

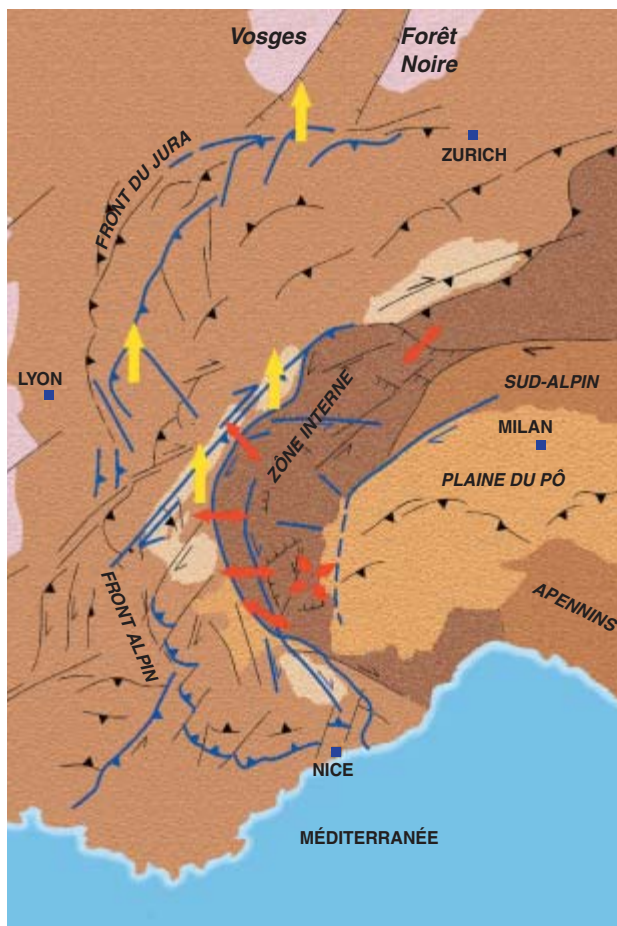
## L'extension au cœur des Alpes

*Les Alpes subissent simultanément des phénomènes de compression et d'extension dans des régions voisines.*

**L**es Alpes sont toujours vivantes : la convergence de la plaque africaine vers la plaque européenne, à l'origine de leur formation, se poursuit encore aujourd'hui. Cette activité est généralement synonyme de risques naturels, tels des glissements de terrain ou des séismes. Pour les géologues, elle représente un champ de déformation en activité dont la caractérisation et l'interprétation devraient les aider à mieux comprendre l'évolution passée et future des continents. Ainsi, entre 1996 et 2000, dans le cadre du Programme national *Géo-France 3D – Alpes*, les analyses des géologues et des géophysiciens des Universités de Chambéry, Grenoble, Lyon, Marseille, Montpellier et de Nice, et du Bureau de recherches géologiques et minières, le BRGM, ont permis d'établir la carte de la déformation actuelle des Alpes. Nous avons ainsi observé que la zone située au cœur des Alpes est soumise à des processus d'extension, malgré la convergence de l'Afrique vers l'Europe.

Pour construire cette carte, nous avons regroupé les données obtenues par quatre méthodes complémentaires : la tectonique, c'est-à-dire l'étude des failles récentes et/ou actives, sur le terrain et par imagerie satellite ; la sismologie, qui analyse l'activité sismique et les mécanismes mis en œuvre aux foyers des séismes et qui relie ces foyers aux failles observées en surface ; la géochronologie, qui étudie les traces laissées par la fission de l'uranium dans certains minéraux qui sont des chronomètres naturels ; et enfin la géodésie, évaluation des mouvements horizontaux ou verticaux actuels des montagnes par observation satellite (grâce au réseau GPS), et par comparaison des mesures de nivellements effectuées sur quelques décennies.

