souvent par un laser) dans une chambre de réaction.

En confinement magnétique, les principaux espoirs reposent sur ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), qui sera l'installation expérimentale de fusion la plus puissante jamais construite. Les premiers tests sont prévus pour 2022 et les premières réactions de fusion à partir de 2027.

Une étape importante

En confinement inertiel, deux très grandes installations laser ont été construites, le Laser Mégajoule (LMJ) en France et le *National Ignition Facility* (NIF) en Californie. Grâce à ce dernier, une étape importante a été franchie début 2014 : on s'est approché d'un solde énergétique positif, en obtenant de façon contrôlée un nombre record de réactions de fusion et un chauffage additionnel du cœur par les particules alpha (He^{2+}) produites dans ces réactions.

Le combustible choisi pour ces premières générations de machines est un mélange de deutérium et de tritium, deux isotopes de l'hydrogène. Leur fusion produit des particules alpha et des neutrons de haute énergie. La principale difficulté concerne les interactions de ces neutrons avec la matière environnante, potentiellement destructrices et encore mal

connues. Des études sont nécessaires pour fabriquer les matériaux capables d'arrêter ces neutrons et ainsi de récupérer leur énergie. C'est l'objet du projet IFMIF (*International Fusion Material Irradiation Facility*), au Japon.

D'autres réactions de fusion, telle celle d'un proton et d'un noyau de bore, produisent peu ou pas de neutrons. Mais leur exploitation nécessitera de nouveaux procédés. Le développement rapide des lasers, dont la puissance a été multipliée par 1 000 en dix ans, pourrait y contribuer. Lors d'expériences récentes, réalisées notamment à l'École polytechnique de 2011 à 2014, nous avons ainsi fait fusionner des protons et des noyaux de bore en accélérant un faisceau de protons avec de brèves impulsions laser et en le projetant sur une cible de bore.

D'ici quelques décennies, nous devrions pouvoir exploiter la fusion. Le délai dépendra des moyens mobilisés, qui ne sont aujourd'hui pas à la hauteur des enjeux (du moins pour la voie du confinement inertiel, où les grands lasers sont mobilisés pour des applications militaires liées aux bombes atomiques à fusion). En attendant, les recherches sur la fusion ont de nombreuses retombées scientifiques et technologiques. Elles pourraient bientôt avoir des applications pour le grand public, par exemple via le développement de techniques de production d'isotopes pour l'imagerie médicale. ■

Christine LABAUNE est directrice de recherche au CNRS et à l'École polytechnique, à Palaiseau.



© Shutterstock.com/pixelparticle

SCIENCE & GASTRONOMIE

Gels de matières grasses

On peut former des gels avec des matières grasses. Les températures de fusion de leurs divers composés déterminent la consistance du produit.

Hervé THIS



En 1995, le « chocolat chantilly » fut introduit comme une généralisation de la crème chantilly. Cette dernière est obtenue par foisonnement (introduction de bulles de gaz) d'une émulsion – la crème – qui est refroidie, de sorte que la solidification de la matière grasse laitière présente dans la crème conduit au piégeage du gaz. On obtient ainsi une mousse « de » chocolat, plutôt qu'au chocolat. Avec la même idée, nous introduisons le beurre chantilly, le fromage chantilly, le foie gras chantilly...

Dans tous les cas, on part d'une solution aqueuse (de l'eau, du thé, du bouillon, du jus de fruit...) où l'on émulsionne une matière grasse en chauffant, afin que la matière grasse fonde et forme des gouttelettes dans la solution ; puis on fouette en refroidissant.

L'« huile d'olive chantilly » est un système plus difficile à obtenir, car l'huile est une matière grasse au comportement de solidification (ou de fusion) différent. Pourquoi ?

