



Fromages surdoués

HERVÉ THIS

Des bactéries bien choisies renforcent le goût des fromages.

Un gouda ou un cheddar ne prennent toutes leurs vertus gastronomiques qu'après plusieurs mois, et bien des fromages, mêmes affinés longtemps, n'ont pas le goût aussi puissant qu'on leur souhaiterait. L'affinage du fromage ? Une de ces discussions qui animent le monde gastronomique depuis des siècles ! Le lait que l'on fait cailler et que l'onensemence par des bactéries lactiques s'acidifie au cours de l'affinage : quand le lactose (le « sucre du lait ») est transformé en acide lactique, l'acidification évite les contaminations par des micro-organismes pathogènes, tandis que les bactéries lactiques libèrent des composés aromatiques qui contribuent au goût du fromage. À la station INRA de Jouy-en-Josas, Mireille Yvon et ses collègues étudient des souches de bactéries lactiques qui produisent davantage de ces composés aromatiques.

Les biochimistes savent comment le goût patiemment acquis des fromages est dû aux micro-organismes qui assurent l'affinage : les graisses et les sucres sont progressivement transformés, et les protéines sont dissociées en leurs constituants, les acides aminés ; puis ces derniers sont transformés en diverses molécules aromatiques. Par exemple, les acides aminés, nommés leucine et valine, engendrent des composés à la « note fromage », et la phénylalanine, la tyrosine ou le tryptophane sont les précurseurs des « notes florales » ou « notes phénoliques », notes attribuées par des « goûteurs », lors des tests de dégustation.

La lente dissociation des protéines en acides aminés limite-t-elle la formation des composés aromatiques ? Non, car l'ajout direct d'acides aminés libres n'augmente pas le goût des fromages, pas plus que l'ensemencement des laits par des bactéries lactiques dont on a augmenté, par génie génétique, la capacité de dissociation des protéines : dans ce dernier cas, les acides aminés sont libérés en quantités supérieures, mais le goût n'est pas modifié. Au début des années 1990, les biochimistes avaient conclu que le facteur limitant le développement du goût était plutôt la transformation des acides aminés en composés aromatiques.

Aux Pays-Bas, notamment, les biochimistes W. Engels et S. Visser avaient observé que l'on obtenait des goûts typiques de gouda quand on ajoutait de la méthionine à des bactéries lactiques (sans lait), et ils avaient identifié deux enzymes qui semblaient responsables du phénomène. M. Yvon et ses collègues avaient également observé, *in vitro*, que les bactéries lactiques dégradent certains acides aminés pour former des composés aromatiques, tels les aldéhydes et les acides carboxyliques. La première étape de la transformation est une « transamination », réaction d'un acide aminé et d'une molécule, nommée céto-glutarate, qui produit un cétoacide et du glutamate ; cette molécule est utilisée comme « exhausteur de goût » dans les cuisines asiatiques ou dans de nombreux produits industriels, parce qu'elle communique la saveur aujourd'hui nommée « umami ». Lors de la réaction de transamination, un groupe amine ($-NH_2$) passe de l'acide aminé au cétoacide, lequel est ensuite modifié chimiquement et transformé en composés aromatiques.

En 1997, les biochimistes de Jouy ont purifié et caractérisé l'enzyme aminotransférase qui, chez la bactérie lactique *Lactococcus lactis*, assure la transamination de la leucine et de la méthionine. Toutefois, dans les conditions réelles d'affinage, la présence de cette enzyme ne conduisait pas à un développement aromatique notable des fromages. Pourquoi ? La diffusion des réactifs dans les bactéries lactiques était-elle trop lente ? Les bactéries lactiques manquaient-elles de molécules susceptibles de recevoir les groupes amine ?

Les chercheurs de l'INRA ont testé cette seconde hypothèse en tiédissant du lait (pasteurisé), en l'ensemencant par des bactéries lactiques, puis en l'additionnant de présure (qui fait cailler le lait et le transforme en fromage) ; ils obtenaient ainsi un caillé qui était moulu et pressé, puis plongé dans une saumure additionnée de céto-glutarate. Ils suivaient la transformation des acides aminés pendant l'affinage, tandis qu'un jury de dégustateurs analysait le développement de l'odeur.

Dans des fromages témoins, qui n'avaient pas été enrichis en céto-glutarate, très peu d'acides aminés étaient dissociés, et l'odeur était faible. En revanche, l'ajout de céto-glutarate augmentait la transformation de plusieurs acides aminés. La transformation du céto-glutarate conduisait à la formation de composés puissamment aromatiques, tels l'isovalérate, pour la leucine, et le benzaldéhyde, pour la phénylalanine. Ainsi, l'odeur des fromages était augmentée par l'addition de céto-glutarate (des résultats analogues ont été obtenus pour des cheddars).

Alors qu'ils étudiaient l'ajout de céto-glutarate, les biochimistes ont observé que ce même glutamate, qui est produit lors de la transamination, est transformé par une enzyme produite par d'autres bactéries en céto-glutarate. Comme le glutamate est abondant dans le lait, même avant l'affinage, ils ont voulu introduire le gène de l'enzyme découverte (la glutamate déshydrogénase) dans une bactérie lactique, afin que cette dernière produise le céto-glutarate à partir de glutamate.

Les effets de cette introduction ont été suivis *in vitro* et dans un fromage modèle : les bactéries lactiques modifiées transaminent aussi activement les acides aminés que les bactéries lactiques à qui l'on ajoute du céto-glutarate. Mieux encore, les bactéries lactiques où l'on a introduit le gène de la glutamate déshydrogénase produisent plus d'acides carboxyliques, fortement aromatiques.

La preuve est donc faite que des bactéries bien « équipées » peuvent faire de meilleurs fromages, mais les organismes génétiquement modifiés ne sont pas universellement acceptés par les consommateurs. Alors, les biochimistes cherchent aujourd'hui des souches de bactéries lactiques qui produiraient naturellement la glutamate déshydrogénase. Dans cette affaire, les organismes génétiquement modifiés auront été un outil de recherche. N'est-ce pas une de leurs fonctions importantes ?

Prochain rendez-vous France Info et Pour la Science, le 25 avril 2001, avec la chronique Info Sciences de Marie-Odile Monchicourt.

