

 ART & SCIENCE

William Kentridge et la négation du temps

Un artiste et un scientifique s'associent pour se confronter à la synchronisation, à la simultanéité et à la disparition du temps dans un trou noir.

Leurs réflexions sont illustrées par divers moyens d'expression.

Loïc MANGIN

Le 9 juin 2012 débutera la XIII^e édition de la *documenta*, une importante exposition d'art qui se tient tous les cinq ans, à Cassel, en Allemagne, et dure 100 jours. En 2012, on commémorera également le centenaire de la mort du mathématicien français Henri Poincaré (1854-1912). Quel est le lien entre ces deux événements ? Le temps. En effet, à la *documenta* sera présentée une installation nommée *La Négation du temps*, fruit de la collaboration entre l'artiste sud-africain William Kentridge et le physicien américain Peter Galison, de l'Université Harvard, aux États-Unis. Le résultat des premières réflexions, le « prologue », est présenté au Laboratoire, un espace dédié aux rencontres entre art et sciences, à Paris.

Les protagonistes se sont intéressés à la notion de temps. Comment le définir ? Comment le matérialiser ? Comment s'en affranchir ? Que signifie l'idée de simultanéité ? Pour explorer ces questions, différents moyens d'expression ont été sollicités : machines, dessin, peinture, musique, films, danse, chant... L'objectif n'est pas tant une illustration physique des concepts en jeu qu'une exploration des liens qu'entretiennent ces diverses disciplines artistiques face à ces questions sur le temps. Par exemple, avec le cinéma, on peut inverser le temps, on peut superposer plusieurs plans (acteurs, ombres de machines, notes scientifiques...). Les recherches s'articulent autour de trois axes : le temps de Newton, le temps de Einstein et ce qu'il advient du temps aux abords d'un trou noir.

Le temps de Newton, qui a cours jusqu'à la fin du XIX^e siècle, est absolu. Dès lors, comment s'assurer qu'il est identique pour

tous ? Le Bureau des longitudes, fondé par l'abbé Grégoire en 1795, est chargé de ce problème. À cette époque, la simultanéité est notamment incarnée par un réseau d'horloges reliées par des tuyaux où circule de l'air comprimé : une horloge dite mère transmet, via des pulsations pneumatiques, le temps à des horloges filles. Prêtés par le musée des Arts et Métiers, à Paris, deux exemplaires sont visibles à l'exposition (*voir la figure a*). Poincaré, membre du Bureau des longitudes, étudia la simultanéité et utilisait pour ce faire le télégraphe électrique.

Ce système rendit obsolète le télégraphe optique, une autre méthode de transmis-

Les trous noirs détruisent-ils irrémédiablement tout ce qui y tombe ?

sion d'informations, notamment sur le temps, également représentée. La méthode consiste en des dispositifs articulés (dont la position code le message à transmettre selon le principe du sémaphore), installés en hauteur. Le plus connu est le télégraphe de Chappe (*voir la figure b*), dont les tours éponymes étaient distantes d'environ 25 kilomètres. En 1794, un message fut transmis entre Paris et Lille en six heures. Son concurrent, le télégraphe Bétancourt-Breguet, est aussi présent grâce à une maquette.

Le deuxième axe de l'exposition correspond au temps relatif de Einstein : on dispose chacun de son propre temps, aucun n'est absolu. L'une des pistes suivies pour rendre

compte de ces résultats de la théorie de la relativité est celle de la musique. Ainsi, le compositeur sud-africain Philip Miller, qui s'inspire notamment de Berlioz, illustrera le paradoxe des jumeaux de Langevin, chacun vieillissant à un rythme différent selon sa vitesse : deux mélodies au départ confondues s'éloigneront peu à peu l'une de l'autre.

