

Un chronomètre pour les noyaux

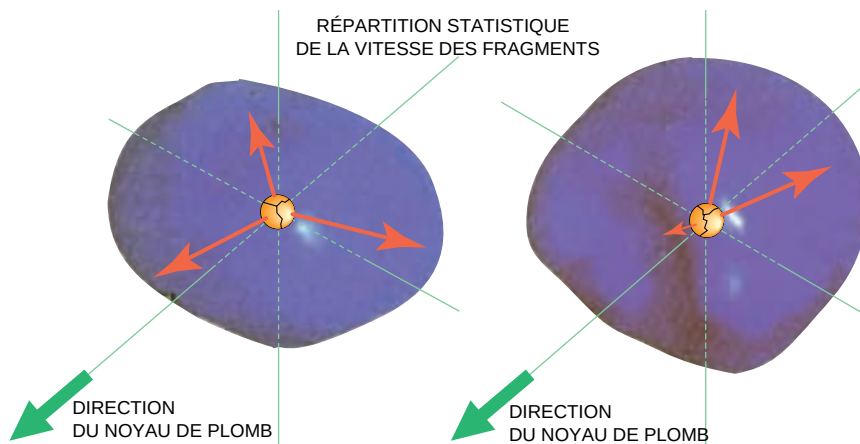
La répulsion entre les produits d'une réaction nucléaire indique la durée de vie des noyaux.

Pour mieux comprendre les propriétés des noyaux, minuscules grains de matière constitués de protons et de neutrons, on bombarde les noyaux d'une cible mince avec ceux d'un faisceau. Connaissant le résultat de ces collisions, on mesure les propriétés mécaniques des noyaux telles leur résistance à des températures et à des pressions analogues à ce qu'ils subissent lors des explosions d'étoiles. Pour ce faire il faut analyser des collisions très violentes et mesurer des durées de vie des milliards de fois inférieures à ce que peuvent enregistrer les instruments. Les expériences réalisées à l'accélérateur du laboratoire du GANIL, à Caen, indiquent une cohésion de la matière nucléaire dans des états extrêmes plus forte que prévue.

Dans ces expériences, on bombarde une cible d'or avec un faisceau d'ions de plomb (des atomes dépouillés d'un ou de plusieurs électrons). Les noyaux sont projetés l'un contre l'autre à des vitesses proches du quart de la vitesse de la lumière. La viscosité de la matière

nucléaire est telle que les deux noyaux qui entrent en collision se collent et transforment, par «frottement», leur énergie cinétique en chaleur. Le résultat des collisions entre les noyaux de plomb et les noyaux d'or est un agrégat de matière dont la température dépasse 70 milliards de degrés et dont la densité avoisine 400 millions de tonnes par centimètres cubes. Les noyaux sont excités par la collision et ils accumulent tant d'énergie que les contraintes produites par le chauffage surpassent les forces de cohésion du noyau qui se rompt. Les fragments éparpillés dans l'explosion sont constitués de noyaux plus légers.

Les physiciens reconstituent la chronologie de la collision et, en particulier, ils mesurent la durée de vie des noyaux excités ainsi créés. L'entreprise est ardue car la durée des interactions est voisine de 10^{-22} seconde. Comment chronométrer des événements si éphémères, et comment accéder à des informations sur des processus qui se déroulent au cœur même des atomes ?



Après la collision de noyaux de plomb et de noyaux d'or, les noyaux d'or explosent en trois ou quatre fragments dont les vitesses (flèches rouges) sont mesurées, bien après l'explosion, par le détecteur Nautilus. On a représenté ici la répartition statistique de la vitesse des fragments d'or pour 10 000 collisions. La flèche verte indique la direction du noyau de plomb qui a survécu à la collision. Pour une collision peu violente, le noyau d'or se casse longtemps après la collision. Le noyau de plomb qui a subsisté était alors «loin» (quelques 10^{-13} mètre) du lieu de l'explosion et la répartition statistique de la vitesse des fragments est isotrope (à gauche). Lors d'une collision violente, le noyau d'or explose alors que le noyau de plomb est 100 fois plus proche. La répulsion électrostatique entre les charges positives des fragments émis et celles du noyau de plomb crée un creux dans la répartition des fragments d'or (à droite) : les fragments sont éjectés moins vite dans cette direction.