La déformation horizontale des Alpes est plus lente (de l'ordre de trois millimètres par an en moyenne) que celle de chaînes de montagnes telles que l'Himalaya ou les Andes (jusqu'à quelques centimètres par an), et elle est surtout très hétérogène. Nous avons distingué trois domaines principaux, selon les déformations qu'ils subissent. D'abord, les zones externes des Alpes occidentales, dessinant un arc entre Zurich, Lyon et Nice, sont soumises à un régime compressif, ce qui se traduit par une série de chevauchements actifs et de grands décrochements (ou failles de coulissage). Aujourd'hui, de façon très spectaculaire, le Jura est soumis à un raccourcissement selon l'axe Nord-Ouest/Sud-Est de l'ordre de quatre à cinq millimètres par an, accompagné de mouvements verticaux, dits de surrection, de l'ordre de un millimètre par an : les roches déformées se plissent et se soulèvent.



**Bien que la plaque africaine remonte vers l'Europe, la soumettant à un régime de compression, une zone (en marron foncé), au cœur des Alpes, résiste à la compression, subissant même des phénomènes d'extension (les flèches rouges). Les lignes bleues indiquent les principales structures actives : les chevauchements (les segments avec des triangles) et les failles (les segments avec des traits). Les demi-flèches montrent le sens du déplacement des blocs qui coulissent. Les flèches jaunes indiquent les zones qui subissent des mouvements de surélévation.**

Dans les Alpes du Sud et en Provence, la compression se produit selon des axes Nord/Sud et Nord-Ouest/Sud-Est. La zone Sud-Alpine et la plaine du Pô subissent aussi une compression, d'axe Nord/Sud. Enfin, entre ces deux domaines en compression, les zones internes des Alpes occidentales, situées dans l'axe de la chaîne, sont soumises à un régime d'extension : les limites de la région ont tendance à s'étendre de façon radiale, bien qu'elles soient entourées de zones de compression. En revanche, dans le Queyras, l'extension se produit dans toutes les directions.

On observe bien cette tectonique dans la région de Briançon où la principale limite entre les Alpes internes et externes, après avoir progressé en chevauchement pendant plusieurs dizaines de millions d'années, évolue, aujourd'hui, en extension. Toujours dans la région de Briançon, le couloir de failles de la haute Durance est une

zone de fractures et de décrochements. À l'échelle régionale, les mécanismes, aux foyers des séismes, révèlent que cette extension se produit aussi en profondeur : les zones internes des Alpes subissent un régime tectonique d'extension généralisé.

La découverte d'une telle extension, localisée entre deux domaines en compression, pose bien sûr une question géodynamique, puisque cette extension se produit en même temps que la convergence de l'Afrique vers l'Europe se poursuit. Les travaux géochronologiques menés récemment montrent que l'activité du réseau de failles de la haute Durance aurait commencé il y a une dizaine de millions d'années, tout comme la réactivation extensive de la limite des Alpes internes et externes. Cette réactivation perdure aujourd'hui.

Il est fort probable que cette extension soit contrôlée par la géométrie de la chaîne de montagnes et par les déplacements du manteau sous les Alpes. Ce phénomène d'extension entre des zones de compression ouvre de nouvelles voies de recherche sur la déformation des continents.

Jean-Marc LARDEAUX et  
Stéphane SCHWARTZ,  
Université Lyon I

### Un mammouth du troisième type

Les 325 ossements et molaires de mammouth retrouvés à Romain-la-Roche, dans le Doubs, cumulent les caractéristiques des deux espèces de mammouths connues : le mammouth des steppes, de 5,5 mètre de hauteur, qui vécut entre 850 000 et 300 000 ans avant notre ère et le mammouth à toison laineuse, plus petit, qui vécut entre 100 000 et 10 000 ans avant notre ère. Selon Patrick Paupe, responsable du site, l'étude de la géométrie des molaires, qui représente souvent l'«emprunte digitale» d'une espèce, la taille des fémurs, et l'âge des os (entre 150 000 et 18 000 ans avant notre ère), indiquent que le mammouth du Doubs fait le lien dans l'évolution, entre les deux espèces connues.

