

TRIBUNE DES LECTEURS

La mer et le salé

Dans *La catastrophe du Bosphore* (voir *Pour la Science*, juin 2001), Gilles Lericolais invoque un influx réduit d'eau douce dans la mer Noire dû aux glaciations pour expliquer la fermeture de celle-ci à certains moments de son histoire. Toutefois, la découverte de la mer Noire comme lac d'eau douce pose problème dans ce contexte. Pourquoi, une fois séparée de la Méditerranée, la mer Noire aurait-elle vu sa salinité baisser? Comment le sel s'évacuait-il? Peut-être ne s'est-il pas évacué, mais seulement dilué dans un plus grand volume d'eau. Cependant, la variation de volume d'eau de la mer Noire est faible, car le niveau est limité par la hauteur du Bosphore. De plus, dans cette hypothèse, les conditions lacustres auraient prévalu en surface et pas en profondeur. À long terme, les fleuves d'eau douce amènent des minéraux et augmentent le contenu en sel. Il faut donc penser à un mécanisme de drainage du sel de la mer Noire soit ponctuellement lors de sa séparation de la Méditerranée, soit peut-être en permanence par écoulement dans une Méditerranée fermée de l'Atlantique, dont le niveau aurait baissé par évaporation.

Reinhold BRUECKNER, Orléans

Réponse de Gilles Lericolais

Les études de la sédimentation montrent que la mer Noire a connu l'eau douce à plusieurs reprises au cours du Quaternaire (depuis 2, 5 millions d'années) et que ces périodes alternent avec des conditions saumâtres équivalentes à celle que nous connaissons aujourd'hui (salinité de 18 pour mille, moitié moins qu'un océan). Comment expliquer cet état de faits? Et pourquoi la mer Noire, la mer Caspienne et la mer d'Aral n'ont-elles pas les mêmes conditions de salinité? Pour cela, il faut remonter à plus de 200 millions d'années. Au début du Jurassique, sur l'emplacement de la chaîne alpine, existait un vaste océan (la Téthys) s'ouvrant vers le Pacifique. La mer Noire est un bassin formé lors d'une subduction vers le Nord de la Téthys qui sera comblé par d'épaisses séries sédimentaires atteignant 15 kilomètres d'épaisseur. Ensuite, jusqu'à la fin du Secondaire, l'océan téthysien se ferme sous l'action de la collision entre les plaques arabe et eurasiennne donnant naissance à une suite de bassins sédimentaires d'axe Est-Ouest s'étendant de l'Autriche-Hongrie à l'Asie centrale, isolant ainsi au Crétacé supérieur (96 à 65 millions d'années) la mer Paratéthys. Au Tertiaire, cette mer regroupant la mer Noire et la mer Caspienne s'isole de l'océan; l'apport des fleuves en eau douce préserve de l'évaporation ce vaste ensemble et en dimi-

nue la salinité. Les grandes variations glaciaires, jouant sur la calotte de l'hémisphère Nord et qui débutent dès la fin du Pliocène (vers 3,2 millions d'années), affectent une grande partie de l'Europe et de l'Ouest sibérien. Au gré des cycles glaciaires/interglaciaires, la sédimentation de la mer Noire est alternativement lacustre et marine (selon que le Bosphore permet ou non les échanges avec la Méditerranée et l'océan global). En effet, la mer Noire est le réceptacle des plus grands fleuves d'Europe, qui lors des périodes glaciaires sont alimentés par de nombreux fleuves supplémentaires, coulant actuellement vers le Nord (Elbe, Vistule...), le cours de ces fleuves étant dévié par la calotte glaciaire descendant jusqu'aux rives de la Pologne. La mer Noire reçoit une importante quantité d'eau douce lors des périodes glaciaires et au moment de la fonte. Cet apport diminue à partir du moment où la calotte glaciaire libère les mers du Nord, Baltique, Blanche et de Kara. Donc au cours des périodes froides, le niveau des mers et des océans baisse, isolant notamment la mer Noire; celle-ci est alimentée par de nombreux cours d'eau lui apportant un flux d'eau douce important. Les périodes froides ont toujours été plus longues que les périodes chaudes, et les périodes de fonte produisent énormément d'eau douce. On comprend très bien que depuis trois millions d'années le bilan soit en faveur de l'eau douce. Nous sommes actuellement en période chaude, la mer Noire est connectée à la Méditerranée et, pourtant, la salinité de la mer Noire n'est que de 18 pour mille (elle est saumâtre!). Dès la reconnexion, un jeu de densités se produit également, les eaux salées plus lourdes tombent au fond et l'eau douce initiale de la mer Noire se retrouve en surface.