UN NOYAU ESPION

Des chercheurs de différents laboratoires ont eu l'idée d'utiliser directement le noyau de plomb, lorsqu'il a résisté à la collision, pour chronométrer l'explosion du noyau d'or. Quelques milliardièmes de seconde après la collision, des détecteurs localisent les fragments émis. La mesure du temps de vol entre la cible et le détecteur permet de déduire la vitesse des fragments du noyau d'or émis au cours de l'explosion. Seuls trois ou quatre fragments sont produits à chaque collision. Aussi, pour obtenir la répartition statistique de la vitesse des fragments, accumule-t-on les résultats de milliers de collisions.

Lorsque la durée de vie du noyau d'or surchauffé est faible, le noyau de plomb est encore dans son voisinage lors de l'explosion. En raison de la répulsion électrostatique entre le noyau de plomb, chargé positivement, et les fragments émis, aussi chargés positivement, l'éjection des fragments n'est pas isotrope : dans la direction du noyau de plomb, il y aura un creux dans la distribution des vitesses d'autant plus important que la répulsion est grande. En revanche, lorsque la durée de vie du noyau d'or est longue, le noyau de plomb a eu le temps de s'éloigner avant que le noyau d'or n'explose : la répartition des fragments sera isotrope.

Pour réaliser des comparaisons, on simule l'explosion en suivant l'évolution de trois ou quatre fragments, placés à une distance donnée d'un noyau de plomb et soumis aux forces électrostatiques. Comme dans les expériences, on accumule des événements en variant la répartition angulaire initiale des fragments. On obtient ensuite la répartition statistique pour une durée de vie donnée en variant la distance initiale entre le noyau de plomb et les fragments du noyau d'or. À chaque distance initiale correspond une durée de vie. En comparant les répartitions statistiques issues des expériences et celles des simulations on mesure la durée de vie du noyau d'or.

Dans des collisions violentes on a mesuré un temps de fragmentation de 5×10^{-22} seconde, plus long que ce qui était prévu par la théorie. Comme la durée de vie du noyau chauffé dépend de son état d'excitation, des collisions plus violentes permettraient d'observer des durées de vie plus brèves encore et de sonder ainsi la cohésion des noyaux dans des états extrêmes. C'est l'objectif de récentes mesures réalisées avec le nouveau multidétecteur INDRA et actuellement en cours d'analyse.

Ph. CHOMAZ, GANIL, CEA-CNRS,
D. DURAND, LPC, ISMRA/CNRS, Caen

Évolution

Les formulations d'un problème mathématique.

La réforme sur l'enseignement nous intéresse tous : un groupe d'enseignants a examiné le problème de la formulation d'un problème.

Enseignement 1960 :

Un paysan vend un sac de pommes de terre pour 100 francs. Ses frais de production s'élèvent au 4/5 du prix de vente. Quel est son bénéfice ?

Enseignement traditionnel, 1970 :

Un paysan vend un sac de pommes de terre pour 100 francs. Ses frais de production s'élèvent au 4/5 du prix de vente, c'est-à-dire 80 francs. Quel est son bénéfice ?

Enseignement moderne, 1970 :

Un paysan échange un ensemble P de pommes de terre contre un ensemble M pièces de monnaie. Le cardinal de l'ensemble M est égal à 100 et chaque élément PFM vaut un franc. Dessine 100 gros points représentant les éléments de l'ensemble M . L'ensemble F des frais de production comprend 20 gros points de moins que l'ensemble M et donne la réponse à la question suivante : quel est le cardinal de l'ensemble B des bénéfices ? (à dessiner en rouge).

Enseignement rénové, 1980 :

Un agriculteur vend un sac de pommes de terre pour 100 francs. Les frais de production s'élèvent à 80 francs, et le bénéfice est de 20 francs. Devoir : souligner les mots « pommes de terre » et discuter en avec ton voisin.

Enseignement réformé, 1980 :

Un peizan kapitalist privilégié sanrichi injustement de 20 francs sur un de patat, analiz le tekst et recherche les fote du contenu de gramère, d'orthographe, et puntuasson et ensuite di se que tu pense de set maniaire de senrichir.

Enseignement assisté par ordinateur, 1990 :

Un producteur de l'espace agricole câblé consulte en conversationnel data bank qui display le day-rate de la patate. Il load son logiciel computation fiable et détermine le cash-flow sur écran bit-map (sous MS/DOS avec config floppy et disque dur 4 MO).