### Mini-char d'assaut

Ce robot autonome est l'un des plus petits du monde : il tient sur une pièce de monnaie. Deux moteurs alimentés par trois piles de montre font tourner les roues sur cheville et avancer le robot à 50 centimètres par minute. Il est équipé d'une caméra, d'un microphone et d'un capteur chimique. Les roboticiens des laboratoires *Sandia*, qui l'ont mis au point, envisagent des applications de détection dans des zones dangereuses.



### Le bacille de la lèpre

La lèpre touche encore de nombreux pays, tels le Brésil, la Guinée, l'Inde, Madagascar... Chaque année, en France, 25 nouveaux cas surviennent, 700 000 dans le monde. Près de deux millions de personnes, souvent exclues par la société, souffrent des infirmités consécutives à la maladie. L'équipe de Stewart Cole, à l'Institut Pasteur, en collaboration avec une équipe britannique, a réalisé le séquençage complet du bacille. Le génome la mycobactérie de la lèpre et celui de la tuberculose sont très proches. Leur comparaison a révélé quelques gènes spécifiques du micro-organisme de la lèpre, sans doute des pistes pour la mise au point de tests de dépistage précoce (dès le début du traitement, les malades cessent d'être contagieux) et de traitements moins lourds que celui dont on dispose aujourd'hui, qui nécessite l'administration d'une combinaison d'antibiotiques, parfois pendant un an.

*Certaines brèves d'avril se terminent par une parenthèse ; ce n'est pas une faute de frappe, mais le nombre d'énigmes que vous aurez résolues (voir [www.pourlascience.com](http://www.pourlascience.com)).*

## Gaz de grains

*Les gaz de billes ressemblent étrangement aux gaz moléculaires.*

Il n'y a pas de différence entre un tas de sable et l'air que l'on respire... ou presque! Depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, on sait comment se comportent les molécules d'un gaz : comme des billes! Dans leur théorie cinétique des gaz, Maxwell et Boltzman ont montré que – pour l'essentiel – tout se passe comme si les molécules de gaz étaient des sphères. Quelle différence y a-t-il entre un gaz constitué de molécules et un milieu granulaire contenant des particules? La taille des constituants, puisque les molécules gazeuses ont un diamètre de l'ordre de quelques nanomètres, tandis que les constituants d'un milieu granulaire ont des tailles supérieures à 10 micromètres. C'est du moins l'hypothèse que nous avons faite pour tenter de préciser le comportement de ces milieux, fréquents dans la nature, sous la forme de dunes de sable, de tas de grains dans un silo ou de poudres dans l'industrie.

Le comportement de ces milieux granulaires mi solides, mi fluides, est complexe, et les physiciens ont des difficultés à mettre au point des modèles physiques pour les décrire. C'est pourquoi ils procèdent à l'inverse : ils recherchent les circonstances où un modèle physique connu s'applique. C'est ce que nous avons fait en utilisant la théorie cinétique des gaz.

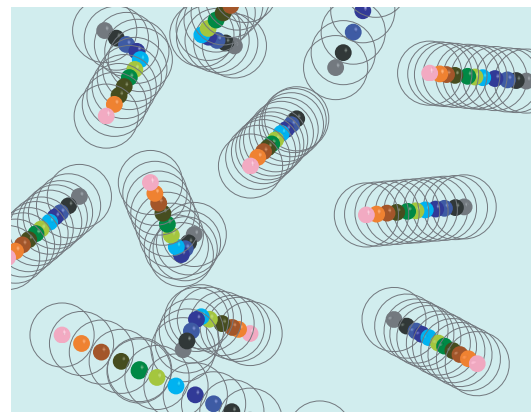
Selon le principal résultat de la théorie de Maxwell-Boltzmann, la distribution des vitesses (le nombre de molécules ayant la même vitesse) des molécules en mouvement dans un gaz ne dépend que de la température du milieu, ou encore de l'agitation thermique. Pour rechercher si ce résultat est applicable aux milieux granulaires, il nous fallait définir l'équivalent de la température d'un «gaz» de grains macroscopiques, une grandeur qui décrit l'agitation des grains. Dans un milieu granulaire, l'énergie qui agit les grains ne peut venir que de l'extérieur, puisqu'il n'y a pas d'agitation thermique en raison de la taille macroscopique des grains. Les physiciens ont défini la «température granulaire» par l'énergie cinétique moyenne des grains.