Oubli du plan incliné belge

Dans l'article *La poussée d'Archimède* de Roland Lehoucq et Jean-Michel Courty (voir *Pour la Science*, juin 2001), les auteurs indiquent, dans la légende de la deuxième figure, que le «plan incliné» de Saint-Louis-Arzviller, en Lorraine, est unique en son genre en Europe. Cette affirmation doit être nuancée. Le plan incliné de Ronquières, en Belgique (sur le canal Charleroi - Bruxelles), fonctionne sur le même principe depuis plusieurs dizaines d'années. Il est même plus important que son voisin de Lorraine. La différence de niveau est de 68 mètres contre 44. Les bateaux transportés peuvent peser 1 350 tonnes contre 900. Ce plan incliné a une particularité : le contrepoids est constitué par un second bac, si bien qu'il est possible de faire, en même temps, monter et descendre des bateaux.

Paul GOUVERNEUR,
Mont-Saint-Guibert (Belgique)

Fin d'une Lune de miel?

C'est avec intérêt que j'ai lu *Les libérations de la Lune* de Eric Bois (voir *Pour la Science*, juillet 2001). Cet article laisse toutefois quelques questions sans réponse : est-ce que la Lune s'éloigne de la Terre depuis la création du couple Terre-Lune? L'accélération de la Lune est-elle constante (quand la lune était plus proche, l'effet était-il plus important)? L'énergie nécessaire à l'accélération de la Lune est-elle prise sur l'énergie de rotation de la Terre et, en conséquence, la Terre tourne-t-elle de moins en moins vite?

Louis WILMES,
Weiler-la-Tour (Luxembourg)

Réponse de Éric Bois

Le mécanisme d'accélération séculaire de la Lune s'effectue à énergie totale constante du système Terre-Lune. La rotation synchrone de la Lune fut très probablement atteinte progressivement à cause des forces de friction développées par les marées, mais elle n'est pas nécessaire pour la mise en place du mécanisme en question. En revanche, il est nécessaire qu'il y ait des forces de marées exercées par la Lune sur la Terre, de telle sorte qu'il se forme un bulbe à l'équateur terrestre en avance sur la direction Terre-Lune. Un bulbe situé exactement selon la direction Terre-Lune ne provoque aucun effet séculaire. C'est l'angle entre la direction du bulbe et la direction Terre-Lune qui est le paramètre décisif dans l'intensité du mécanisme.

En conséquence directe de ce mécanisme lié aux marées, il se produit un ralentissement séculaire de la rotation de la Terre sur elle-même. Toutefois, à force d'éloignement de la Lune, il arrivera une distance Terre-Lune critique où l'action du Soleil viendra «contrarier» le mécanisme d'accélération séculaire de la Lune. D'un autre côté, en extrapolant ce mécanisme et son corollaire sur la rotation terrestre, toutes choses étant égales par ailleurs, on est conduit à imaginer un moment où, à force de ralentissement de la rotation de la Terre, la durée du jour terrestre deviendrait égale à la durée du mois lunaire. La Terre tournant sur elle-même dans la même période de temps que la Lune autour de la Terre, il ne pourrait donc plus y avoir d'avance du bulbe et par conséquent d'éloignement séculaire de la Lune.

Écrivez à *Pour la Science* vos réactions, vos commentaires et vos réflexions sur l'actualité scientifique et vos relations avec la science. L'adresse de *Pour la Science* sur Internet est : tribune@pourlascience.fr. Découvrez d'autres contributions de lecteurs sur le site Web www.pourlascience.com.



Le secret du pain

HERVÉ THIS

Les chimistes déterminent, à fin d'améliorations, les liaisons entre les protéines qui forment le réseau de notre bonne vieille pâte à pain.

Les constituants de la farine de blé sont les clefs du succès du pain : à côté des grains d'amidon, qui gonflent quand ils sont chauffés en présence d'eau, des protéines forment, lors du pétrissage, un réseau nommé gluten. Pour améliorer le pain, il est intéressant d'étudier les associations de ces protéines. Comment les forces entre les protéines contribuent-elles aux propriétés mécaniques de la pâte à pain ? On savait que des liaisons entre des atomes de soufre portés par des protéines contribuent à la structuration du gluten ; on a découvert que d'autres forces y participent aussi.

La qualité d'un pain dépend de celle du gluten, d'où la nécessaire maîtrise de la réticulation des protéines, c'est-à-dire de l'établissement de liaisons entre ces molécules. Le gluten est un réseau « viscoélastique » : étiré, il s'allonge, puis reprend partiellement sa forme initiale quand on supprime la tension. La panification n'est possible que grâce au gluten : quand les levures dégagent des bulles de dioxyde de carbone, le volume de la pâte augmente et le réseau de protéines du gluten préserve la forme en boule de la pâte en retenant les bulles de gaz.