Une nouvelle exception française?

PASCAL RICHET

Lourdeurs administratives, fournisseurs imposés, manque de force de proposition et de liberté d'action... Le CNRS ne serait-il pas au mieux de sa forme?



Jean-Michel Thiriet

«**M**on impression est que l'industrie fait un meilleur travail à repérer la créativité que l'Université», s'inquiétait il y a quelques temps le physicien américain P. Anderson dans une de ses chroniques publiées dans la revue *Physics Today*. À l'appui de ses craintes, il citait le cas d'un de ses anciens et brillants étudiants : «J'ai plusieurs raisons de vouloir quitter les milieux universitaires, lui confia ce dernier, la moindre n'étant pas le désir de trouver un environnement qui récompense ceux qui prennent des risques appropriés.» Selon une idée assez répandue, nous traversons une époque où la science n'a pas d'autre enjeu que de tirer les conséquences de ce qui est déjà connu. Pour lutter contre, P. Anderson dut rappeler l'évidence selon laquelle : «Les chercheurs dont nous avons le plus besoin ne sont pas ceux qui sont bons pour répondre à de vieilles questions bien posées, mais ceux qui sont capables d'en poser de nouvelles.»

Telles sont quelques-unes des inquiétudes sur l'avenir de la recherche. Celles-ci ne semblent pas partagées par nos hautes instances, bien que la conjoncture paraisse, depuis des années, beaucoup moins favorable de ce côté-ci de l'Atlantique que de l'autre. Il est vrai que les candidats se présentent toujours nombreux aux portes de l'enseignement supérieur et des grands organismes de recherche. Sera-t-il possible de maintenir un recrutement de qualité si, à mesure que les départs à la retraite augmentent, le nombre de postes à pourvoir s'accroît, mais que la situation de l'emploi est surtout propice aux postes de qualification élevée? La science restera-t-elle attractive si ses pratiques continuent à se bureaucratiser et que ses moyens d'action diminuent, en dehors de quelques circonstances particulières? Y aurait-il un risque de recruter des jeunes ne désirant faire de la recherche que par défaut?

Quel aurait été le regard de Candide sur les modalités pratiques de la recherche, en particulier dans les laboratoires du «plus important organisme européen», le CNRS? La science ne s'exerçant pas dans un cadre immatériel, examinons comment les moyens qui lui sont consacrés sont employés et attribués. Au préalable, rappelons ce qu'un autre physicien, Ludwig Boltzmann, chuchotait il y a 100 ans : «La vraiment grande avancée scientifique – notre ministre de l'Éducation ne doit pas l'entendre – est toujours accomplie avec les plus petits moyens.»

Le fait est que Boltzmann est aujourd'hui parfaitement entendu en France, à commencer par le ministère des Finances. Parmi les divers moyens avec les-

quels ce dernier occupe les personnels de la recherche et stimule leur créativité, un des plus efficaces est l'obligation faite de se fournir chez les détenteurs de marchés publics. Par rapport aux offres qu'on trouve par ailleurs, il en résulte des surcoûts systématiques qu'on peut chiffrer à 10 ou 20 pour cent des crédits engagés (en laissant de côté les coûts internes dus à la passation et à la gestion, à tous les niveaux, de ces marchés). En outre, un jeu très motivant a fait son apparition, celui de rompre avec la routine d'une politique de standardisation : le matériel retenu par l'administration diffère parfois de celui que le laboratoire employait. Tandis que l'on peut oublier les solides relations de confiance mutuelle des chercheurs avec leurs fournisseurs (relations dépourvues de toute valeur comptable), on jouit de grands frissons chaque fois que l'on se sert d'un appareil dont on sait qu'il ne sera plus possible de l'entretenir ni de le faire réparer puisqu'il a été acheté à une société qui n'est pas titulaire d'un marché!

Quant à ses déplacements professionnels, le jeune chercheur admirera la rigueur avec laquelle Bercy veille à ce qu'il ne confisque pas, à son profit, le solde parfois considérable de notes de frais plafonnées à 404 francs par jour. Si, un jour, il devient directeur de laboratoire, il appréciera que cette rigueur mathématique le décharge d'une partie ingrate de ses responsabilités : au lieu de juger par lui-même des conditions globales d'une mission, il certifiera conformes les tickets de cantine et les notes d'hôtel des chercheurs de son laboratoire. Sur la base des 1 500 francs auxquels le CNRS demande actuellement à ses directeurs de recherche de facturer leur heure de travail à l'extérieur, il sera fier d'avoir aidé l'État et la science à tirer profit des vastes collections de reçus divers qui auront ainsi été constituées. S'il est Parisien et s'il organise un



séminaire d'une journée en banlieue, il fera rêver à peu de frais puisqu'il devra alors établir, pour chaque participant, un ordre de mission qui sera le même que pour partir à l'autre bout de la planète. Quand la célèbre Société américaine *Cisco* se contente de faire traiter par trois personnes seulement les notes de frais de ses 25 000 employés, Bercy n'apporte-t-il pas la preuve que l'intérêt du contribuable français est mieux surveillé que celui de l'actionnaire américain ?

En ajoutant que de telles contraintes ont le mérite de rappeler à nos grands esprits qu'ils vivent dans un monde réel, passons à l'activité scientifique elle-même et aux conditions dans laquelle imagination et créativité s'épanouissent en toute sécurité en France. Ici, pas d'appels d'offres, auxquels, deux ou trois fois par an, chacun peut répondre en proposant des idées – même saugrenues –, comme cela est généralement pratiqué à l'étranger ; on préfère un ferme cadre cartésien, où organisation et programmation se donnent la main pour garder la science dans la bonne voie.

Certes, s'il a moins de 35 ans, un chercheur peut prendre des chemins de traverse dans le cadre d'actions «libres» prévues à son intention. Vite parvenu à l'âge adulte, il retrouve cependant la sécurité des grands programmes «structurés» par des comités «d'experts» où son choix est bien souvent celui de la question prédéfinie à laquelle il essaie de répondre. La recherche étant une œuvre collective, il peut enfin, s'il est un jour à court d'idée, rejoindre une vaste action «fédératrice». Là, personne ne cherchera à savoir quelle sera exactement sa contribution : quand les nobles idéaux de la science rejoignent ceux de l'olympisme, l'important n'est-il pas seulement de participer ?