Les trous noirs, le troisième axe de l'exposition, constituent un site de conflit pour le temps. Il s'agit cette fois d'illustrer un débat qui agite la communauté des astrophysiciens : les trous noirs détruisent-ils irrémédiablement tout ce qui y tombe ? Selon certains – Stephen Hawking fut de ceux-là – c'est bien le cas : on ne peut récupérer aucune information d'un trou noir. D'autres, par exemple Leonard Susskind, à Stanford, pensent que l'information reste à l'horizon du trou noir, la frontière marquant le point de non-retour. En d'autres termes, le temps et l'espace ne seraient pas détruits. Les trous noirs sont évoqués par une procession de danseurs en ombre chinoise (*voir la figure c*) qui se dirige vers un tel corps dense, et par les cônes de dispositifs mécaniques (*voir la figure d*).

Le dialogue entre artistes et scientifiques se poursuit. L'instantané qui est ici proposé illustre sa fécondité. C'était déjà le cas à l'époque de Einstein : l'année où était publiée la théorie de la relativité correspond à celle de la naissance du cubisme qui, riche des travaux de Poincaré, se faisait fort de représenter la simultanéité ! ■

La négation du temps - Prologue, au Laboratoire (4, rue Bouloi, 75001 Paris) jusqu'au 26 juin 2011.



IDÉES DE PHYSIQUE

Des électrons en boîte pour donner des couleurs

On peut moduler la couleur de certaines substances en jouant sur la taille des structures qui confinent les électrons.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Les sensibilisateurs pour les sels d'argent que l'on utilisait dans les pellicules pour la photographie en couleurs appartiennent à la vaste famille de colorants de synthèse nommés cyanines. Qu'est-ce qui détermine la couleur de ces molécules organiques linéaires ? Leur simple longueur ! Comment cela se fait-il ? Comme on le verra, la réponse se trouve dans la physique quantique...

Si un objet nous apparaît coloré lorsqu'il est éclairé par de la lumière blanche, c'est qu'il absorbe une partie de cette lumière. La couleur résultante est alors la complémentaire de celle absorbée. Ainsi, les carottes sont orange parce que la molécule de carotène absorbe la lumière bleue, les feuilles vertes parce que la chlorophylle absorbe le rouge.

La couleur absorbée par ces molécules dépend de leurs niveaux d'énergie : l'absorption d'un grain de lumière, un photon, qui fait passer la molécule d'un état d'énergie à un autre, n'est possible que si la fréquence ν de la lumière (qui détermine sa couleur) est égale à la différence d'énergie ΔE entre les niveaux divisée par la constante de Planck (on a $h\nu = \Delta E$, où $h = 6,63 \times 10^{-34}$ joule-seconde).

En général, il n'est pas aisé de déterminer l'échelle des énergies moléculaires, qui fait intervenir le détail des structures atomiques et des liaisons chimiques. Le plus souvent, on ne sait donc pas prévoir sous quelles couleurs les molécules apparaîtront. Mais certaines ont une structure suffisamment simple pour que l'on puisse estimer les valeurs des niveaux d'énergie.

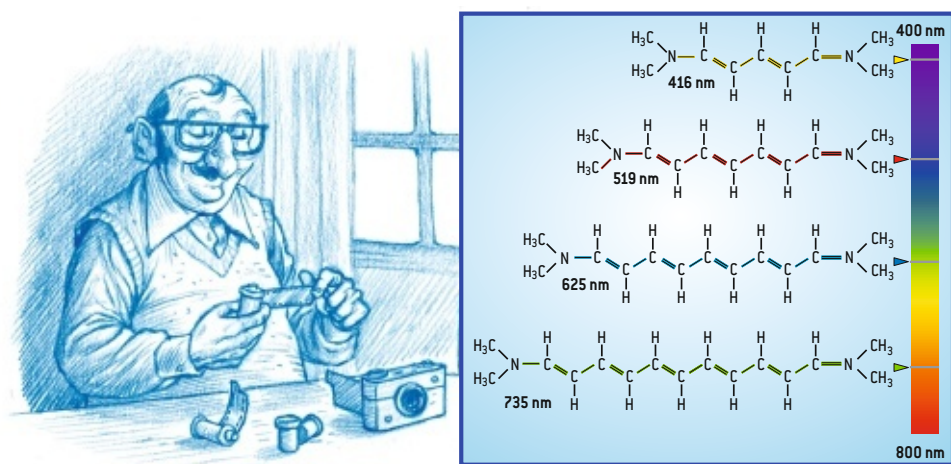
C'est le cas des cyanines, molécules organiques qui ont pour colonne vertébrale une chaîne linéaire d'atomes de carbone liés à des atomes d'hydrogène. Dans ces molécules, chaque électron qui participe à une liaison carbone-carbone n'est pas localisé entre les deux atomes de carbone, mais se répartit, en moyenne, tout le long de la chaîne.