Dessine avec ta souris le contour intégré 3 D du sac de pommes de terre. Puis logues-toi au network par le 36.15 code BP (blue Potatoe) et suis les indications du menu.

Enseignement 2000 :

Qu'est-ce qu'un paysan ?

UNISTAT® 4.0

Les Statistiques adaptées aux Sciences de la Vie

Avec Unistat 4.0 en mode add-in Excel, vous pouvez utiliser toute la puissance d'Unistat dans Excel et envoyer vos résultats vers Excel ou Word.

Exportez directement vos sorties graphiques et statistiques dans vos fichiers Excel.

Sélectionnez Word comme destination de sortie par défaut pour renvoyer vos résultats directement dans vos documents Word.

- Un logiciel statistique complet qui peut aussi être utilisé en mode add-in Excel™.
- Envoi direct optionnel des sorties graphiques et statistiques dans des tableaux Word™.
- Intégration OLE2 parfaite avec MS Office™.
- Tableur intégré de type Excel™.
- Plus de 150 types de graphiques 2D/3D avec édition et annotations complètes à l'écran.
- Enregistrement et exécution en background de macros.
- Système d'aide avec plus de 80 exemples provenant de livres de références.

Un ensemble complet de fonctions statistiques et graphiques :

Représentations Graphiques - Graphiques 2D - Graphiques 3D - Diagrammes - Tracés de fonctions	Régression et ANOVA - Statistiques matricielles - Régression (linéaire, canonique, polynomiale, pas à pas, non-linéaire, logistique) - Plans d'expériences (Système illustré au hasard, intensifs, carré latin, facteurs croisés) - Tests pour l'ANOVA	Analyse Multivariée - Classification - Analyse discriminante - Echelle d'association multidimensionnelle - Composantes principales - Analyse factorielle - Corrélation canonique - Analyse robuste - Graphiques multivariés
Statistiques Descriptives - Statistiques descriptives - Fonctions de distribution - Graphiques descriptifs	Tests Statistiques - Tests paramétriques - Coefficients de corrélation - Tests d'hétérogénéité - Tests non paramétriques - Tableaux	Séries Chronologiques - ARIMA - Indicateurs - Contrôle de qualité - Analyse de survie - Analyse de Fourier

RITME
INFORMATIQUE
34 bd Haussmann
75009 Paris
Tél. (1) 42 46 00 42
Fax (1) 42 46 00 33

N'hésitez pas à nous contacter au (1) 42 46 00 42 pour tout renseignement complémentaire.

BULLETIN D'INSCRIPTION AUX JOURNÉES DE PRÉSENTATION

A envoyer à Ritme Informatique - 34 bd Haussmann - 75009 Paris - Tél. (1) 42 46 00 42 - Fax (1) 42 46 00 33

Nom Etablissement Adresse Code Postal Ville Tél. Fax	DATES ET LIEU DE PRÉSENTATION Je désire assister à la présentation du : ☐ 5 juin 1996 14h30-16h30 Ritme Informatique - Paris ☐ 19 juin 1996 14h30-16h30 Ritme Informatique - Paris 34 boulevard Haussmann - 75009 Paris Métro Chausée d'Antin ou RER Auber
---	--

Le récent séisme des Pyrénées

Premier séisme français bien documenté dans une région sismique, son mécanisme est élucidé.

Le 18 février 1996, à 02h45, un fort séisme secouait la partie orientale des Pyrénées. Ce séisme, localisé à proximité de Saint-Paul de Fenouillet (Pyrénées-Orientales), fut ressenti jusqu'à Perpignan, Carcassonne, Millau, Toulouse et Foix, ainsi qu'en Catalogne espagnole jusqu'à Barcelone. D'une magnitude de 5,5 sur l'échelle de Richter, il est le plus violent qu'ait connu la France depuis le séisme béarnais du 13 août 1967, qui détruisit en grande partie le village d'Arette. Les dégâts du séisme

de février furent heureusement plus limités, mais de nombreux phénomènes secondaires, tels que des émanations gazeuses, la réactivation de sources taries, l'élévation de température des eaux thermales, attestent de l'importance tectonique de cet événement.