En revanche, s'il souhaite s'aventurer hors des chemins balisés dans le cadre d'une action non thématique subsistante, le chercheur ne devra pas oublier les vertus de la programmation scientifique. Un projet de géophysique fut récemment jugé ainsi : «Bien qu'il s'agisse d'une recherche fondamentale du plus haut intérêt, le comité sera en droit de considérer que les retombées en termes de connaissance de l'intérieur de la Terre sont seulement potentielles et à très long terme et que, du point de vue programmatique, d'autres projets sont sans doute nettement plus pertinents.» À juste titre, cet avis soulignait dans sa conclusion une autre lacune sérieuse : «D'autre part, l'effet structurant de ce projet au niveau français est inexistant.» En effet, la somme de 82 000 francs demandée par ce

projet, pour deux ans, ne suffit-elle pas, en France, pour structurer une communauté ?

Nous voici de retour à des questions matérielles. Au regard du critère précité de Boltzmann, la position française est spécialement forte : les moyens de fonctionnement n'y sont-ils pas, par chercheur, deux à trois fois plus faibles que ce qui se pratique dans les grands pays scientifiques ou dans la recherche industrielle ? Le CNRS ou l'Université se montrent d'une prodigalité extrême en mettant leurs laboratoires à la disposition d'industriels, d'associations ou de programmes européens qui ne paient que des coûts marginaux de fonctionnement. L'ennui – car il y en a quand même un – est que les chercheurs pourraient trouver, par ce biais, des oreilles externes plus attentives aux idées nouvelles que celles de son milieu d'origine. Que penser alors de la politique scientifique des grands établissements et des colloques de prospective qui la déterminent solennellement ?

Heureusement, sur le fond, l'activité des groupes qui découpent et redécoupent sur le papier les frontières entre disciplines, pensent, fédèrent, structurent et organisent l'action des différentes unités de recherche (URA, UMR, UPR, ESA, FU et autres entités aux acronymes transparents), ne semble pas menacée. Que les diverses priorités affichées par les responsables de ces structures, qui s'enchevêtrent et s'interpénètrent, puissent être contradictoires n'ôte rien à l'intérêt de les formuler. La vie est complexe ; ainsi doit l'être également le fonctionnement de la recherche !

Comme les problèmes posés par les pages administratives, comptables et programmatiques du grand livre de la science ne sont pas moins captivants que d'autres, pourquoi feraient-ils fuir de jeunes talents désirant prendre des risques ? Il est ainsi inutile d'examiner si les contraintes de la gestion publique sont compatibles avec une activité scientifique moderne, ou de comparer les mérites de politiques favorisant l'emploi ou la création scientifique. Hors de propos, également, de tirer parti des départs massifs en retraite pour accroître les moyens de travail sur le long terme, simplifier les rapports entre grands organismes et universités, ou changer quoi que ce soit aux fonctions et carrières, très enviables, des ingénieurs, techniciens et administratifs...

Pascal RICHET, Institut de physique du Globe de Paris.

■ POUR LA SCIENCE

VOTRE ABONNEMENT 100 % NUMÉRIQUE

1 an au prix de 48 €

soit **4 € seulement par numéro** au lieu de ~~5,20 €~~

Pour consulter et télécharger
en toute liberté sur www.pourlascience.fr
les 12 prochains numéros
dès leur parution.



Oui, je m'abonne
à *Pour la Science* 100 % numérique
1 an (12 numéros) pour 48 €

Je préfère découvrir toutes
les offres d'abonnement disponibles
en cliquant ici.



Réaumur, pionnier de l'entomologie

JACQUES D'AGUILAR

Réaumur fut mathématicien, physicien, chimiste, botaniste... et, surtout, entomologiste. Grâce à sa rigueur expérimentale, il fit des découvertes qui lui valurent de présider l'Académie royale des sciences.

Que vous évoque le nom de Réaumur? Un thermomètre? Une station de météo? René Antoine Ferchault de Réaumur (1683-1757), comme de nombreux savants de son temps, était un «touche-à-tout». Il s'occupa de physique et inventa le thermomètre à alcool. Il fit de la biologie et écrivit un traité sur les insectes en six volumes, étudia le rôle du sperme dans la fécondation chez les grenouilles (en les équipant d'une «culotte» servant de préservatif), s'attaqua au problème de la digestion... Il aborda de nombreux domaines techniques, telles la métallurgie et la fabrication du verre et de la porcelaine. Cependant, son œuvre d'entomologiste reste son plus grand titre de gloire.

Réaumur naît à La Rochelle, en 1683. Après la mort de son père, il déménage à Poitiers, où il est éduqué chez les jésuites. En 1699, il se rend à Bourges, chez son oncle, pour étudier le droit. En 1703, il arrive à Paris, où son cousin

l'incite à suivre les leçons de mathématiques à l'Académie royale des sciences. Il choisit de faire des études de géométrie : en 1708, à 24 ans, il devient géomètre à l'Académie.

À partir de ce moment, il vit au rythme de cette institution. Il présente d'abord quelques travaux de mathématiques sur les lignes courbes, puis, dès 1709, il s'intéresse à «l'accroissement des coquilles». En 1711, il est élu mécanicien et s'intéresse à la physique et à ses applications industrielles. En 1713, il devient sous-directeur de l'Académie, puis directeur l'année suivante (de 1713 à 1753, il sera nommé onze fois directeur et neuf fois sous-directeur de cette institution).

En 1716, reprenant un projet de Colbert pour l'Académie, Réaumur rédige un *Dictionnaire des arts* : il accumule les observations, enquête sur les métiers et fait graver plus de 150 planches pour les illustrer, dont certaines seront à nou-

veau publiées dans l'*Encyclopédie* de Diderot et d'Alembert.

À cette époque, la France dépend de l'Allemagne pour s'approvisionner en métaux ferreux, et l'industrie en consomme toujours davantage. Réaumur se met alors à étudier comment convertir du fer en acier et comment fabriquer de la fonte malléable. Il introduit les méthodes scientifiques dans le monde de la métallurgie. Ses travaux aboutissent à la publication de *L'art de convertir le fer forgé en acier et l'art d'adoucir le fer fondu ou de faire des ouvrages de fer fondu aussi finis que le fer forgé*, qu'il met en pratique dans une fonderie dont il devient directeur pendant quelque temps.