Des ondes le long de la molécule

Autrement dit, la molécule se comporte vis-à-vis de ces électrons comme un segment de fil conducteur. La longueur d'une liaison carbone-carbone étant de l'ordre de 0,139 nanomètre dans ces molécules, une cyanine constituée de neuf atomes de carbone (soit dix liaisons, compte tenu des deux atomes d'azote terminaux) mesure 1,4 nanomètre de long.

Quelle est l'échelle des énergies de ces électrons qui sont délocalisés ? Elle dépend de la longueur L de la molécule et l'explication fait appel à la mécanique quantique. Depuis le début du XX^e siècle, on sait que tout corpuscule se comporte aussi comme une onde, dont la longueur d'onde est égale au quotient de la constante de Planck par la quantité de mouvement. On en déduit que l'énergie d'un électron, en l'occurrence son énergie cinétique, est inversement proportionnelle au carré de sa longueur d'onde.

Quelles sont les longueurs d'onde possibles dans un fil conducteur ? Pour répondre à la question, utilisons l'analogie avec une corde vibrante de longueur L , fixée à ses deux extrémités. Ces dernières devant être des nœuds de l'onde, les seuls



1. LES CYANINES sont des colorants organiques répandus. Par exemple, on les utilise dans les pellicules pour la photographie argentique en couleurs. La longueur d'une telle molécule détermine la longueur d'onde lumineuse qu'elle absorbe, c'est-à-dire la couleur absorbée (*bande grisée sur le spectre*). La couleur de la substance vue en lumière blanche sera donc complémentaire. Ainsi, celle qui absorbe dans le violet, à 416 nanomètres de longueur d'onde, apparaîtra jaune.

Dessins de Bruno Vacaro

modes de vibration possibles correspondent à des longueurs d'onde égales à $2L/n$, où n est un entier.

Un fil quantique moléculaire

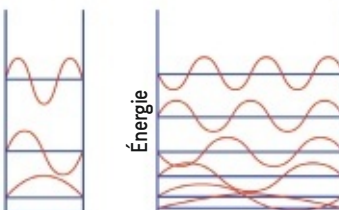
Ainsi, pour un fil conducteur, plus il est court, plus la longueur d'onde de l'électron est petite et plus son énergie est élevée : elle croît comme $1/L^2$. L'échelle est telle que le n -ième niveau électronique a une énergie proportionnelle à n^2 . Ainsi, dans la cyanine à neuf atomes de carbone, tous facteurs pris en compte, l'énergie du niveau électronique fondamental est de l'ordre de 0,195 électronvolt (soit $3,1 \times 10^{-20}$ joule), celle du deuxième niveau est égale à 0,78 électronvolt, celle du cinquième à 4,9 électronvolts, etc.

Une complication supplémentaire est due au principe d'exclusion de Pauli, qui interdit qu'un niveau soit occupé par plus de deux électrons. Il s'ensuit qu'avec N électrons, l'énergie la plus basse s'obtient quand les $N/2$ niveaux les plus bas sont remplis. Les niveaux supérieurs étant vides, l'absorption la moins exigeante en énergie correspond au saut d'un électron du niveau occupé le plus haut jusqu'au niveau libre le plus bas.

Pour la cyanine à neuf atomes de carbone et dix électrons mobiles, cela représente une transition du niveau $n = 5$ au niveau $n = 6$, séparés de 2,15 électronvolts, écart d'énergie qui correspond à une longueur d'onde de 575 nanomètres. Cette molécule absorbe ainsi dans le rouge, d'où une coloration bleue. Avec 11 atomes de carbone, l'absorption a lieu vers 700 nanomètres de longueur d'onde, dans le rouge profond, et la couleur est alors verte.