Afin de tester si une loi analogue à la loi de Maxwell-Boltzmann s'applique aux gaz de grains, nous avons réalisé l'expérience suivante : plusieurs cen-

taines de petites billes d'acier de 1,5 millimètre de diamètre, sont placées dans une petite boîte parallélépipédique faite de plastique transparent ; la hauteur et la largeur de cette boîte sont assez grandes (plusieurs dizaines de fois le diamètre d'une bille), mais son épaisseur excède à peine le diamètre des billes (une seule couche de billes sur l'épaisseur de la boîte). Quand cette cuve est mise en vibration, les grains se déplacent seulement dans un plan vertical, et les chocs sur les parois latérales sont relativement rares. Si l'agitation cesse, les billes se tassent sur le fond de la boîte en quelques secondes. Si l'on veut obtenir un «gaz de billes», c'est-à-dire un état d'agitation stationnaire, on doit maintenir la boîte en vibrations en lui conférant des accélérations notables. De cette façon, de l'énergie est fournie en permanence au système, qui la dissipe lors des collisions inélastiques entre billes. Nous avons observé ce type de régime stationnaire à l'aide d'une caméra rapide, qui enregistre 2 000 images par seconde.

Ensuite, nous avons traité par ordinateur les innombrables données obtenues. Ainsi, nous avons reconstitué les vitesses successives de chaque bille (de l'ordre de un mètre par seconde) d'après des photographies successives des différentes positions, puis nous les avons ordonnées par classes de vitesses. Ces quelque 100 000 mesures ont livré la loi de distribution des vitesses des billes dans un gaz de billes. Nous avons répété l'expérience et les calculs pour différentes accélérations, diverses densités de grains et plusieurs formes de boîte.

Tous ces résultats montrent que, comme pour un gaz, la fonction de distribution des vitesses d'un gaz de billes ne dépend que de la température granulaire. La loi de distribution des vitesses que nous avons établie ne diffère de la loi de Maxwell-Boltzmann que



Trajectoires de quelques billes, observées dans la cuve soumise à des vibrations. Les disques de couleur représentent les positions successives des centres des billes.

par deux exposants, ce qui lui donne une forme plus large qu'une distribution gaussienne. Elle n'est probablement valable que pour le régime «collisionnel» à forte énergie cinétique que nous avons étudié, et devrait être différente si les conditions changent trop.

Jusqu'où peut-on pousser l'analogie entre un gaz et un gaz de billes? Manifestement, le gaz granulaire en vibration que nous avons créé est proche d'un gaz moléculaire. La température granulaire décrit correctement l'agitation du milieu. Dès lors, peut-on considérer un milieu granulaire comme un milieu continu, avec une «température» et une «pression»? Pour le savoir, nous avons utilisé un modèle

théorique de la cuve à billes, qui reproduit la conduction de la chaleur comme si le milieu était un gaz, et qui tient compte la dissipation d'énergie dans les collisions inélastiques. Nous avons constaté que ce modèle reproduit les profils expérimentaux de température et de densité dans la cuve, de sorte qu'une équation d'état, cousine de la loi des gaz parfaits, relie la pression, la température et la densité.

Restent diverses questions, notamment comment tendre vers la limite élastique, celle où la loi de Maxwell-Boltzmann s'applique de façon exacte? Nous reproduisons actuellement l'expérience en utilisant des sphères d'élasticité variable. Nous espérons ainsi décou-

vrir quelle configuration donne une distribution des vitesses de billes la plus proche de celle de Maxwell-Boltzmann. Quand cela sera fait, nous aurons découvert les gaz de billes les moins dissipatifs possibles.

