

Effondrement

L'article de Maurice Mattauer *La faille du tunnel de Toulon* (voir *Pour la Science*, avril 1997) comporte des appréciations inexacts. La complexité de la structure géologique du site avait été identifiée dès les premières études du projet de traversée souterraine de Toulon. Le grand chevauchement signalé par M. Mattauer a donc bien été pris en compte.

À chacun des stades d'avancement des études, des sondages de reconnaissance ont été réalisés pour dresser la coupe géologique complète du tunnel : un sondage tous les 40 mètres en moyenne. Deux galeries de reconnaissance ont été creusées. Les géologues de l'administration ont, en outre, fait appel aux spécialistes de l'Université de Marseille pour l'interprétation de toutes ces données.

De même, les caractéristiques mécaniques des terrains ont été appréciées par des essais en laboratoires, des essais *in situ* et l'analyse classique du comportement des galeries de reconnaissance (étude de la déformation de la galerie, des tassements, et mesure des contraintes). Ce n'est donc pas dans la méconnaissance des terrains et de leurs caractéristiques qu'il faut rechercher les causes de l'effondrement du tunnel de Toulon.

C. LEYRIT, Ministère de l'équipement, du logement, des transports et du tourisme

Réponse de M. Mattauer

À lire la réponse de C. Leyrit, on pourrait croire que les études ont été très bien menées et que tout a été pris en compte. Et le tunnel lui-même ne sait pas pourquoi il s'est si bêtement écroulé en pleine ville.

La réalité est hélas bien différente. Il est faux de dire que le grand chevauchement de la nappe du Cap Sicié avait été envisagé et localisé sur le tracé du tunnel. En effet, le dossier géologique mis à la disposition des entreprises, dans la phase de consultation avant travaux, proposait deux hypothèses structurales, fort éloignées l'une de l'autre, pour expliquer la géologie complexe du sous-sol toulonnais. La première hypothèse, la plus argumentée dans le dossier, mettait en avant une tectonique simple à composante verticale, avec failles subverticales, tout à fait irréaliste et en contradiction totale avec le contexte régional.

La deuxième hypothèse envisageait l'existence d'une nappe de charriage, mais d'une façon théorique et seulement en quelques lignes, sans la moindre localisation sur le terrain et sans aborder les conséquences possibles sur la qualité des terrains intéressés par le tunnel.

Ce n'est que trois mois avant l'effondrement que des sondages profonds ont été réalisés sous le niveau du tunnel ; c'est l'intervention d'un très bon expert en géologie structurale qui, un mois avant, a permis la mise en évidence de ce chevauchement, sans équivoque, et qui a découvert l'empilement de plusieurs écaillés de charriages apparaissant en série inverse, les terrains les plus jeunes se trouvant sous les plus anciens. Il est piquant de constater que c'est l'entreprise, à juste titre inquiète, qui est à l'origine de la consultation d'un géologue indépendant et de la mise en évidence de la nappe, et non pas les responsables du projet.

On peut donc bien affirmer que «l'interprétation de toutes les données», faite par ces responsables dans différents rapports entre 1989 et 1991, et maintenue jusqu'après l'éboulement, est toujours restée simpliste et sommaire ; elle n'a pas été capable de déchiffrer la structure complexe de la région qui avait pourtant fait l'objet de plusieurs articles dans la presse spécialisée depuis 1963. Cela est bien compréhensible, car ces différentes personnes ont été consultées pour donner un avis sur un problème tectonique difficile qui relevait de la compétence de spécialistes en géologie structurale.

On a ainsi réussi l'exploit de dépenser 60 millions de francs sans s'être rendu compte qu'on se trouvait en plein dans une nappe de charriage. Il est vrai, que pour la découvrir, il aurait fallu réaliser des sondages traversant la nappe, donc bien plus profonds que le radier du tunnel.

Si on peut se contenter de reconnaître les terrains dans l'environnement immédiat d'un tunnel, en contexte géologique simple, éloigné des zones perturbées par la tectonique, il est évident qu'à Toulon il fallait ratisser beaucoup plus large pour mettre en évidence la grande faille responsable du laminage et du broyage des terrains où est creusé l'ouvrage. Si ce contexte géologique avait été mis en évidence dès l'origine des travaux de reconnaissance, le soutènement du tunnel aurait certainement été dimensionné autrement.

On cherche aujourd'hui à prouver qu'il n'y a pas de responsable ; afin de sauver la face, de se couvrir pour que les surcoûts, engendrés par un projet mal adapté aux réalités géologiques, soient pris en charge par tous les payeurs et les assurances. Finalement ce tunnel coûtera probablement près de un milliard de francs, alors qu'il a été négocié à l'origine à moins de 300 millions de francs.