Jusqu'à il y a une dizaine d'années, seule la chimie nous donnait de tels exemples d'une couleur modulée par une dimension. Mais grâce à l'essor des nanotechnologies, on conçoit aujourd'hui des matériaux où les électrons sont confinés dans des structures tridimensionnelles. Les plus simples sont les nanosphères.

Dans ces édifices de taille nanométrique, les électrons mobiles sont confinés dans de petites billes de matériau conducteur.



2. DES NANOSPHERES de sélénure de cadmium de quelques nanomètres de diamètre sont utilisées comme marqueurs fluorescents, par exemple par les biologistes. Dans une telle sphère, l'onde (en rouge sur le schéma) associée à un électron mobile est contrainte, ce qui produit des niveaux d'énergie discrets. L'écart entre niveaux, qui détermine la couleur de fluorescence, dépend notamment de la taille de la nanosphère. Le choix de cette taille permet alors d'obtenir la couleur de fluorescence désirée.

Selon les mêmes principes que ceux à l'œuvre dans les molécules de cyanines, seule la taille des sphères détermine la couleur de ces objets : plus le rayon est petit, plus l'onde associée à l'électron a une longueur d'onde petite et plus l'énergie cinétique correspondante est élevée. Les différences d'énergie augmentent aussi ; dans le domaine visible, les couleurs passent ainsi du rouge au bleu.

Boîtes quantiques pour électrons

C'est notamment le cas des nanosphères de sélénure de cadmium (Cd Se). Ces particules sont utilisées comme marqueurs fluorescents : après absorption d'un photon, elles réémettent de la lumière d'une couleur bien définie. Des nanosphères de cinq nanomètres de diamètre ont ainsi une fluorescence de couleur bleue, tandis que celles mesurant 20 nanomètres sont rouges. En pratique, les nanosphères sont enrobées d'une coque isolante qui les protège de leur environnement. On peut donc les utiliser dans des liquides ainsi que comme marqueurs au sein de cellules vivantes.



LES AUTEURS



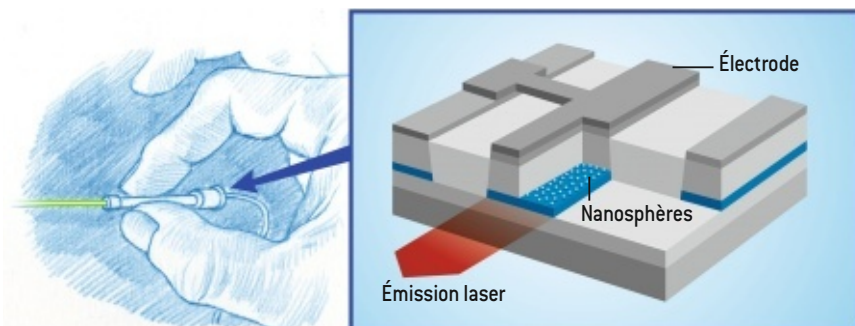
Jean-Michel COURTUY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://blog.idphys.fr>

✓ BIBLIOGRAPHIE

L. Zuppiroli et M.-N. Bussac, *Traité des couleurs*, Presses polytechniques et universitaires romandes, 2001.

R. Rossetti *et al.*, Quantum size effects in the redox potentials, resonance Raman spectra, and electronic spectra of CdS crystallites in aqueous solution, *J. Chem. Phys.*, vol. 79, pp. 1086-1088, 1983.

H. Kuhn, A quantum-mechanical theory of light absorption of organic dyes and similar compounds, *J. Chem. Phys.*, vol. 17, pp. 1198-1212, 1949.



3. DES LASERS peuvent être réalisés avec des « boîtes quantiques » telles que les nanosphères de sélénure de cadmium. Intégrées en nombre dans un dispositif électrique adéquat (à droite) qui excite leurs électrons, elles donnent lieu à une émission laser dans l'infrarouge. Par un procédé d'optique non linéaire qui double la fréquence, on obtient un laser vert.