Il s'intéresse ensuite aux porcelaines chinoises, que les faïenciers européens avaient tenté d'imiter avec plus ou moins de succès. Il obtient d'un religieux en mission en Chine de petites quantités des terres utilisées, à partir desquelles il identifie le *Pe-tun-tsé* (un feldspath potassique) et le *kao-ling* (ou kaolin, une silicate d'alumine hydratée). Il mène une enquête auprès des intendants de province, afin de connaître les ressources en «mines, terres, pierres, sable et matières minérales» de chaque région. Puis, en faisant fondre du verre et du kaolin, il obtient la «porcelaine de Réaumur» : du verre opacifié par un long refroidissement. Conscient que cette porcelaine ne vaut pas celle de Chine, il ne présente son mémoire sur le sujet qu'une dizaine d'années plus tard.

Lorsque Réaumur s'intéresse aux thermomètres, celui de Fahrenheit, au mercure, n'est pas encore connu en France. En 1730, il publie les *Règles pour construire des thermomètres dont les degrés soient comparables et qui donnent une idée d'un chaud et d'un froid qui puissent être rapportés à des mesures connues*. Puis il met au point un instrument à esprit-de-vin (l'alcool), dont la graduation est voisine de celle que nous utilisons aujourd'hui : il fixe le zéro à la température de la glace



1. Une soirée chez Mme Geoffrin, à laquelle participe Réaumur, aux côtés de d'Alembert, Montesquieu, Diderot, Malherbe, Turgot, Rameau...

fondante (ce qui constitue une innovation, à l'époque) et détermine les intervalles entre deux graduations.

À partir de 1733, Réaumur travaille sur les insectes. Il en possède une riche collection, ayant reçu de nombreux spécimens du monde entier. Il met au point des techniques de conservation et de naturalisation des échantillons : notamment, il conserve les œufs de poule en les enduisant de graisse et fait ainsi voyager des œufs d'oiseaux exotiques, pour qu'ils n'éclosent qu'une fois arrivés à Paris.

LES MŒURS DES INSECTES

Réaumur fait de l'entomologie une science de l'observation, de l'expérimentation et de la description. Il consigne ces travaux dans un ouvrage intitulé *Mémoires pour servir à l'histoire des insectes*, en six volumes, parus de 1734 à 1742 (un septième tome a ensuite été publié à partir de ces manuscrits).

Avant lui, peu de naturalistes s'étaient intéressés aux insectes, et ceux qui l'avaient fait s'étaient surtout employés à décrire la diversité de leurs formes ou certains traits de leur anatomie. Réaumur ouvre la voie de l'étude expérimentale du comportement. Pour faire des observations précises, il ne recule devant aucune difficulté. À propos de ses travaux sur les guêpes, il écrit : «Je ne saurais dire combien de piqûres a essuyées un laquais que j'avais aguerri à ce travail» et ajoute avec bonhomie qu'«il n'eût pas été juste que le maître en fut exempt».

Il étudie les pucerons. Ces petits insectes au corps mou, souvent dépourvus d'ailes, vivent en colonies denses sur les feuilles et les pousses tendres. Au cours d'une saison, une série de générations voit le jour sans intervention du mâle (c'est la parthénogenèse), suivie d'une génération sexuée, qui pondra les œufs d'hiver d'où sortiront, au printemps, les femelles dites «fondatrices» : à la saison suivante, celles-ci donneront à leur tour naissance à une série de générations parthénogénétiques...

En 1700, A. Van Leeuwenhoek est le premier à observer que les pucerons «mettent au jour des petits sans copulation avec le mâle». Réaumur veut vérifier cette affirmation, mais les pucerons de chou qu'il tente d'élever périssent les uns après les autres. Charles Bonnet, enthousiasmé par la lecture des travaux de Réaumur, lui propose son aide. Celui-ci l'exhorte à reprendre ses expériences sur les pucerons. Ainsi, Bonnet fait un élevage de pucerons du fusain et voit un individu maintenu dans une parfaite solitude donner naissance à 96 petits. Lorsque ces résultats sont présentés à l'Académie royale des

sciences, sous forme de «table des jours et heures des pucerons mis au jour depuis le premier juin jusqu'au 21 du même mois, par celui qui depuis sa naissance avait été tenu dans une parfaite solitude», celle-ci demande, selon la coutume, que la même expérience soit répétée par d'autres personnes. Réaumur observe des pucerons du pêcher, du sureau et du groseillier et fait appel à ses correspondants européens, qui observent des pucerons du pavot, du sureau, du rosier et du saule, aboutissant aux mêmes conclusions.

Réaumur décrit avec élégance, dans le style fleuri de son époque, ce qu'il observe avec une minutie d'horloger. Il consigne notamment l'accouchement d'une puceronne (qui n'avait pas encore été précisément décrit) dans le tome III des *Mémoires pour servir à l'histoire des insectes*.

«Pour moi, j'observai à la loupe et avec attention les plus gros pucerons, et je ne fus pas longtemps à les observer, sans

en apercevoir quelques-uns qui, à leur anus, ou auprès de leur anus, avaient un petit corps verdâtre, quoique le puceron fût noir. Ce petit corps était oblong, ayant assez la forme d'un œuf, un peu aplati. Je fixai mes regards sur un de ces petits corps, et je le vis sortir insensiblement et de plus en plus du derrière du puceron ; il ressemblait toujours à un œuf. Mais enfin quand il fut encore plus avancé à sortir, quand, à en juger par sa forme ovale, il ne paraissait plus en rester que le petit bout dans le corps de la mère, je reconnus que ce qui m'avait semblé jusque-là un œuf, était un insecte très vivant, muni de plusieurs jambes. Ses jambes se séparèrent peu à peu du ventre, tout au long duquel elles étaient étendues auparavant ; je les vis se donner des mouvements en plusieurs sens, et cela peut-être pour aider à retirer la tête de dedans le corps de la mère, où elle était encore engagée : car le derrière du petit insecte était sorti le premier ; son dos était en dessus, comme il doit