Un des intérêts de cet événement est qu'il est, le premier séisme de cette importance qui soit bien instrumenté en métropole. En effet, un réseau sismologique est installé dans la partie orientale de la chaîne pyrénéenne depuis seulement

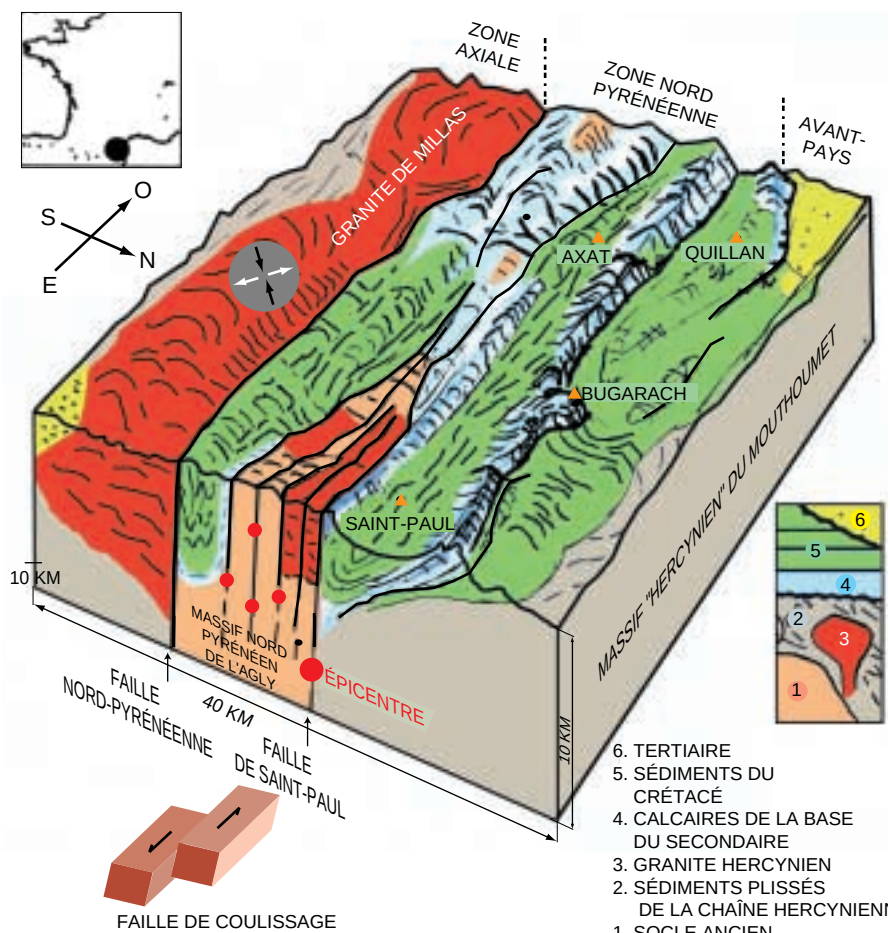
sept ans, sous la responsabilité de l'Observatoire Midi-Pyrénées à Toulouse, et un réseau similaire couvre le versant Sud de la chaîne en Catalogne espagnole, sous la responsabilité du Servei Geològic de Catalunya à Barcelone. Les données de ces réseaux sont transmises en temps peu différé à Toulouse et Barcelone par l'intermédiaire du satellite *Météosat*. Sept stations de ces deux réseaux permanents sont situées à moins de 60 kilomètres de l'épicentre, ce qui a permis de déterminer très vite les coordonnées précises du foyer : latitude de 42°47.4' Nord, longitude de 2°32.3' Est, ce qui le situe à environ six kilomètres à l'Est de Saint-Paul de Fenouillet (voir la figure 2).

Il est donc situé en bordure Nord du massif de l'Agly, probablement au contact d'un massif granitique avec les structures calcaires marquant la limite Sud des Corbières. Il n'a donc pas *a priori* de relation directe avec la faille Nord pyrénéenne, située plus au Sud : cette faille s'étend d'Est en Ouest le long de toute la chaîne des Pyrénées et marque la limite entre les plaques Ibérie et Eurasie, en collision depuis 65 millions d'années. La profondeur du foyer, voisine de dix kilomètres, est relativement grande, ce qui explique que les dégâts soient moins catastrophiques que ce que l'on peut redouter pour une magnitude de 5,5.