Ces atomes artificiels géants permettent aussi de réaliser des lasers. Dans les lasers habituels à semi-conducteurs, la couleur de la lumière émise est déterminée par la différence d'énergie entre le haut de la bande d'énergies « de valence » du semi-conducteur (qui est entièrement remplie par les électrons) et le bas de la bande d'énergies « de conduction » (qui est vide). Pour obtenir des

lasers de longueurs d'onde différentes, il faut jouer sur cette différence d'énergie, c'est-à-dire rechercher le matériau adéquat.

Désormais, on met plutôt les électrons en boîte en réalisant des « hétérostructures ». Ce sont des structures de taille nanométrique qui prennent la forme d'un fil, d'un plan ou d'un volume de forme appropriée, réalisées dans un matériau différent de celui du substrat environnant. Les électrons mobiles qui y sont présents ne peuvent pas aller dans le substrat si ce dernier est isolant. Ils sont donc confinés, de sorte que l'échelle de leurs énergies dépend non seulement du matériau constitutif, mais aussi de la taille de ces « boîtes quantiques ». Excitées par un courant électrique, ces dernières peuvent jouer le rôle de milieu actif dans un laser ou dans un amplificateur de lumière. De tels dispositifs arrivent sur le marché.

CONFÉRENCES

Cycle de conférences « Des forêts et des Hommes »

Lundi 2 mai - 18h : Est-il bon pour la santé de vivre en forêt équatoriale ? A. Froment

Lundi 16 mai - 18h : Nouveaux regards sur les Pygmées aujourd'hui en Afrique centrale. B. Soengaz et M. Robillard

Lundi 23 mai - 18h : Forêts du Brésil : cueillette, extractivisme, biodiversité. L. Empereire

FILMS

Cycle de films « Les chemins de l'eau »

Lundi 9 mai - 18h

Le fleuve aux grandes eaux - Anim., 1993, 24', F. Back

Guarani, main basse sur l'eau - Docu., 2008, 52', R. Lugones

Samedi 14 mai - 15h30

Centipède - Expérим., 2010, 10', M. Grecu

Strade d'Acqua - Docu., 2009, 115', A. Contento

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy Saint-Hilaire, Paris 5°
Métro : Gare d'Austerlitz - Jussieu

BAR DES SCIENCES

Mercredi 25 mai - 19h30

Le lien entre la forêt et les hommes

Café/Restaurant de La Baleine
47 rue Cuvier, Paris 5° - Métro : Jussieu

La sélection **POUR LA SCIENCE**

Des livres scientifiques à la pointe de l'actualité



Le plus grand des hasards Surprises quantiques

Jean-François Dars et Anne Papillault

Comment pensent et à quoi rêvent les physiciens quantiques ? Soixante-cinq d'entre eux, couverts d'honneurs ou abordant leur thèse, racontent leurs hésitations, leurs angoisses, leurs efforts, leurs fatigues, leurs fureurs, leurs espoirs... Un témoignage précieux sur une science intrigante, accompagné de superbes photographies de ces chercheurs de l'extrême.

978-2-7011-5605-7 • 224 p. • 20,00 €



Les déchiffreurs Voyage en mathématiques

Jean-François Dars, Annick Lesne et Anne Papillault

Qui sont les mathématiciens ? Comment travaillent-ils ? Qu'est ce que l'intuition ? Autant de réponses que de questions dans cet ouvrage, où une cinquantaine de chercheurs, professeurs mondialement reconnus, médailles Fields ou jeunes thésards, proposent leur vision des mathématiques. Une plongée dans l'intimité de la création mathématique.