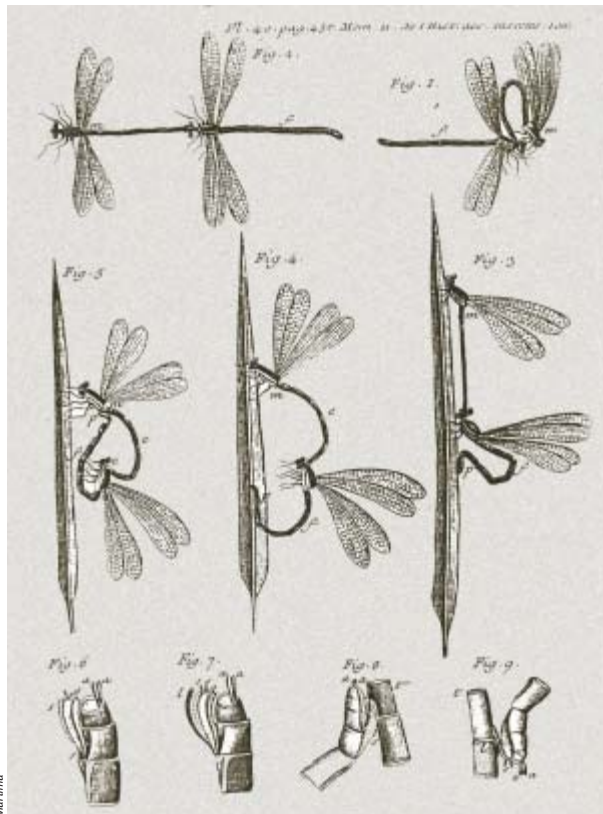
2. En 1746, le miniaturiste allemand Rösel von Rosenhof commence la publication de *Insecten Belustigung* (divertissement entomologique), inspiré de l'œuvre de Réaumur, qui en souligne la valeur après en avoir lu quelques passages traduits.

être naturellement. Les jambes étendues et appliquées contre le ventre n'avaient pu devenir visibles jusqu'à ce qu'elles se fussent donné des mouvements pour se mettre en des positions semblables à celles où elles sont lorsqu'elle portent le petit animal. Leeuwenhoek avertit aussi, dans une observation particulière, que le derrière du puceron sort le premier du corps de sa mère. La mère paraît tranquille pendant cette opération, toute son action est intérieure [...] L'accouchement, lorsqu'il est le plus long, ne dure pas plus de six à sept minutes.»

Réaumur s'intéresse aussi aux abeilles. Pour mieux les étudier, il met au point des ruches vitrées. Il observe la récolte du miel, du pollen et de la propolis (une gomme rougeâtre provenant des bourgeons de marronniers et de saules que les abeilles utilisent pour obstruer les fentes des ruches ou fixer les gâteaux de miel), le massacre des mâles, la régurgitation du miel dans les cellules, le rôle exclusif de la reine dans la ponte des œufs et le développement complet d'une abeille depuis l'œuf jusqu'à la naissance de l'adulte. Réaumur réalise plusieurs expériences :

après avoir enlevé une reine de sa ruche, il voit que celle-ci est remplacée par une larve nourrie à la gelée royale. Il introduit dans une ruche possédant une reine d'autres reines marquées de jaune et de rouge, qui sont systématiquement détruites. Il montre l'importance de la température extérieure pour la survie des petites colonies pendant les périodes de froid rigoureux, en les calorifugeant avec une sorte de tonneau bourré de paille. Il décrit pour la première fois le «pou des abeilles» (*Braula caeca*). Ainsi, il crée l'apiculture scientifique.

Réaumur se penche sur les libellules, qu'il appelle «demoiselles», et décrit leur comportement reproducteur original. Il remarque que le pore génital des mâles est situé à l'extrémité de l'abdomen, mais que l'organe copulateur est placé à sa base : avant ou pendant l'accouplement, le mâle charge lui-même l'organe copulateur de liqueur séminale, puis, saisissant une femelle par le cou avec ses pinces (à l'extrémité de son corps), il l'incite à recourber son abdomen et à introduire son orifice génital dans sa saillie copulatrice. Le couple forme alors un cœur : «La figure composée de deux demoiselles ainsi réunies forme une espèce de las en cœur dont la tête du mâle



3. Réaumur étudie la reproduction des libellules et décrit avec précision les différentes étapes de la copulation. Le mâle saisit la femelle (Fig. 1), puis ils volent en tandem (Fig. 2). La femelle recourbe son corps (Fig. 3 et 4) et introduit son orifice génital, situé au bout de l'abdomen, dans la saillie copulatrice du mâle, située à la base de l'abdomen. Le couple forme alors un cœur (Fig. 5).

fait la pointe et dans l'échancrure duquel se trouve la tête de la femelle». Il observe aussi les larves aquatiques dont le masque préhensile, qu'il appelle «bras mentonnier», est brusquement projeté en avant pour saisir une proie passant à proximité.

Les découvertes de Réaumur en éthologie des insectes sont si nombreuses qu'il est impossible de les citer toutes : il observe les chenilles et les papillons, les entonnoirs des fourmilions, les fourmis et leur régurgitation de liquide pour les larves, les bousiers (des scarabées coprophages de l'espèce *Geotrupes stercorearius*) et leur nid avec sa chambre terminale contenant l'œuf unique...

RÉAUMUR ET BUFFON

À la fin de sa carrière, Réaumur essuie les moqueries de Buffon. Celui-ci était devenu intendant du Jardin du Roi (le futur Jardin des Plantes du Muséum d'histoire naturelle), en 1739, à 31 ans. Il s'intéresse surtout aux grandes lois naturelles, n'accordant qu'une faible importance à l'observation minutieuse des mœurs des animaux et des insectes. Cette conception s'oppose à celle de Réaumur. À l'*Histoire naturelle générale et particulière avec la descrip-*

tion du Cabinet du Roi, de Buffon, parue en 1749, s'opposent les *Lettres à un Américain sur l'Histoire générale et particulière de M. de Buffon*, une véhémence critique publiée anonymement en 1751 et 1756, mais dont Réaumur est l'instigateur. Buffon y répond dans le quatrième tome de son *Histoire naturelle*, plein d'allusions dédaigneuses pour les travaux de Réaumur, sans que son nom soit jamais mentionné. Pour lui, «une mouche ne doit pas tenir plus de place dans la tête d'un naturaliste qu'elle n'en tient dans la nature». Cette vive controverse entre les deux hommes sert de tremplin à la carrière de Buffon, dont la notoriété ne cesse de s'accroître, sans porter atteinte à la celle de Réaumur, déjà directeur de l'Académie. Le poète Henri Michaux écrira bien plus tard de Réaumur : «Contemporain de Buffon, il n'en marqua rien. Jamais éloquent, pompeux ou collectionneur de «On dit». Par sa méthode, par plusieurs découvertes, il est d'un siècle en avance sur lui.»