En 1745 déjà, le chimiste italien Jacopo Beccari a montré que l'on extrait le gluten en malaxant de la farine avec un peu d'eau, puis en passant le pâton formé sous un filet d'eau ; l'eau entraîne les grains blancs de l'amidon, laissant le gluten entre les doigts. Les chimistes ont montré que seules certaines protéines insolubles du blé contribuent au réseau du gluten : les prolamines.

Ces prolamines sont de deux types : les gliadines, qui ne sont composées que d'une seule chaîne protéique (un enchaînement d'acides aminés) et les gluténines, qui sont de gros édifices composés de plusieurs sous-unités protéiques liées par des ponts disulfure (entre deux atomes de soufre). Ces ponts disulfure relient-ils aussi les gluténines entre elles ? Selon une conception classique, le pétris-

sage établit des ponts disulfure supplémentaires entre les diverses prolamines, ponts qui se rompent et se reforment à mesure que le boulanger travaille la pâte.

Les gluténines ont une partie centrale (entre 440 et 680 acides aminés) formée de courtes séquences répétées, flanquées de deux domaines terminaux. La taille du domaine central détermine la masse moléculaire des gluténines ; les domaines terminaux contiennent des cystéines, acides aminés qui portent les atomes de soufre susceptibles de former les ponts disulfure. Toutefois les caractéristiques chimiques des gluténines n'expliquaient pas bien leurs capacités à faire le gluten.

Il y a quatre ans, l'équipe de Jacques Guéguen, à l'INRA de Nantes, avait montré que les prolamines pouvaient se lier par des « liaisons dityrosine » (la tyrosine est un acide aminé dont la chaîne latérale est composée d'un groupe CH_2 , d'un noyau benzénique et d'un groupe hydroxyle $-\text{OH}$). Sur la base de ces travaux, Katherine Tilley et ses collègues de l'Université du Kansas ont récemment démontré l'importance des liaisons dityrosine dans le gluten. Dans des pâtes à pain, à divers stades du pétrissage, ils ont extrait, dissocié et analysé par voie chimique le gluten de la farine pétrie, et ont trouvé que les concentrations en dityrosine augmentent lors du pétrissage. La question était posée : quel rôle jouait la dityrosine dans la structuration du gluten ?

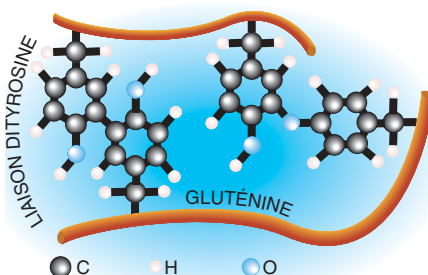
Une analyse approfondie a montré l'existence de deux types de liaisons dityrosine : dans la dityrosine, les deux groupes benzéniques sont liés par le carbone voisin du groupe hydroxyle $-\text{OH}$;

dans l'isodityrosine, un atome d'oxygène d'un groupe hydroxyle d'une tyrosine se lie au carbone voisin du groupe hydroxyle sur l'autre tyrosine.

La découverte agite la communauté des chimistes du gluten. Pour les biochimistes, ces liaisons dityrosine sont communes entre les protéines végétales, dont les séquences et les structures ressemblent à celles des gluténines ; ils connaissent aussi l'existence de ces liaisons dans les protéines, nommées résiline, des insectes et des arthropodes, et dans l'élastine et le collagène des vertébrés. Ainsi le boulanger reproduit-il le vivant en formant des liaisons dityrosine lors du pétrissage.

D'autre part, l'équipe de Nantes a observé que les liaisons dityrosine s'établissent en présence d'enzymes (péroxydases) naturellement présentes dans la farine. Le long travail de la pâte, lors de la confection du pain, a-t-il pour rôle de faire réagir les enzymes avec les gluténines et à leur donner le temps d'établir les liaisons dityrosine ? Quelles sont les parts respectives des dityrosines et des ponts disulfures dans la structuration du gluten ?

À quoi sert la détermination de ces liaisons ? À perfectionner les additifs, employés soit pour faciliter le pétrissage soit, au contraire, pour intensifier la formation du gluten : quand des composés oxydants tels l'acide ascorbique ou le bromate de potassium sont ajoutés aux pâtes à pain, le nombre de liaisons dityrosines formées augmente ; on pensait que ces additifs favorisaient la formation des ponts disulfure, mais peut-être forment-ils aussi des liaisons dityrosine. On imagine ainsi des méthodes de sélection des blés à gluten : suffirait-il de doser les dityrosines pour estimer la valeur des glutens ?



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