978-2-7011-4737-6 • 208 p. • 20,00 €



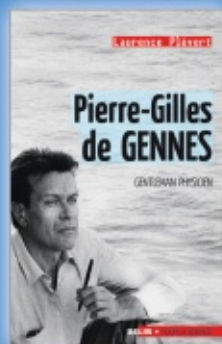
C. Ray et J.-C. Poizat

978-2-7011-4552-5 • 160 p. • 23,50 €



G. Pietryk

978-2-7011-3972-2 • 304 p. • 27,50 €



L. Plévert

978-2-7011-5228-8 • 368 p. • 23,00 €



B. Valeur

978-2-7011-4751-2 • 160 p. • 23,90 €



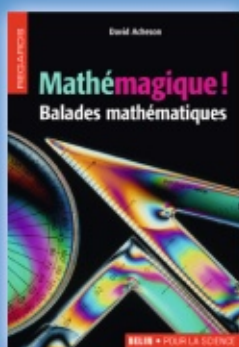
J.-P. Delahaye

978-2-8424-1825-0 • 224 p. • 24,00 €



J.-P. Delahaye

978-2-8424-5090-8 • 192 p. • 24,00 €



D. Acheson

978-2-7011-4285-2 • 176 p. • 18,50 €



N. Gauvrit

978-2-7011-4622-5 • 240 p. • 25,00 €

Feuilletez les premières pages de notre sélection de livres en exclusivité et commandez en ligne sur notre site

www.pourlascience.fr

Des livres à offrir ou à s'offrir à découvrir et à commander sur www.pourlascience.fr



À contre-idées • Didier Nordon

Trouver du comique dans une idée sérieuse (et inversement), du local dans une idée générale (et inversement), de l'absurde dans une idée sensée (et inversement), de l'esprit littéraire au sein des sciences (et inversement). Au fil de ses billets d'humeur, Didier Nordon s'ingénie à bousculer les idées reçues et tout ce qui semble évident et... qui ne l'est pas. Un livre décapant, pour jouer avec les mots... et les idées.

224 pages • 19 euros • 075110

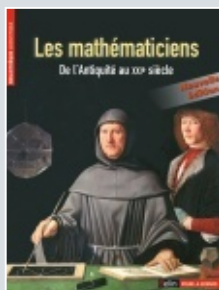


Au nom de l'infini • Jean-Michel Kantor, Loren Graham

Peut-on parler de mathématiques, de religion, de politique dans un même ouvrage ? Oui, et c'est le défi qu'ont relevé le mathématicien Jean-Michel Kantor et l'historien des sciences Loren Graham, du MIT.

Ce livre touchera même ceux que les mathématiques laissent indifférents, voire effraient. Les auteurs éclairent les liens étroits entre la vie – avec ses plaisirs et ses drames – et l'œuvre de ces hommes et ces femmes qui ont marqué le XX^e siècle par leur créativité en mathématiques.

288 pages • 24 euros • 075107



Les mathématiciens • Collectif

Autant artistes que scientifiques, les mathématiciens sont en proie à leurs passions, leurs interrogations, leurs doutes, leurs tourments, leurs angoisses, et la hantise de la beauté. « Nul ne peut être mathématicien s'il n'a une âme de poète », disait Sophie Kowalevskaja. Les mathématiciens doivent faire preuve de rigueur et de ténacité, mais surtout d'inventivité. Maudissant chaque jour leur impuissance à faire reculer les frontières du savoir, ils s'émerveillent pourtant, regardant derrière eux, de l'ampleur du chemin parcouru.

280 pages • 24 euros • 075109



La physique buissonnière • Jean-Michel Courty, Édouard Kierlik

La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus. Passionnés de physique et curieux de sciences, les auteurs vous invitent à une promenade sur ces chemins de traverse. Avec eux, laissez-vous surprendre par un phénomène que vous avez déjà côtoyé sans même le remarquer. Suivez-les pour découvrir et comprendre cette physique du quotidien.

160 pages • 22 euros • 075105

SCIENCE & GASTRONOMIE

Brandade de morue

*Le salage du cabillaud prépare la réalisation de la brandade.
Le meilleur procédé enchaîne injection de saumure et salage à sec.*

Hervé THIS



Comment saler la morue ? Naguère, le procédé s'imposait afin de conserver un poisson pêché loin des zones de consommation, mais aujourd'hui ? Il nous intéresse dans la mesure où il permet de réaliser un mets délicieux : la brandade.

La question du salage de la morue n'est pas seulement de nature technique ou gustative, mais aussi économique : les différentes méthodes de salage – trempage dans une saumure, injection de cette dernière dans le tissu musculaire, salage au sel sec... – n'ont pas les mêmes résultats en termes de quantité d'eau extraite et de qualité du tissu musculaire après réhydratation.