En 1755, Réaumur hérite du château de la Bermondière, en Mayenne, qu'il occupe à partir de 1757. À la fin de cette même année, il meurt des suites d'une congestion cérébrale, à l'âge de 74 ans. L'Académie hérite de tous ses manuscrits (138 portefeuilles).

Toute sa vie, Réaumur a remis en cause les connaissances qu'il considérait comme incertaines. Il s'est méfié des savoirs anciens, souvent baignés de merveilleux, et n'a fait confiance qu'à une expérimentation rigoureuse : en entomologie, il a recommandé de s'intéresser à «tout ce qui a trait au génie, aux mœurs, et pour ainsi dire aux industries de ces petits animaux», en créant des «ménageries d'insectes de toutes espèces». Et Henri Michaux remarquera : «Un des premiers, il étudia avec ses mains, tout seigneur qu'il était, en terre malpropre, patrie des insectes. Un des premiers, les retirant de leur habitat, il les mit en observation en condition plus propres à l'examen et les soumit à des expériences et contre-expériences.»

Jacques d'AGUILAR a fait une carrière d'entomologiste à l'INRA. Il est ancien secrétaire général de la Société entomologique de France.

J. TORLAIS, Réaumur, A. Blanchard, 1961.

La vie et l'œuvre de Réaumur (1683-1757), PUF, 1962.

Invasion de jussies

Une fleur jaune menace étangs, lacs et rivières de France.

Les jussies sont des plantes aquatiques à fleurs jaunes très prisées pour la décoration des pièces d'eau. Originaires d'Amérique du Sud, deux espèces de jussies (*Ludwigia peploides* et *Ludwigia uruguayensis*) ont été accidentellement introduites en France dans les années 1820. Après être longtemps restées cantonnées dans la région qui s'étend de la Camargue à l'Aquitaine, elles sont parties à la conquête du Nord depuis une trentaine d'années et ont déjà été repérées sur quelques sites en Belgique et aux Pays-Bas. Elles colonisent les plans d'eau, les zones humides et les réseaux de fossés et de cours d'eau à faible débit, entraînant de nombreuses nuisances, à tel point que leur prolifération devient alarmante. Alain Dutartre et ses collègues du CEMAGREF (Institut public



Alain Dutartre-Cemagref



de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement) viennent de conduire la première étude quantitative qui évalue les risques de prolifération de ces plantes.

Selon les mesures réalisées dans la réserve naturelle du marais d'Orx, dans les Landes, les biomasses produites par les jussies doubleraient en 15 à 20 jours dans les eaux stagnantes, et en 70 jours dans les cours d'eau. Dans le marais d'Orx, les herbiers de jussies ont progressé de quelques dizaines de mètres carrés en 1993 à près de 130 hectares, en 1998. Un simple fragment de tige suffit pour que la plante repousse, puis prolifère rapidement. Un herbier très dense se constitue en un réseau inextricable de grosses tiges ramifiées. Les tiges plongent parfois jusqu'à trois mètres de profondeur et s'élèvent jusqu'à près de 80 centimètres au-dessus de l'eau : les cours d'eau sont freinés, et la circulation des bateaux devient impossible. L'irrigation et le drainage sont perturbés. Les eaux, moins mobiles, favorisent le dépôt de matières en suspension, et les milieux stagnants se combleront plus rapidement. Les berges peuvent être colonisées. Les jussies envahissent même certaines prairies humides. À cause de leurs remarquables capacités d'adaptation, les jussies remplacent progressivement les espèces locales, et la biodiversité diminue. Des espèces indigènes tels certains myriophylles (des plantes aquatiques immergées), qui hébergeaient une microfaune servant de nourriture aux poissons, disparaissent faute de lumière. En outre, les herbiers denses diminuent la concentration en oxygène dissous dans l'eau, de sorte que les poissons survivent plus difficilement.

Les jussies ont colonisé le Nord de proche en proche (les animaux, les hommes et les engins réalisant des travaux dans les milieux aquatiques transportent des boutures accidentellement), aidées par les amateurs de plantes aquatiques qui les ont introduites dans certains sites. Le réchauffement clima-



Principales zones envahies par les jussies (les points roses).

tique et l'augmentation du niveau de vie en France pourraient expliquer l'accélération de leur progression : les Français ont plus de temps et plus d'argent pour s'occuper de leur jardin.

Comment lutter contre la prolifération des jussies? Ces plantes sont déjà présentes dans de trop nombreux sites (plus d'une centaine) pour que l'on réussisse à s'en débarrasser complètement. Pour contrôler leur développement, les hydrobiologistes préconisent des solutions adaptées à chaque site : l'arrachage manuel ou mécanique, le traitement par un herbicide, l'utilisation d'entrées d'eau salée (notamment dans les zones humides littorales du Languedoc), car les jussies résistent mal au sel. Ils continuent à étudier leurs caractéristiques écologiques et biologiques : les fruits de jussies, considérés jusqu'à présent comme stériles, produisent des graines qui ont germé en laboratoire. Si elles germent aussi en milieu naturel, on devra surveiller les zones apparemment débarrassées de jussies pendant plusieurs années.

En attendant, les jussies restent en vente libre. Il suffit qu'une personne mette cette plante dans un étang privé et que les boutures s'échappent par un petit ruisseau pour que tout le bassin versant soit colonisé. Pour l'instant, seule *Caulerpa taxifolia*, surnommée l'algue tueuse depuis qu'elle a colonisé des milliers d'hectares en Méditerranée, est interdite à la vente en France.

