

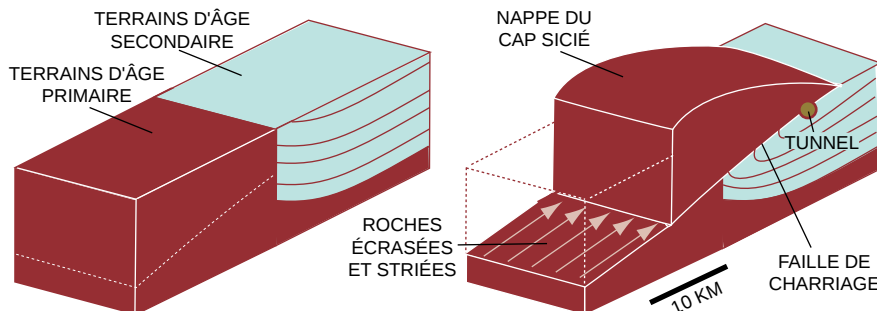
La faille du tunnel de Toulon

L'analyse géologique aurait dû être adaptée au problème posé.

Après chaque catastrophe, un expert prétend qu'il avait mentionné la possibilité du péril, et qu'il n'a pas été écouté. Mais quel est l'expert en experts qui choisit les experts ? Il est des instances où des spécialistes différents des experts choisis n'ont, à tort, pas été consultés. Tel a été le cas, me semble-t-il, de l'évaluation du risque lié au tunnel autoroutier de Toulon.

La construction de ce tunnel de dix mètres de hauteur vient d'être arrêtée à la suite d'un éboulement. Le surcoût associé serait de 600 millions de francs : de difficiles négociations détermineront qui va payer.

Or la structure géologique des environs de Toulon était connue. Son interprétation est délicate, mais elle a été élucidée par un modèle proposé le siècle dernier, et un débat en 1963 à la Société géologique de France a éclairé la question. Pour comprendre cette structure, remontons 40 millions d'années : à cette époque, la plaque ibérique s'est rapprochée de l'Europe en provoquant, par compression, la formation



Charriage de terrains anciens (Nappe du Cap Sicié) sur des terrains plus récents.

de la chaîne des Pyrénées qui se prolongeait à l'époque en Méditerranée et passait au Sud de Toulon. L'écorce terrestre s'est cassée et un compartiment de quelques centaines de kilomètres cubes s'est avancé d'au moins dix kilomètres vers le Nord. Ce phénomène tectonique relativement banal a évidemment eu d'importantes conséquences mécaniques sur les roches le long de la faille de charriage.

Les bouleversements ont été spectaculaires, car ils ont amené des roches schisteuses d'âge primaire (appartenant à la vieille chaîne hercynienne) sur des sédiments d'âge secondaire beaucoup plus jeunes. Ce chevauchement ne se fait pas selon un plan net, mais sur une épaisseur d'une centaine de mètres, elle-même découpée par de nombreuses failles secondaires.

Les propriétés mécaniques des roches ont été modifiées : le matériau est instable, «manque de tenue», d'autant que la composition des terrains est à dominante argileuse et les accidents dans ce type de substrat sont fréquents.

Or le tunnel construit à Toulon traverse la zone de la faille de charriage. Ainsi le responsable de la catastrophe est clairement «la faille de chevauchement de la nappe du Cap Sicié».

L'exemple tragique, mais heureusement en termes financiers seulement, montre que les considérations géotechniques, tout à fait indispensables dans ce type d'ouvrages, doivent être précédées par une étude géologique minutieuse. Dans ce cas extrême, des géologues structuraux spécialisés auraient pu prévoir la grande complexité du sous-sol toulonnais et attirer l'attention des entreprises et du maître d'œuvre sur les difficultés à attendre.

Depuis 20 ans, un «Comité technique des grands barrages» contrôle les étapes de la construction des barrages. Il a montré son efficacité. Je recommanderais bien

volontiers la création d'un comité indépendant de même nature pour les tunnels. En profitant des compétences des géologues.

Le chantier de Toulon est une nouveauté : c'est le premier exemple d'un tunnel à si faible profondeur dans des terrains très perturbés et, de surcroît, sous une ville. C'est un miracle que l'effondrement du tunnel n'ait fait aucune victime. La faille était double : géologique et de raisonnement. Aujourd'hui l'homme réalise des travaux de plus en plus ambitieux, défiant les pièges de la nature. La leçon de Toulon sera retenue.

Maurice MATTAUER



Carotte de sondage dans les gypses du Trias (220 millions d'années) dans la région de Toulon. Ces gypses se trouvent sous des terrains du Permien (250-270 millions d'années), du Carbonifère (290-300 millions d'années) et du Paléozoïque (400-550 Ma).

Bactéries thermophiles

Ces enzymes résistent aux températures et aux pressions élevées.

Des sources hydrothermales sous-marines, dont certaines sont nommées «fumeurs noirs», jaillit une eau dont la température varie entre 100 et 400 °C. Autour de ces fumeurs noirs, les organismes adaptés aux conditions extrêmes abondent. Guy Hervé et son équipe du Laboratoire de biochimie des signaux régulateurs cellulaires et moléculaires étudient les bactéries hyperthermophiles, dont les enzymes résistent aux températures élevées.