Les études, nombreuses, ont montré par exemple qu'une augmentation lente de la concentration en sel semble réduire le racornissement des muscles et la perte d'eau. Par ailleurs, le collagène, qui forme le tissu conjonctif (lequel gaine les fibres musculaires et les solidarise en faisceaux), se dissout partiellement dans les solutions salines neutres et gonfle. Enfin, le sel augmente l'activité enzymatique des tissus (enzymes responsables de la dégradation des composés structuraux, après que la rigidité cadavérique a été atteinte), puis la réduit aux valeurs constatées dans les muscles frais.

Le salage à sec est le procédé qui a le plus d'effets sur la contraction des fibres et l'effet microstructural a été étudié par Kristine Thorarinsdottir et ses collègues, de Reykjavik et de Lund.

L'effet des différentes méthodes de salage sur la teneur en sel des chairs n'est pas difficile à déterminer. Avec le salage à sec, on atteint 27 pour cent de sel en poids dans les filets salés de morue. La quantité

d'eau y diminue de 82 à 59 pour cent : cette perte est attribuée à l'extraction de l'eau qui est initialement liée aux protéines contractiles. Examinons le phénomène. La solubilité des protéines dans l'eau augmente à faible concentration en sel (*salting in*), car le sel apporte des ions, qui se lient aux groupes électriquement chargés de la surface des protéines, favorisant leur solvata-tion. En revanche, à plus forte concentration en sel, l'eau est captée de façon privilégiée par les ions du sel, de sorte que les protéines précipitent (*salting out*).

Lors de la réhydratation, les flux de sels et d'eau sont inverses. La teneur moyenne en eau en vient à dépasser celle du muscle frais, tandis que le tissu musculaire réhydraté reste plus salé que le muscle avant salage. Surtout, la microstructure des tissus musculaires est notablement modifiée. Le salage contracte les fibres, mais augmente les espaces intercellulaires. Lors de la réhydratation, les fibres regonflent et reprennent leur volume initial, mais l'espace intercellulaire reste notable.

L'injection de saumure seule augmente le diamètre des fibres, en raison d'une interaction des ions du sel et des protéines myofibrillaires. Simultanément, les espaces intercellulaires se réduisent.

Lors du saumurage, les cellules musculaires se contractent, parce que, à forte concentration en sel, les protéines perdent leur eau d'hydratation. Puis, après saumurage, les muscles rétrécissent, et leur microstructure ressemble à celle que l'on obtient pour des filets injectés et saumurés. Au total, on récupère des filets plus lourds après injection et saumurage qu'après saumurage seul. Le salage à sec

déforme encore les tissus, faisant apparaître des séparations plus grandes encore entre cellules.

Les études de microscopie ont précisé ces mécanismes, mais elles ont surtout montré que, après la réhydratation, le tissu conjonctif est difficilement visible, ce qui indique qu'il a été dégradé. Ce tissu conjonctif, en effet, est composé de fibrilles, elles-mêmes faites de triplets de protéines entortillées : l'ajout de sel favorise la séparation des brins et la désorganisation des tissus, donc la séparation des fibres musculaires.

La conséquence pour la brandade de morue ? D'une part, le salage, qui sépare les fibres musculaires, prépare leur « dispersion culinaire » dans la très grande quantité d'huile qui est ajoutée. D'autre part, la dégradation du tissu conjonctif libère des protéines qui contribuent à la stabilité du plat, où l'huile et l'eau se mêlent en une émulsion. Quel est le meilleur traitement du poisson ? Celui qui enchaîne injection et salage à sec, puisque c'est celui qui déshydrate le moins les filets et aussi celui qui dissocie le mieux le tissu collagénique.

Finalement, le procédé culinaire est parfaitement « adapté » à l'ingrédient ; nous en concluons, comme Pangloss, que le nez a été créé pour porter les lunettes. ■



Hervé THIS dirige le groupe INRA de gastronomie moléculaire au Laboratoire de chimie d'AgroParisTech. Il est aussi directeur scientifique de la Fondation Science & Culture Alimentaire (Acad. des sciences).



Retrouvez les articles de Hervé THIS sur www.pourlascience.fr