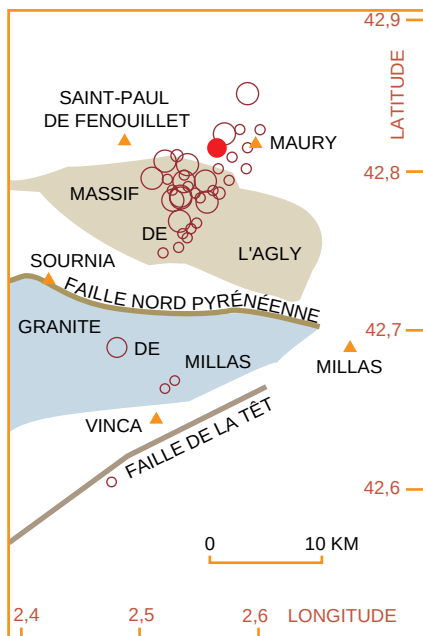
LE MÉCANISME DU SÉISME

Le réseau sismologique permanent a également permis de déterminer le mécanisme à l'origine du séisme. Un séisme est dû à une rupture locale de l'écorce terrestre, avec un déplacement de deux blocs l'un par rapport à l'autre de chaque côté d'une faille. C'est le relâchement brutal des contraintes accumulées au cours des années ou des siècles sur la faille qui est à l'origine de la rupture. Lorsque le foyer est superficiel, la faille est en général visible en surface, et il est souvent possible de mesurer sur le terrain les déplacements qui se sont produits sur le plan de faille : déplacements verticaux, ou latéraux, ou une combinaison des deux.

Le séisme de Saint-Paul, relativement profond, n'a laissé aucune trace du déplacement de la faille en surface. Toutefois, en analysant le sens de la première oscillation observée sur les enregistrements sismologiques, il est en principe possible de trouver l'orientation du plan de faille en profondeur, et la direction du mouvement le long de ce plan. En pratique, le problème est un peu plus complexe, car ce type d'analyse donne deux plans de faille possibles, perpendiculaires l'un à l'autre, entre lesquels il est parfois bien difficile de choisir. Ce sont souvent des



1. Bloc-diagramme de la région de Saint-Paul de Fenouillet avec les positions de l'épicentre et de quelques répliques. Lors de sa formation, la chaîne a été affectée par des chevauchements qui se sont avancés vers le Nord et par des failles de coulissage. Le séisme a probablement fait rejouer en profondeur la belle faille de coulissage au Sud de Saint-Paul. On a schématisé par des flèches le champ de contraintes déduit du mécanisme au foyer.



2. Foyers du séisme et ses répliques.

considérations géologiques qui permettent le choix. Dans le cas de Saint-Paul de Fenouillet, le plan de faille est quasi-vertical, orienté Est-Ouest, et le mouvement sur le plan est un glissement latéral : le massif de l'Agly a tendance à être éjecté vers l'Est par rapport aux structures qui sont immédiatement au Nord (voir la figure 1). Ici, il n'y a pas d'ambiguïté sur le plan de faille, car le contexte géologique est particulièrement bien connu. La région est d'ailleurs un lieu de prédilection pour les excursions géologiques !

Grâce à la localisation assez précise du foyer (à un kilomètre près) et à une très bonne organisation de la sismologie française, dotée de réseaux sismologiques portables et habituée aux interventions rapides, il a été possible d'installer, dès le soir du séisme, des stations temporaires (25 environ) entourant l'épicentre du choc principal, pour l'enregistrement des répliques. C'est en effet dans les heures ou les jours qui suivent immédiatement un séisme que les répliques sont les plus nombreuses et les plus fortes. Dans le premier mois suivant le choc principal, environ 400 répliques ont été enregistrées par les équipes françaises et catalanes.

L'intérêt des répliques est multiple. Elles permettent notamment d'estimer comment les contraintes achèvent de se relâcher dans la région du séisme : les répliques correspondent généralement à des réajustements locaux sur une partie de la faille, ou en bout de faille, ou sur des failles voisines. Leur cartographie révèle parfois des failles inconnues.

À Saint-Paul, les répliques les plus fortes ne sont pas situées sur le même

plan de faille que le séisme principal. Elles s'alignent vers le Sud suivant un axe Nord-Sud jusqu'à la bordure Nord du massif de l'Agly et correspondent vraisemblablement au rejeu de grandes failles verticales d'orientation Est-Ouest, bien identifiées dans ce massif. Le mouvement de glissement latéral, lié au choc principal sur la faille la plus au Nord, serait donc suivi d'une série de mouvements latéraux des autres failles de l'Agly.