Parmi les micro-organismes proches des fumeurs noirs, vivent des archéobactéries, que certains biologistes considèrent comme des bactéries primitives, ancêtres des bactéries actuelles. Au contraire, d'autres pensent que ce sont des bactéries très évoluées, ayant acquis

BRÈVES

Les Amazones

Hérodote mentionne l'existence, au Nord de la mer Noire, d'une tribu de femmes guerrières, les Amazones. L'historien ayant mêlé des récits non vérifiés à des observations personnelles, on doutait de l'existence de ces femmes représentées sur le

Parthénon. Près de la ville russe de Pokrovka, Jeanne Davis-Kimball et ses collègues russes ont trouvé, dans sept tombes de femmes, les objets utilisés par les guerriers : des

pointes de flèches en bronze, de courtes dagues et de longues épées, dont les poignées sont plus petites que celles des armes analogues de la même époque. Toutes les femmes des tribus où vivaient ces Amazones (entre le VI^e et le II^e siècle avant notre ère) n'étaient apparemment pas guerrières : 33 autres tombes ne contenaient que des aiguilles et des billes de verre.



J. Davis-Kimball

Le béton conducteur

Des scientifiques de l'Institut de recherche pour la construction, à Toronto, ont mis au point un béton conducteur, résistant et de faible coût. Obtenue par injection de matériaux conducteurs de la chaleur et de l'électricité dans le mélange, ce béton permet la diffusion uniforme de chaleur dans une maison ou, utilisé dans le revêtement des routes, évite leur enneigement. Une dalle test, reliée à une source électrique, a été soumise au rigoureux hiver d'Ottawa : elle n'a été recouverte ni de neige, ni de givre.

La molécule anti-graisses

Des souris qui ont un régime très riche en graisses, mais dont le gène *ucp2* est fortement exprimé, ne deviennent pas obèses : les protéines produites par ce gène (isolé par Daniel Riquier et ses collègues) permettent aux souris de brûler les graisses alimentaires au lieu de les accumuler. Cette protéine opère dans les mitochondries, les « usines » cellulaires qui fabriquent les substances énergétiques de l'organisme. La protéine a peut-être la même fonction chez l'homme, ce qui en fait un agent anti-obésité potentiel.

Suite page 24



Guy Hervé - PREMIER

Les archéobactéries vivent à proximité des sources océaniques chaudes, tel ce fumeur noir.

la capacité de se développer dans des conditions défavorables. Le groupe de G. Hervé s'intéresse surtout à *Pyrococcus abyssi*, une archéobactérie hyperthermophile dont les conditions de croissance favorites sont une température de 96 °C et une pression de 250 atmosphères.

Comme les bactéries « usuelles », les archéobactéries sont pourvues d'enzymes. Les biochimistes ont choisi d'en étudier deux, qui interviennent dans la synthèse des précurseurs des acides nucléiques (l'ADN et l'ARN) : la carbamyl phosphate synthétase et l'aspartate transcarbamylase ; ils les ont comparées aux enzymes homologues de la bactérie *Escherichia coli*. Les enzymes de *Pyrococcus abyssi* sont très stables : elles supportent d'être chauffées à 96 °C pendant trois heures, en conservant 100 pour cent de l'activité pour l'aspartate transcarbamylase ou 50 pour cent pour la carbamyl phosphate synthétase ; dans les mêmes conditions, les enzymes d'*Escherichia coli* sont inactivées en quelques secondes. En outre, les enzymes de *Pyrococcus abyssi* sont aussi efficaces à 96 °C que celles d'*Escherichia coli* à 37 °C.

Les structures et le fonctionnement des enzymes des archéobactéries et de *Escherichia coli* sont-ils comparables ? Les chaînes protéiques ont des compositions semblables. De *Escherichia coli* à l'homme, la carbamyl phosphate synthétase est constituée de deux parties homologues. Ces enzymes résultent de la duplication d'un gène initial dont les deux produits ont été assemblés par une séquence de liaison. Chez *Pyrococcus abyssi*, la protéine homologue correspond à la moitié de la molécule des autres espèces. Il s'agit sans doute d'une enzyme fossile, précurseur des autres

carbamyl phosphate synthétases, codée par un gène qui s'est dupliqué ultérieurement au cours de l'évolution. La duplication de ce gène semble renforcer l'hypothèse stipulant que les archéobactéries seraient les ancêtres des bactéries actuelles.

L'aspartate transcarbamylase est constituée de deux types de chaînes : les unes fixent le substrat sur lequel elles agissent (ce sont les chaînes catalytiques), les autres modulent la réaction enzymatique (ce sont les chaînes régulatrices). L'enzyme de *Pyrococcus abyssi* contient des séquences de ces deux types de chaînes. D'après une modélisation moléculaire, les enzymes auraient des structures similaires, mais celle de *Pyrococcus abyssi* contient deux fois plus d'acides aminés chargés que la protéine homologue de *Escherichia coli*. Ces acides aminés chargés établissent sans doute des ponts ioniques entre les molécules, qui stabilisent l'enzyme à haute température.

La panoplie des archéobactéries disponibles commence à s'étoffer et l'on s'intéresse à une autre bactérie hyperthermophile, *Pyrococcus furiosus*, qui se développe aussi à 96 °C, mais à la pression atmosphérique, ainsi qu'à d'autres bactéries, dites psychrophiles, adaptées au froid et provenant de l'Antarctique. Cette stabilité thermique ouvre de nouvelles perspectives techniques. Deux exemples illustrent l'intérêt de disposer de telles enzymes : dans la méthode d'amplification des gènes, ou PCR, l'enzyme employée doit résister à près de 100 °C (elle est extraite d'une bactérie des sources chaudes) ; les industriels qui fabriquent des lessives recherchent des lipases – des enzymes dégradant les graisses – qui résisteraient aux températures élevées.

Marie-Thérèse LANDOUSY