

Géologie

Il y a de l'or partout !

Saviez-vous que nous avons partout de l'or sous les pieds ? Le problème est que les roches n'en renferment qu'un milligramme par tonne en moyenne. Sauf dans les gisements, où le métal est jusqu'à mille fois plus concentré. Une équipe dirigée par Gleb Pokrovski, directeur de recherche CNRS au laboratoire Géosciences environnement Toulouse, a reconstitué leur formation et déduit qu'ils sont bien plus fréquents qu'on ne le croyait !

façon générale : celles où le terme de rang $(n + m)$ est égal au produit des termes de rang n et de rang m , où n et m sont sans diviseurs communs. Ces suites sont intéressantes, car il existe des relations entre la suite principale et toutes les sous-suites. Ainsi, si la suite principale vous empêche de tomber dans le ravin (de dépasser le nombre K), il existe toute une liste de sous-suites qui vous empêchent de tomber dans le ravin.

Ces suites « multiplicatives » sont fréquentes en théorie des nombres. Elles apparaissent par exemple dans la fonction de Liouville qui est reliée aux nombres premiers. Elles ont été intensivement étudiées, mais certaines propriétés fondamentales restaient à éclaircir. En janvier 2015, un pas important a été franchi. Kaisa Matomäki, de l'université de Turku, en Finlande, et Maksym Radziwiłł, de l'université Rutgers, aux États-Unis, ont prouvé l'existence de relations surprenantes entre des moyennes à petite et grande échelle dans une suite multiplicative. Terence Tao a compris que ce résultat pouvait servir à prouver la conjecture d'Erdős, et l'a utilisé pour ce faire.

Ce résultat est extraordinaire à plus d'un titre. Il met en lumière le rôle des travaux collaboratifs tels que le projet *Polymath* dans de nombreux problèmes mathématiques. Il souligne aussi la performance d'un individu qui a pu trouver une démonstration générale alors que les ordinateurs, même les plus puissants, ne pouvaient vérifier que des cas particuliers.

Sean Baillly

T. Tao, soumis à *Discrete Analysis*, en ligne sur *arXiv*, 25 septembre 2015
<http://arxiv.org/abs/1509.05363>

Où se trouvent les gisements d'or connus ?

Gleb Pokrovski : Un peu partout dans le monde, mais surtout dans les montagnes. Les gisements se forment en effet grâce à des fluides hydrothermaux, qui extraient l'or des roches de la croûte terrestre et le transportent jusqu'à un lieu où il précipite. Or ces fluides ne circulent que dans les zones géologiques assez actives, en général là où les plaques tectoniques se rencontrent, formant des montagnes et des volcans.

Pourquoi considérerait-on la formation des gisements comme difficile ?

G. P. : L'or est un métal très inerte, qui se lie à peu d'espèces chimiques. De ce fait, il est difficile à extraire des roches. On ne connaissait que quelques éléments des fluides hydrothermaux capables de le dissoudre, tel l'ion chlorure Cl^- , et encore en faible quantité. Il fallait alors évoquer des hypothèses improbables pour expliquer les gisements : un volume de fluides hydrothermaux équivalent à celui des océans ou la présence de magmas ou de roches préconcentrés en or dans les profondeurs terrestres. Nous avons montré qu'un autre composé des fluides hydrothermaux, l'ion trisulfure S_3^- , est capable de transporter beaucoup

plus d'or, ce qui rend ces hypothèses superflues.

Pourquoi cet ion était-il passé inaperçu jusqu'à présent ?

G. P. : Car dans les fluides hydrothermaux trouvés en surface, il se transforme en d'autres composés, en raison des plus faibles pressions et températures. Nous n'avons découvert sa présence dans les fluides profonds qu'en 2010, en reproduisant les conditions thermodynamiques des profonds



Gleb Pokrovski, directeur de recherche au CNRS.

deurs (plusieurs centaines d'atmosphères et de degrés celsius) dans des récipients de quelques dixièmes de millimètre de diamètre.

Et comment avez-vous montré que cet ion se lie à l'or ?

G. P. : Grâce à la spectroscopie par rayons X, nous avons d'abord montré que des ions trisulfure entourent l'or dans des fluides modèles comprimés et chauffés. Nous avons ensuite simulé sur ordinateur les mouvements et les interactions d'une centaine de molécules dans les fluides hydrothermaux.

Ces simulations ont confirmé que l'or se lie à l'ion trisulfure. Enfin, nous avons montré, par des mesures de solubilité et des calculs thermodynamiques, qu'un fluide hydrothermal riche en S_3^- est capable de dissoudre assez d'or pour former un gisement.

Vos travaux permettent-ils de localiser les gisements d'or ?

G. P. : Pas encore, car la formation de gisements dépend de nombreux autres paramètres : la roche doit être assez perméable pour que les fluides hydrothermaux s'y écoulent, l'or doit pouvoir précipiter, etc. On ne sait donc pas dire où exactement ces conditions se produisent. Mais la bonne nouvelle est que les gisements sont bien plus fréquents qu'on ne le pensait. Avec le processus que nous avons découvert, nul besoin d'invoquer des conditions ultraparticulières pour leur formation. Les ions trisulfure devraient dissoudre l'or un peu partout, même si les gisements qui affleurent sont concentrés dans les montagnes. On estimait auparavant que les gisements exploitables ne contenaient qu'un millionième de tout l'or de la croûte terrestre. Une estimation à revoir à la hausse.