Les matières grasses alimentaires les plus courantes sont des mélanges de triglycérides, composés dont les molécules ont un résidu de glycérol (un squelette fait de trois atomes de carbone) auquel sont liés trois résidus d'acides gras. Les cristaux d'un triglycéride particulier fondent à une température précise, mais les mélanges de triglycérides sont la somme de millions de composés différents, qui ont tous des températures de fusion différentes : la matière grasse du lait, par exemple, renferme 400 sortes d'acides

gras, qui peuvent chacun occuper une des trois positions des triglycérides. De ce fait, au lieu de fondre à une température précise, les matières grasses commencent à fondre à la température de fusion de leur triglycéride le plus fusible, et finissent de fondre à la température de fusion du triglycéride le moins fusible : entre ces deux températures, la proportion de solide dans la masse diminue progressivement de 100 pour cent à 0 pour cent, au lieu de varier brusquement comme pour la glace qui fond.

Revenons à l'huile d'olive chantilly. Puisque son obtention demande la solidification d'une partie des triglycérides, on se placera simplement à des températures assez basses pour qu'une proportion suffisante des triglycérides cristallise, les cristaux formant un réseau continu où le reste de la matière grasse (restée liquide) et les bulles de gaz seront dispersés.

Dans d'autres circonstances, des graisses à bas point de fusion sont préférables en cuisine. C'est le cas pour la réalisation d'un gel d'huile ou « graham » (nom donné en l'honneur de Thomas Graham, un pionnier des gels). Le système est une généralisation des gels complexes précédents, mais où un réseau protéique contient la matière grasse.

Concrètement, partons d'un blanc d'œuf, et ajoutons de l'huile en fouettant : on obtient progressivement l'homologue d'une sauce mayonnaise, à savoir une dispersion de gouttes d'huile dans l'eau du blanc d'œuf, les protéines venant tapisser la surface des gouttes d'huile. Puis, si l'on

« cuit » cette émulsion (quelques dizaines de secondes au four à micro-ondes), on obtient une émulsion piégée dans un gel, les protéines coagulant en un réseau continu ; c'est ce qui a été nommé un « gibbs », en l'honneur du thermodynamicien américain Josiah Willard Gibbs. Pour un graham, il suffit de mettre le gibbs à l'étuve afin d'évaporer l'eau et obtenir de l'huile solidifiée, les triglycérides restant piégés dans le réseau de protéines.

En cuisine, l'huile neutre a peu d'intérêt, mais on peut utiliser une très bonne huile d'olive, ou une huile où l'on aura dissous un peu de cis 1-hexén-3-ol, qui donne un merveilleux goût d'huile d'olive vierge première pression.

Pour les grahams, on peut évidemment généraliser et remplacer l'huile par du beurre fondu, du chocolat fondu, du foie gras fondu, du fromage fondu... mais attention à la température de consommation : puisqu'elle détermine la proportion de triglycérides à l'état liquide et à l'état solide, elle détermine aussi la consistance des produits que vous aurez concoctés. ■



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

BOTANIQUE

Dans la peau d'une plante

Catherine Lenne

Belin, 2014
(255 pages, 23 euros).

Les écoliers, les étudiants, apprennent aujourd'hui l'écologie, mais savent-ils distinguer un lamier blanc d'une ortie? La botanique, la vraie, celle qui expose la vie intime des plantes, leur diversité, leurs spécificités, leur organisation, n'est plus enseignée. La notion de biotope tend à ne devenir qu'un concept creux dans la mesure où la distinction des espèces et celle des stades du développement des plantes ne sont plus maîtrisées. Il est réconfortant d'ouvrir ce nouvel ouvrage de botanique.

L'humour des titres de chapitres interpelle le lecteur. Catherine Lenne joue ici un double jeu: cette présentation légère, ses phrases lapidaires, ses comparaisons provocatrices pourraient désorienter. En réalité, le texte dévoile la morphologie, la croissance, le développement des plantes; l'étrangeté de leur nutrition, de leur sexualité, est clairement montrée; nombre d'adaptations remarquables sont décrites, telles que les interrelations obligées avec d'autres règnes, insectes ou champignons par exemple. Les légendes des nombreuses illustrations, bien documentées, donnent chaque fois le nom vulgaire de l'espèce concernée, qui est toujours accompagné du nom scientifique latin (binôme genre-espèce et famille). *Dans la peau d'une plante* se révèle donc un authentique ouvrage de botanique!