De l'uranium dans les étoiles

Pour la première fois, les astrophysiciens ont détecté de l'uranium dans les étoiles. Ils en déduisent l'âge de la Voie lactée.

Les étoiles fabriquent des éléments, soit à la fin de leur vie, au moment de leur explosion, ce qui donne naissance aux éléments lourds, soit au cours des étapes de fusion thermonucléaire qui ont lieu dans leurs entrailles (donnant les éléments dont le numéro atomique est inférieur à celui du fer). La concentration en éléments lourds dans les étoiles anciennes nous renseigne sur le temps qui s'est écoulé depuis l'explosion des étoiles qui ont créé ces éléments. Si l'on parvenait à évaluer cette concentration dans des étoiles contemporaines des débuts de notre Galaxie, on pourrait estimer l'âge de cette dernière. Grâce à la première détection de l'uranium dans une étoile ancienne, Roger Cayrel et ses collègues de l'Observatoire de Paris ont estimé l'âge de notre Galaxie à 12,5 milliards d'années.

Les étoiles les plus vieilles, formées au début de la Galaxie, n'ont été «polluées» que par les éléments lourds provenant de l'explosion des premières supernovae, explosion antérieure à la formation de la Voie lactée : elles contiennent peu d'éléments lourds (plus les étoiles sont récentes, plus elles ont de chances de contenir les éléments lourds produits au moment de l'explosion de supernovae plus

récentes). Ainsi, les astronomes ont d'abord recherché des étoiles contenant peu d'éléments lourds : ils ont découvert une étoile qui contient 800 fois moins d'éléments lourds, tel le fer, que le Soleil. Cette étoile contenait aussi des éléments lourds issus de la capture de neutrons, tels l'uranium, à une concentration élevée par rapport aux concentrations usuelles. C'est cette composition particulière qui a permis la première détection de la raie de l'uranium dans un spectre stellaire : dans toutes les autres étoiles, y compris dans le Soleil, quand on enregistre leur spectre d'émission, la raie spectrale de l'uranium – peu intense – est masquée par les intenses raies du fer. La concentration «anormalement» élevée en uranium de cette étoile en a facilité la découverte.

Quel est l'intérêt de cette détection ? L'uranium 238 est un élément radioactif dont la période de décroissance est égale à 4,47 milliards d'années. On détermine la concentration en un élément stable engendré par le même événement que l'uranium (sans doute l'explosion de la supernova qui a synthétisé tous les éléments lourds présents dans cette étoile massive). Connaissant la proportion de cet élément stable et de l'uranium, et la période de l'uranium, on peut en déduire le moment où a eu lieu l'explosion.

Jusqu'à aujourd'hui, le seul traceur radioactif qui avait été utilisé était le thorium 232 (sa raie spectrale est plus facile à observer). Toutefois, sa période de décroissance radioactive étant de 14 milliards d'années, l'incertitude sur la détermination de l'âge était de l'ordre de 4 à 5 milliards d'années, soit un tiers de l'âge de l'Univers. Avec l'uranium, qui décroît huit fois plus vite, la précision devrait être trois fois meilleure. La première estimation de l'âge de formation de cet uranium (quasiment l'âge de la Galaxie, qui contenait alors moins d'un millième du nombre actuel d'étoiles), est de 12,5 milliards d'années, avec une incertitude de trois milliards d'années. Les astronomes espèrent réduire l'incertitude d'un facteur deux en évaluant avec plus de précision la quantité d'uranium présent aujourd'hui et celle qui a été produite à l'origine. La décroissance radioactive, grâce à laquelle on date déjà les objets organiques sur Terre (à l'aide du carbone 14 par exemple), deviendra alors un précieux «chronomètre» cosmique.



Grâce à la détection d'uranium dans l'ancienne étoile CS 31082-001, on a évalué l'âge de la Voie lactée à 12,5 milliards d'années.

BRÈVES

Linné et Laki

La gloire de certains savants éclipse celle de leurs compatriotes : qui se souvient de Laki (Uppsala 1707–Rashult 1778) ? Contemporain de l'auguste Linné qui inventa la nomenclature binomiale, Laki avait suggéré une nomenclature à trois échelons, les deux premiers noms étant caractéristiques de l'hérédité de la plante ou de l'animal, et le troisième concernant l'imprégnation résultant du contexte social. Le débat sur les parts respectives de Linné et de Laki en science dure encore...

Fouilles corréziennes

Alertés par des traces de fermes espacées, des taches de houille sur la craie et des morceaux de marne qu'ils venaient de débusquer, des archéologues ont mis au jour un humérus taché, deux bassins assez gros et des bouts de tarse. Ces chercheurs, experts en populations parties de la Castille, ont réussi à dater le corps en observant la longueur de la natte et des traces de chevelus. Ils ont aussi daté quelques pétales après prospection de leurs germes. (11)

Grands frais génétiques

Des spécialistes de la Paz connaissant bien les pectines ont découvert un exceptionnel génome en examinant un gueux. Avec un art très particulier pour décoder, ils ont initié une méthode – coûteuse mais ils font appel aux dons – pour fabriquer des pilules pouvant déplier les gènes. En agissant génétiquement, sans freiner son évolution, sur le code d'une souris allongée dans une gaze spéciale, ils ont suivi en les reproduisant les pistes de la plupart des gènes, tout en évitant la croissance de fœtus qu'il est toujours pénible d'emballer. (9)

Fini, les bouillies de chiffres!

Las qu'on débîne leurs sites et traumatisés par l'abus des vendeurs en ligne qui ne rêvent que de ventes fastes, des ingénieurs matheux de Yahoo sont parvenus à de meilleures performances, d'abord en traitant mieux l'étain de leurs puces. Puis, ces spécialistes de Lannion experts en consoles ont réussi à directement enficher, sans avoir besoin de les caler, leurs fibres de choix dans des prises de pros. Ils consacrent ainsi des aires bien définies aux connexions simplement obtenues en pressant la touche au dessus de chaque fibre. (11)

BRÈVES

L'anatomie de l'humour

Vous avez souri aux brèves de la page précédente? Vous avez le sens de l'humour, une caractéristique de l'homme essentielle lors des interactions sociales. Le «sens de l'humour» a été en partie élucidé par des Britanniques et des Canadiens grâce à une méthode d'imagerie cérébrale (l'IRM fonctionnelle). Ils lisaient des plaisanteries à des personnes dont ils enregistraient l'activité cérébrale et qui devaient dire si elles trouvaient les blagues drôles ou non. Chaque fois que la réponse était affirmative, un centre cérébral spécifique était activé. Il est situé dans le cortex préfrontal ventro-médian, une région qui participe au traitement de la récompense. Se sent-on récompensé quand on a entendu ou dit une plaisanterie?