Mettons en place un Comité technique des tunnels qui rendra obligatoire l'intervention d'experts compétents, et qui rappellera systématiquement que les études géologiques sérieuses sont évidemment un préalable à toutes les consi-

dérations géotechniques, ces dernières devant découler des premières, et non l'inverse, comme le croit encore C. Leyrit. D'ailleurs, il ne nous dit pas encore pourquoi le tunnel s'est effondré... il y a plus de 17 mois.

Division euclidienne

Considérons l'ensemble des restes de la division euclidienne d'un nombre premier par son rang. Cet ensemble est-il majoré ? Si la réponse est non, cet ensemble est-il égal à celui des entiers naturels ? Peut-on trouver trois (ou plus) nombres premiers consécutifs ayant même reste pour cette division ?

Abdoulah VAVODA, Saint-Laurent du Maroni

Réponse de M. Balazard, de l'Université Bordeaux 1

La troisième question est la plus simple. Grâce au logiciel MAPLE, j'ai constaté que :

$$1181 = 6 \times 194 + 17$$

$$1187 = 6 \times 195 + 17$$

$$1193 = 6 \times 196 + 17$$

La réponse à la première question est négative. Voici la démonstration.

Lemme 1 : soit α, β, a, b quatre nombres réels tels que $0 < \alpha < \beta < 1$, $a - b < \beta - \alpha$, et u_n une suite de nombres réels tendant vers l'infini telle que $u_n + 1 - u_n$ tende vers 0 quand n tend vers l'infini. Alors, il existe un nombre entier K tel que, pour tout nombre entier $k \geq K$, on puisse trouver n vérifiant :

$$k + \alpha \leq u_n - a, \text{ et } u_n - b \leq k + \beta$$

Lemme 2 : Si on note p_n le n -ième nombre premier, quand n tend vers l'infini, $p_n/n - \log n - \log(\log n)$ tend vers -1 .

C'est une version forte du théorème des nombres premiers.

D'après le lemme 2, on a pour $n \geq n_0$:

$$n(u_n - 5/4) \leq p_n \leq n(u_n - 3/4)$$

où $u_n = \log n + \log(\log n)$, suite qui vérifie l'hypothèse du lemme 1. Par le lemme 1, on trouve K tel que, pour tout $k \geq K$, il existe $n \geq n_0$ tel que $k + 1/5 \leq u_n - 5/4$ et $u_n - 3/4 \leq k + 4/5$

$$\text{d'où } kn + n/5 \leq p_n \leq kn + 4n/5$$

d'où par conséquent, si on note $f(n)$ le reste de la division de p_n par n :

$$n/5 \leq f(n) \leq 4n/5.$$

Quand on fait tendre k vers l'infini, on voit que cet encadrement se produit pour une infinité d'entiers n , ce qui montre bien que l'ensemble des valeurs de f n'est pas borné.

On peut sans doute préciser considérablement cet énoncé, et peut-être montrer que l'ensemble des valeurs de f est de densité 1. En revanche, je n'ai pas trouvé s'il contient ou non tous les entiers naturels.

Les inattendus de l'astronomie

ANDRÉ BRAHIC

Excepté les étoiles à neutrons et les trous noirs, aucun objet cosmique n'était prévu. Uranie, muse pudique, dévoile avec parcimonie ses attraits.

Le monde céleste est peuplé d'êtres extraordinaires d'une diversité difficile à imaginer *a priori* : des quasars consommant de formidables quantités d'énergie, des pulsars émettant des rayonnements avec la régularité des meilleures horloges, des galaxies aux proportions fabuleuses, des étoiles de diverses tailles et de divers types, des mondes sans retour comme les trous noirs.

UNE DIVERSITÉ EXPLICABLE

Le grand «inattendu» est que nous avons les moyens de comprendre cette diversité : chaque fois que nous avons découvert une nouvelle loi de la physique, nous avons trouvé un astre où elle s'appliquait ; sans cette loi, nous n'aurions pas compris la nature de cet astre. Ainsi les physiciens ont découvert les masers au laboratoire avant de les observer dans le ciel. Dans le silence des laboratoires, les scientifiques découvrent des principes qui s'appliquent à des milliards d'années-lumière.