Plus au Sud encore, lorsqu'on franchit la faille Nord pyrénéenne et que l'on arrive dans le massif granitique du Millas, on trouve encore l'écho des séismes induits par le choc principal, mais ces séismes sont tous profonds (à environ 15 kilomètres de profondeur), et de magnitudes plus faibles. Ils ne sont plus sur des failles identifiées et correspondent vraisemblablement à un découplage entre croûte supérieure et croûte inférieure faites de matériaux différents. Une telle distribution des répliques n'est pas commune, seule une modélisation mécanique permettra de comprendre pourquoi tous ces séismes sont alignés les uns par rapport aux autres.

Peut-on craindre d'autres séismes dans le futur ? Répondre par la négative serait se voiler la face : la sismicité historique de la France, qui porte sur les cinq derniers siècles, nous apprend qu'il y a, sur le territoire national, environ quatre à cinq séismes de magnitude égale ou supérieure à cinq chaque siècle. Pour la région de Saint-Paul de Fenouillet, les archives renseignent sur l'occurrence de forts séismes, sans doute comparables au dernier séisme, en 1755 et 1838, et plus récemment en 1920 et 1922.

Le plus gros séisme pyrénéen connu s'est produit à 50 kilomètres au Sud de St Paul, en Catalogne espagnole, le 2 février 1428 et sa magnitude entre 6 et 7, était comparable à celle du récent séisme de Kobé. On a tort de l'oublier car les gros séismes se répètent souvent avec une récurrence, de l'ordre de quelques siècles, que l'on peut parfois estimer, et avec une localisation changeante que l'on cherche à prévoir. Le risque sismique dans la région reste faible mais réel, et il ne serait pas inutile que les villes de la partie orientale des Pyrénées en prennent conscience.

Il y a une dizaine d'années, des études ont été consacrées à ce séisme historique, mais elles ont conduit à des interprétations divergentes, que le séisme actuel pourra lever, affinant en même temps les prévisions sismiques.

A. SOURIAU et A. RIGO, CNRS-Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse
C. OLIVERA, Servei Geològic de Catalunya, Barcelone
M. MATTAUER, Université de Montpellier

France Culture et Pour la Science

**vous invitent
au Palais
de la Découverte
à l'enregistrement
de leur
nouvelle émission**

les Inattendus de la Science

Samedi 8 juin - 15h
le transistor

avec Pierre Aigrain
de l'Académie des Sciences

Samedi 22 juin - 15h
le zéro

avec Christian Houzel,
mathématicien

**Invitations à demander
au 36 68 10 99 (2,23F/mn)**



Palais de la découverte

**POUR LA
SCIENCE**

Cristaux de pentagones

Des ordres impossibles apparaissent dans des empilements de pentagones et de polygones.

L'étude des milieux granulaires, dont le tas de sable est l'archétype, progresse depuis une dizaine d'années : à l'aide d'expériences, de calculs théoriques et de simulations par ordinateur, on explore les empilements de ces milieux complexes. Pour en simplifier l'étude, on considère des empilements modèles, composés de particules de forme simple, par exemple sphérique, mais, même ainsi, des questions élémentaires restent ouvertes : on ignore, par exemple, quel est l'empilement de sphères dont la compacité est maximale. Aussi simplifie-t-on parfois davantage, en considérant des ensembles de disques à deux dimensions seulement.

De tels ensembles ne sont pas de très bons modèles de milieux granulaires réels, car les contacts entre disques sont quasi ponctuels, et la moindre sollicitation peut les détruire et amener des réarrangements locaux. En outre, les disques de même rayon permettent de réaliser simultanément la compacité locale maximale, et un ordre à longue distance, avec les centres aux nœuds d'un réseau triangulaire.

Afin d'éviter de telles particularités, nous avons choisi d'étudier des ensembles bidimensionnels de grains pentagonaux réguliers, tous de même taille. Dans un contact entre deux pentagones, peuvent intervenir soit un côté

de l'un et un sommet de l'autre, soit un côté de chaque pentagone, soit un sommet de chaque pentagone. Ce dernier type de contact n'a aucune stabilité, de sorte qu'il ne se produit qu'exceptionnellement dans un empilement désordonné. Les contacts côté-côté sont, au contraire, très stables. Enfin la symétrie d'ordre cinq des grains semblait devoir s'opposer à la création d'un ordre à longue distance, car les pentagones ne pavent pas le plan. Pourtant l'expérience conduit à une structure cristalline qui présente une quasi-symétrie d'ordre six !