Guillaume Jacquemont

G. S. Pokrovski et al., *PNAS*, en ligne le 12 octobre 2015

Chimie

Trois pionniers de la réparation de l'ADN

Tomas Lindahl, Paul Modrich et Aziz Sancar ont été récompensés pour la description de trois mécanismes moléculaires clés mis en œuvre dans la cellule pour réparer l'ADN.

L'ADN, qui porte une bonne part du code génétique d'une cellule, n'est pas aussi stable qu'on pourrait le penser. Que ce soit de façon spontanée, sous l'effet d'une perturbation (rayonnement ultraviolet, radicaux libres...) ou durant la réplication de l'ADN lors de la division cellulaire, il s'y produit des mutations en permanence. En général, la cellule corrige ces erreurs et elles passent inaperçues. Les trois lauréats – Tomas Lindahl, de l'institut Francis Crick et du laboratoire Clare Hall, au Royaume-Uni, Paul Modrich, de l'institut médical Howard Hughes et de l'école de médecine de l'université Duke, aux États-Unis, et

visible la relançait. Il existait donc un mécanisme qui, activé par la lumière, réparait les cellules endommagées.

Les biologistes ont peu à peu compris que tout se passait au niveau de l'ADN – les dégâts dus aux ultraviolets et les réparations photo-activées – et que la lumière réparatrice devait modifier l'ADN en activant une réaction enzymatique. Dans les années 1960, notamment, on perçoit que les réparations se font par suppression des constituants endommagés de l'ADN – on les nommera plus tard réparations par excision de nucléotides.

En 1966, chez la bactérie, trois gènes sont identifiés qui,

Entre-temps, au début des années 1970, Tomas Lindahl a ajouté une pierre à l'édifice. Il a montré que même sans ultraviolets, même sans agression extérieure, l'ADN n'est pas stable et se modifie. Spontanément, diverses réactions peuvent s'y produire : oxydation, méthylation, désamination... Ces réactions perturbent les constituants de l'ADN – les nucléotides et, plus spécifiquement, les bases A, T, G, C qui en forment le noyau dur et les distinguent les uns des autres –, ce qui augmente le risque de mutation. Tomas Lindahl a même identifié un mécanisme fréquent dans les cellules, qui conduit d'une de ces réactions à

le mécanisme chez la bactérie, puis dans les cellules humaines. Celui-ci ressemble à une chaîne de production : une enzyme détecte une base endommagée et désentortille l'ADN à cet endroit, ce qui éjecte la base. Une autre enzyme coupe l'ADN à l'endroit mutilé, et une troisième vient nettoyer le trou et le combler. Une quatrième signale l'assemblage et aide la troisième à quitter les lieux.

Parallèlement, au cours des années 1970, les biologistes comprennent aussi que même pendant la réplication de l'ADN, lors de la division cellulaire, des erreurs de copie se produisent et sont corrigées, par un mécanisme que l'on nomme réparation de mésappariements. Paul Modrich explicite le mécanisme dans les années 1980 grâce à un test *in vitro*, hors des cellules, qu'il a mis au point.

La machinerie comporte elle aussi plusieurs enzymes : l'une d'elles repère l'erreur sur l'ADN et s'y lie, une autre lui indique sur quel brin d'ADN se trouve le problème (lorsqu'il se réplique, l'ADN forme deux brins enlacés – le brin répliqué et sa réplique –, et seule la réplique porte l'erreur), d'autres encore coupent le brin, l'écartent et le « réécrivent » correctement...

Toutes ces découvertes faites chez les bactéries ont depuis eu leurs pendantes dans les cellules de mammifères. Elles ont mis en évidence la multiplicité des mécanismes en œuvre dans les cellules pour réparer l'ADN et ont notamment permis de mieux comprendre le lien entre plusieurs maladies, telles que certaines formes héréditaires de cancer colorectal, et des mutations sur des enzymes clés pour ces mécanismes.

Marie-Neige Cordonnier

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2015/



La cellule corrige en permanence les erreurs apparaissant sur l'ADN, tel ce nucléotide anormal.

Aziz Sancar, de l'université de Caroline du Nord – ont chacun explicité un des mécanismes moléculaires qui permettent à la cellule d'effectuer ces corrections.

L'histoire a probablement commencé à la fin des années 1940, quand on s'est aperçu que les cellules étaient capables de se réparer. Albert Kelner, aux États-Unis, étudiait comment les bactéries réagissaient à une exposition aux ultraviolets (on savait déjà que les ultraviolets peuvent tuer les cellules). Il observa que les ultraviolets interrompaient leur croissance, mais que la lumière

lorsqu'ils sont défectueux, empêchent les cellules de se réparer après une exposition aux ultraviolets. Reste à savoir comment ils fonctionnent. Dans les années 1970, Aziz Sancar met au point une technique qui lui permet d'identifier les protéines codées par ces trois gènes et leurs fonctions. Le mécanisme qu'il explicite en 1983 est bien une histoire d'excision : les enzymes repèrent la région endommagée, la coupent et l'éliminent, tandis qu'une autre enzyme vient réécrire la partie manquante de l'ADN.

une mutation de l'ADN. Or cette mutation n'est pas quelconque : une base C se transforme en une base... U, pourtant absente du code de l'ADN. Cela signifie donc que la cellule corrige cette erreur. Tomas Lindahl se convainc lui aussi que le mécanisme en jeu dans ce type de réparation est une réaction enzymatique.

Les découvertes s'enchaînent alors. En 1974, il découvre une première enzyme chez les bactéries, puis toute une famille qui orchestre ce qui devient le mécanisme de réparation par excision de base. Il reconstitue