Il y a 2 600 ans, les Grecs pensaient autrement : ils élaboraient une physique propre à la Terre, être à part. Pour eux, en revanche, le ciel était le monde des dieux, qui ne pouvait être que le siège de mouvements «parfaits» ; donc les astres tourment, pensaient les Grecs, selon des trajectoires circulaires avec un mouvement uniforme. Aujourd'hui les physiciens pensent que les lois physiques sont universelles, et ils le vérifient : la loi de la gravitation de Newton est vérifiée au moins sur un dixième de l'Univers. Sur les neuf dixièmes restants, c'est une extrapolation.

Au fur et à mesure des progrès de la physique et des mathématiques, de nouveaux êtres sont apparus : au début de ce siècle, en 1900, nous ne connaissions que les étoiles – les galaxies n'étaient pas identifiées à l'époque – et les planètes.

En 1880, le bilan a été fait dans les merveilleux ouvrages de Camille Flammarion. Si Flammarion était encore parmi nous, et j'aimerais bien qu'il y soit parce qu'il avait un talent extraordinaire, il diffuserait avec passion les dernières nouvelles, et nous apprécierions mieux combien notre connaissance du monde s'est enrichie.

LA PROSPECTIVE N'A AUCUN FUTUR...

Les découvertes en science ne sont pas une succession de hasards. La vision d'un monde magique dont des savants en longues robes déchiffrent quelques mystères n'est que trop répandue. Si les découvertes ne résultaient que de hasards, notre vision serait celle d'un monde chaotique à l'orchestration incompréhensible. Les recherches scientifiques sont dirigées par des idées *a priori*.

La science avancerait-elle alors selon des rails bien tracés ? Non plus. Je vous engage à lire les rapports de prospective des organismes de recherche du monde entier. Vous y découvrirez en gros ce qui ne s'est pas passé. La prospective n'a pas un futur prometteur en science.

Par nature, les découvertes sont bien difficiles à prévoir. L'astronome a des surprises aussi intenses que celles de Christophe Colomb découvrant «des Indes» très différentes de celles qu'il avait imaginées. Des Amériques, ils s'en découvrent tous les ans, aussi inattendues, aussi imprévisibles.

J'ai eu le bonheur d'être un des scientifiques associés à la mission *Voyager* qui a exploré Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune : avant chaque rencontre avec une planète, nous faisons des paris sur ce que nous allons voir, et tout le monde perdait. Si vous voulez savoir à quoi ne ressemblent pas les paysages et les

planètes, feuillotez les ouvrages de science-fiction des années 1880 à 1950.

LE DIRIGISME EST PEU PRODUCTIF

Comme la prospective est difficile, le dirigisme, son corollaire, est inadéquat. Si vous voulez guérir le cancer ou le SIDA, ce n'est pas uniquement en créant un programme de recherches contre le cancer ou contre le SIDA que vous y parviendrez : les faits importants jaillissent sans cesse de directions inattendues.

À quoi sert l'astronomie ? J'ai la faiblesse de penser que c'est une activité culturelle essentielle. Mais, en dehors de cet aspect, et comme toutes les sciences, les progrès en astronomie ont des retombées économiques. Les astronomes ont mis au point des programmes de calcul des formes à partir d'observations à deux dimensions. Ainsi ils reconstituent le ciel sur la base de visées à deux dimensions. Quand les physiciens ont inventé le scanner avec lequel il faut représenter l'intérieur du corps à trois dimensions à partir de mesures d'absorption par tranches, ils ont utilisé les programmes des astronomes. Le fâcheux est que le brevet est maintenant américain : quand on achète un scanner en France, on paie des redevances qui auraient pu rester dans notre escarcelle.

Autre exemple, l'optique adaptative : les astronomes ont su s'affranchir des déformations optiques dues à l'atmosphère. Quand nous regardons un astre, nous le voyons à travers une espèce de rideau atmosphérique. L'étoile, dont l'image devrait être un point, est une «patate». En faisant l'opération inverse sur les photographies du ciel, opération qui nous fait repasser de la «patate» au point, nous éliminons les perturbations atmosphériques. Un Français, François Roddier, a mis au point cette technique... aux États-Unis. En France, l'effort a été moindre. L'optique adaptative a des prolongements en chirurgie oculaire pour les examens où il faut effacer les défauts des lentilles de l'œil.

HIÉRARCHIE ET FRAGMENTATION

Toutefois, le plus passionnant en astrophysique, reste l'astrophysique. Parce qu'elle pose les questions importantes sur l'existence de l'Univers. A-t-il commencé un jour ? Quand ? Est-il éternel ? Est-il limité ? D'où venons-nous ? Où allons-nous ? Qui sommes-nous ? Il n'est guère de sujet plus prenant ! Nous avons, pour la première fois dans l'histoire, des ébauches de réponses aux questions précédentes.