L'assemblée que nous utilisons est constituée de 2 200 pentagones de styrene de six millimètres de côté et de un millimètre d'épaisseur, déposés sur une table soufflante, alimentée par deux moteurs. Les fluctuations locales de la vitesse d'éjection de l'air provoquent un mouvement incessant des grains. La table étant horizontale, les pentagones se répartissent de façon homogène, sur toute la surface, formant initialement un empilement peu dense, de compacité voisine de 0,7.

Puis nous réduisons lentement le débit d'air : la table s'infléchit en son centre en raison de la diminution de la pression de l'air, et les particules s'accumulent lentement au centre. La compacité augmente, mais, en raison de la répulsion hydrodynamique due à l'évacuation de

l'air entre les particules, celles-ci restent éloignées les unes des autres, sans contact. Cette répulsion gomme l'influence de la forme des particules, qui se comportent alors comme des disques.

Quand nous réduisons davantage le débit d'air, des zones ordonnées d'ordre six apparaissent, séparées par des lignes de dislocation ou par des zones amorphes, sans ordre. À ce stade, seuls les centres des particules sont localement ordonnés.

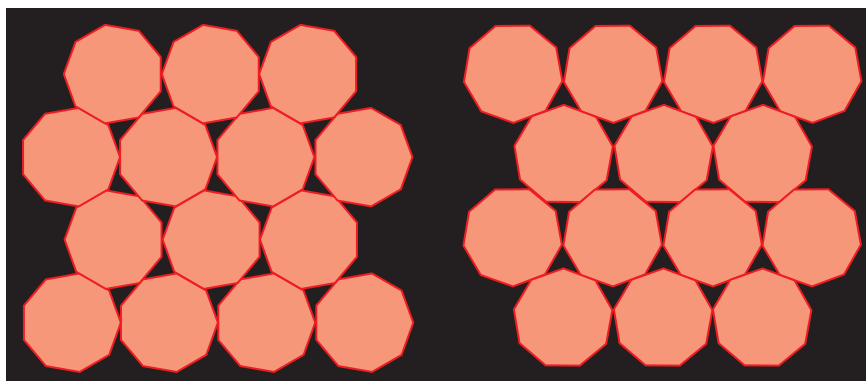
L'APPARITION DES ZONES CRISTALLINES

Enfin, quand nous réduisons encore le débit d'air, un ordre d'orientation, favorisé par l'agitation modérée des particules se superpose à l'ordre de position des centres, et des zones cristallines croissent par nucléation à l'intérieur des zones ordonnées de symétrie hexagonale. Dans les zones cristallines, les pentagones s'orientent selon une direction, mais ils se disposent selon la direction opposée sur la ligne adjacente. Chaque pentagone présente deux voisinages côté-sommet selon la direction d'alignement, et quatre voisinages côté-côté dans les lignes voisines.

Avec des polygones réguliers de même taille et dont le nombre de côté est supérieur ou égal à cinq, les mathématiciens savent construire toute une famille de structures cristallines caractérisées par une orientation alternée des grains, sur les lignes consécutives. Ces structures sont nommées empilements en double réseau. Pour des polygones à nombre pair de côté, la structure la plus compacte est la plus compacte possible. Il en est probablement de même pour les pentagones, dont l'arrangement est alors celui du cristal que nous avons obtenu dans nos expériences, et aussi pour les heptagones.

Par simulation du problème sur ordinateur, à l'aide de méthodes de «recuit simulé», où l'on réduit progressivement l'énergie du système, comme nous l'avons fait dans nos expériences, nous avons obtenu les mêmes structures compactes. En revanche, avec des ennagones (neuf côtés), nous avons obtenu un mélange de deux structures : la première, de compacité égale à 0,8975, est similaire à celle que l'on obtient avec les pentagones ; dans la seconde, un peu plus dense (compacité égale à 0,8986), quatre contacts côté-côté et deux contacts sommet-sommet sont établis pour chaque grain.

Y. LIMON DUPARCEUR
et J-P. TROADEC,
Université de Rennes I
A. GERVOIS, CEA Saclay



Deux cristaux d'ennagones (polygones à neuf côtés) obtenus par simulation numérique. Celui de droite est un peu plus compact que celui de gauche.