Pièces d'or dans un cimetière

Une jarre contenant 82 pièces d'or datant de la dynastie arabe des Omeyyades, fondée au VII^e siècle, a été retrouvée dans un cimetière du Nord de la Syrie, par une famille qui creusait une tombe pour un deses défunts. Les pièces mesurent entre 1,6 et 1,7 centimètre de diamètre, et portent l'inscription de la profession de foi musulmane: «Il n'y a de Dieu que Dieu», sur une face, et «Mohammad est son prophète» sur l'autre. Le trésor aurait appartenu à un contemporain de la dynastie des Ayyubides, fondée au XII^e siècle, car la jarre qui le contenait date de cette époque.

Plastiques à mémoire de forme

Certaines branches de lunettes se plient dans tous les sens sans casser. Elles sont composées de matériaux à mémoire de

forme, qui adoptent une forme à une température et une autre à une température différente. Ce sont le plus souvent des alliages métalliques, mais Andreas Lendlein, à Aix-la-Chapelle, a mis au point un plastique à mémoire de forme, qui contient deux polymères: le premier cristallise sous forme de ponts qui lient les longues chaînes du second. Quand la température augmente, les cristaux fondent, et la forme du plastique change. Ce plastique est biocompatible: on pourrait

fabriquer des mini-prothèses qui, à la température du corps, se déploieraient et prendraient la forme voulue.

Que mangent les vaches?

Les proportions des isotopes de l'azote indiquent si les bovins ont mangé des farines carnées ou des végétaux.

Comment savoir si le steak que vous vous apprêtez à dévorer provient d'une vache nourrie aux farines animales ou à l'herbe? Un test mis au point par Antonio Delgado, biochimiste au Conseil supérieur espagnol de la recherche scientifique, donne la réponse. Ce test peut être pratiqué sur de la viande, ou, si l'animal est toujours vivant, sur des poils, ou sur divers tissus contenant des protéines, tels la corne et le sang. On détermine, par spectrométrie de masse, les proportions d'azote 14 et d'azote 15 dans ces tissus.

Les deux isotopes de l'azote, dont l'un contient 7 neutrons et l'autre 8, sont stables et représentent respectivement 99,63 pour cent et 0,37 pour cent de l'azote présent sur Terre. Ils ont les mêmes propriétés chimiques, mais, à cause de leurs différences de structure et de masse (l'isotope 15, qui contient un neutron de plus, est plus lourd), les réactions chimiques auxquelles ils participent ne se produisent pas à la même vitesse, et les liaisons chimiques qu'ils forment avec d'autres atomes n'ont pas la même stabilité. Ces variations sont infimes, mais suffisent pour que l'un des deux isotopes soit préférentiellement assimilé ou éliminé par certains organismes vivants. Ce phénomène de «fractionnement isotopique» est limité dans les plantes, qui assimilent l'azote de l'environnement, contenu notamment dans les nitrates et dans l'ammoniaque issu des matières organiques en décomposition, en conservant les proportions «naturelles» des deux isotopes.

En revanche, chez les animaux, les proportions d'isotope 15 sont plus élevées que dans leurs aliments d'origine végétale: l'organisme excrète proportionnellement plus d'azote 14 que d'azote 15 sous forme d'urée. Cet enrichissement en azote 15 a lieu lors de la réaction de transamination (l'échange d'un groupement amine) entre certains acides aminés, qui joue un rôle important dans la dégradation de ces acides et dans la libération d'ammoniaque, précurseur de l'urée.

Ainsi, les protéines des bovins contiennent davantage d'azote 15 que l'herbe qu'ils mangent. L'enrichissement se poursuit au fil de la chaîne alimentaire: l'homme est plus «riche» en

Jean-Michel Thiriet



azote 15 que les bovins. Plus la chaîne alimentaire contient de carnivores, plus le dernier maillon est riche en azote 15: la source d'azote étant toujours plus riche en isotope 15, le mécanisme d'enrichissement se renforce à chaque étape. Ainsi, les protéines des bovins qui ont mangé des farines carnées contiennent davantage d'azote 15 que celles des bovins qui n'ont mangé que des produits d'origine végétale. Ce phénomène est utilisé en archéologie depuis une vingtaine d'années pour déterminer le régime alimentaire de populations humaines ou animales anciennes. On a ainsi découvert que certains hommes de Néandertal consommaient essentiellement de la viande d'herbivores.

Le test est simple: on utilise un spectromètre de masse «isotopique», qui ionise les molécules d'azote issues de la combustion des protéines analysées. Les ions formés passent dans un champ électro-magnétique qui les dévie plus ou moins en fonction de leur masse, de sorte que l'on distingue ceux qui contiennent de l'azote 14 et de l'azote 15. Toutefois, pour interpréter les résultats, on doit connaître l'environnement des animaux, car divers facteurs, tels que l'utilisation d'engrais ou l'altitude, influent sur les proportions isotopiques de l'azote dans la nature. D'après les signatures isotopiques de l'azote mesurées sur les tissus des bovins, on ne pourra conclure qu'ils ont été nourris avec des farines carnées que si l'on établit au préalable des tables de valeurs «normales», valables pour les bovins nourris exclusivement avec des produits végétaux, et cela, pour chaque zone d'élevage.

L'analyse isotopique pourrait servir à vérifier si les farines animales ont réellement cessé d'être utilisées, et à quel moment elles ont été supprimées. Reste à trouver qui paiera pour mettre en œuvre ce test susceptible de redonner aux consommateurs l'envie de manger, sans crainte, de la viande de bœuf, et de restaurer une confiance qu'ils ont, en partie, perdue.

Hervé BOCHERENS, Université Paris 6, Laboratoire de biochimie isotopique