Page après page, la vie du végétal se révèle, les structures sont décrites et leur fonctionnement est explicité; la morphologie est présentée dans la perspective du renouvellement des organes, de la survie de l'individu d'une part, de

l'espèce d'autre part. À la lecture apparaissent toutefois quelques simplifications et interprétations qui ne sont pas attestées.

Cet ouvrage, d'accès aisé et ludique, s'adresse entre autres à des lecteurs qui n'ont pas reçu de formation spécifique: ils y trouveront des données biologiques précises et découvriront la richesse, la complexité de la vie végétale



et son importance fondamentale comme acteur de la biosphère – en particulier son rôle irremplaçable dans le maintien de la vie animale.

Une large part est accordée aux plantes alimentaires: le quotidien s'immisce dans la botanique; si comprendre l'organisation d'une pomme, c'est faire de la botanique, alors la botanique est désacralisée! *Dans la peau d'une plante* est un bon ouvrage de vulgarisation, une initiation aux secrets des végétaux et une promenade pittoresque dans le monde vivant dont nous faisons partie. L'auteur a choisi de démythifier la botanique, trop souvent considérée comme l'apanage de sévères savants passésistes: dans ce livre, la botanique perd de son mystère; il ouvre les portes du «gay savoir», cher à Rabelais, ce savoir que l'évolution actuelle de l'écologie de la planète rend de plus en plus nécessaire.

Aline Raynal-Roques
MNHN, Paris

PHILOSOPHIE

Les rêves cybernétiques de Norbert Wiener

Pierre Cassou-Noguès

Le Seuil, 2014
(288 pages, 22 euros).

Mathématicien et philosophe de formation, l'auteur construit au fil de son travail une vision originale de ce moment clé de la pensée moderne qu'est l'apparition du concept de machine comme outil d'investigation philosophique privilégié de la réalité externe, mais aussi interne, au sujet de la connaissance.

On pourrait croire ce moment clé déjà amplement décrit, à la fois d'un point de vue historique, épistémologique et philosophique, depuis qu'au XVII^e siècle la distinction cartésienne de l'âme – immatérielle – et du corps – réductible à une machine – a fait surgir le problème de leur articulation au sein du sujet humain. Et pourtant, le mouvement même de la pensée moderne, des automates de Vaucanson à la machine analytique de Babbage, a été de revenir encore et toujours à la distinction en question et de tenter d'en bouleverser la portée en réduisant toujours un peu plus ce qui ressort de l'immatérialité de l'âme. En témoigne l'étape cybernétique, fondée par le mathématicien américain Norbert Wiener (1894-1964).

Par «cybernétique», Wiener entend ce point de vue particulier qui rend comparables les comportements externes de l'homme, de l'animal et de la machine. Un tel point de vue repose sur une découverte d'ingénierie due à Wiener: la boucle de rétroaction. Celle-ci permet, dans l'interaction, de suivre et d'anticiper la direction possible d'un mouvement, c'est-à-dire, d'une part, de conser-

ver dans un monde aléatoire un point de vue déterministe sur tout comportement et, d'autre part, de permettre un apprentissage par renforcement du comportement déterministe en question (signalons à cet égard la parution récente au Seuil d'un autre livre constitué des traductions des textes de Wiener, *La cybernétique; information et régulation dans le vivant et la machine*, où l'on trouvera pages 211-213 une description et des exemples de boucles de rétroaction).

Pour réintégrer dans le mouvement général de la culture la notion de machine devenue aujourd'hui si abstraite qu'elle est presque systématiquement identifiable à un ordinateur, l'auteur use d'une méthode originale: il ne décrit pas mathématiquement les concepts de la cybernétique, mais les replonge dans le cadre plus large de l'imaginaire du savant qui fut aussi l'auteur de textes de fiction. On comprend alors que la cybernétique, loin d'être un simple cadre théorique rendu possible par les progrès internes au paradigme mécaniste, avait aussi une ambition éthique: celle de s'interroger sur le rôle d'une science capable du meilleur et du pire, comme l'utilisation d'armes de destruction massive sur les