Dans l'industrie, les gaz de billes sont couramment utilisés pour grenailier des pièces : en les bombardant de minuscules billes d'acier, on les débarrasse de la majeure partie de la fatigue mécanique accumulée. Nous espérons que notre modèle aidera les ingénieurs à mieux maîtriser les conditions qui règnent au sein de leur machines à grenailier.

Florence ROUYER et Narayanan MENON, Université d'Amherst, Massachusetts

## Les marchés ruraux

*Depuis une dizaine d'années seulement, les villageois nigériens participent à la récolte, à la gestion et à la vente de leurs ressources forestières.*

Jusqu'au début des années 1990, au Niger, l'exploitation forestière était aux mains des camionneurs qui débarquaient dans la brousse pour couper du bois qu'ils vendaient ensuite à la ville pour un usage domestique. Les villageois ne pouvaient s'opposer à ce trafic : ils regardaient partir le chargement et n'avaient pas leur mot à dire. Les anciennes législations ne permettaient pas non plus aux représentants de l'État de s'opposer à ces prélèvements. Cette exploitation anarchique a entraîné un appauvrissement des formations boisées.

Jusqu'au jour où, prenant conscience de cet état de fait, mais aussi, dans certains cas, de l'exode massif des villageois vers les pays côtiers plus riches et de la désertification qui s'ensuivait, le gouvernement a décidé de changer les règles du jeu. Ainsi, depuis le début des années 1990, le gouvernement nigérien, assisté du CIRAD-Forêt, a mis en place une nouvelle politique forestière, la Stratégie énergie domestique, dont l'instrument a été le Projet Énergie II. Il s'agit de rendre aux villageois la gestion des ressources forestières de leur territoire. L'État, initialement propriétaire de tous les espaces naturels du pays, mais incapable d'en contrôler l'utilisation, a décidé d'en confier la gestion aux villages riverains.

Aujourd'hui, les villageois qui en ont fait la demande ont instauré leurs propres structures de production (les

marchés ruraux de bois-énergie), qui sont dirigés par une structure locale de gestion composée d'un président, d'un secrétaire et de divers représentants de communautés telles celle des bûcherons, des agriculteurs ou des pasteurs. Tous sont élus. Cette structure locale de gestion fixe les prix de vente, organise la production et gère les ressources à long terme.

Autour de Niamey, selon les villages, on trouve des marchés dits orientés, où le territoire exploité et la quantité de bois prélevé sont limités. On trouve aussi des marchés, dits contrôlés, où, en plus, l'exploitation suit une rotation par parcelle. Le village accède ainsi à une véritable gestion forestière.

Les 500 000 mètres cubes de bois que consomme la ville de Niamey pour ses besoins énergétiques sont achetés environ 1 500 francs CFA (un franc français vaut 100 francs CFA) pour être vendues environ 5 000 francs CFA en ville. Les gestionnaires des marchés ruraux prélèvent, pour le compte de l'État, des taxes sur le bois vendu.

Toutefois, la majeure partie des recettes reste au village, qui, par l'intermédiaire d'une caisse commune, redistribue cet argent aux bûcherons (chaque famille a son bûcheron), et en épargne une partie pour différents projets. Ainsi, les villages construisent des écoles ou encore des cases de santé. Par ce biais, des associations de femmes disposent de quelques capitaux.

Les villageois ont appris à respecter certaines règles, telles que la zone d'exploitation délimitée par le conseil du village, le diamètre minimal des arbres à couper, la hauteur de



Loïc Mangin

coupe minimale ; la taille a lieu durant des saisons définies afin de laisser aux arbres le temps de se régénérer ; on épargne les espèces rares ou menacées ; on stocke du bois pour répondre en permanence à la demande...

Ainsi, les marchés ruraux sont une source de revenus, mais ont aussi des conséquences sur les forêts, car les villageois, responsabilisés, veillent à la pérennité de leurs forêts. Fort de ses succès au Niger, le CIRAD-Forêt et ses partenaires accompagnent également des projets similaires au Mali et dans d'autres pays d'Afrique.



Les bûcherons du village ont coupé et transporté le bois à usage domestique qu'ils vendent sur les marchés ruraux.