

Gingembre à géométrie variable

Afin d'éviter l'autopollinisation, les fleurs de gingembre orchestrent le déplacement de leurs organes sexuels.

Quelle est la plus grande crainte des plantes à reproduction sexuée? L'autopollinisation, car elle empêche le brassage des gènes et restreint ainsi les possibilités d'évolution. Cette crainte est d'autant plus justifiée pour les plantes hermaphrodites qui portent à la fois les cellules reproductrices (les gamètes) mâles et les cellules reproductrices femelles. L'équipe de Qing-Jun Li, de l'Académie des sciences de Chine, à Mengla, dans le Yunnan, a mis en évidence le procédé par lequel neuf espèces de fleurs de gingembre (*Alpinia*), hermaphrodites, évitent cet inconvénient : leurs organes sexuels se déplacent au cours de la période de reproduction.

Les gamètes mâles sont les grains de pollen portés par les anthères à l'extrémité des étamines, tandis que les gamètes femelles sont enfouies dans l'ovaire qui se prolonge par une tige, le style, sur lequel on trouve les stigmates : l'ensemble forme le pistil. Quand les anthères se dessèchent, les grains de pollen sont libérés. Ces derniers se déposent sur les stigmates d'autres fleurs, puis, par un prolongement cellulaire atteignant, via l'intérieur du style, les ovules pour les féconder. L'ovaire se développe alors en un fruit qui renferme les graines.

Comment les fleurs de gingembre, qui n'ont que 24 heures pour se reproduire avant de mourir, évitent-elles que les grains de pollen d'une fleur ne se posent sur les stigmates de la même fleur? Il existe deux types de fleurs qui diffèrent, selon le moment de la journée, par la position des anthères par rapport aux stigmates. À l'aube du jour de la reproduction, certaines ont un style souple qui place les stigmates sous les anthères, en position de recevoir le pollen, tandis que d'autres ont un style rigide qui se dresse au-dessus des anthères, à l'écart du pollen.

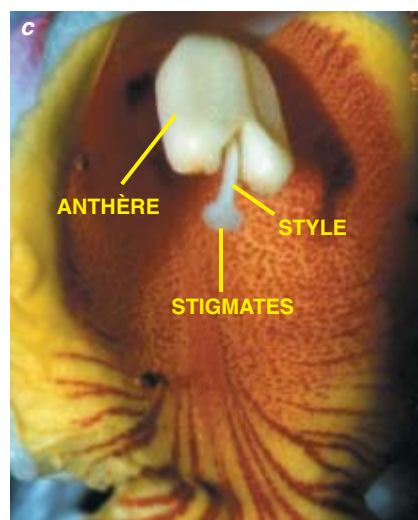
Les botanistes chinois ont observé les mouvements suivants : de six heures à six heures et demie, seules les anthères des fleurs à style rigide libèrent des grains de pollen. Ces derniers se déposent sur le dos des insectes butineurs qui se placent sous

l'anthère pour boire le nectar de la fleur. Ainsi les grains de pollen sont transportés vers d'autres fleurs, et évitent les stigmates de la fleur dont ils sont issus, puisqu'ils sont placés au-dessus des anthères. Les insectes volent de fleur en fleur : les grains de pollen se collent uniquement sur les stigmates des fleurs à style souple, qui n'ont pas encore libéré de pollen. Cette situation dure jusqu'à midi, heure à laquelle les styles souples se raidissent, se dressent, et passent au-dessus des anthères qui, seulement alors, libèrent les grains de pollen (vers 15 heures). Quelques minutes plus tard, les styles rigides s'assouplissent et ploient : leurs stigmates sont sous les anthères, prêts à recevoir les grains de pollen transportés par les insectes. La seconde période de la pollinisation a alors lieu. Pour chaque type de fleurs,



le style dressé forme avec les anthères un angle de 170°, suffisant pour éviter l'autopollinisation.

La vitesse des mouvements dépend des conditions météorologiques, mais toutes les fleurs du même type sont synchrones : les anthères ne s'ouvrent que lorsque le style est au-dessus d'elles et met ses stigmates hors de portée. Ce mouvement de va-et-vient des styles, qui semble propre aux fleurs de gingembre, est une des nombreuses stratégies mises au point par les plantes à fleurs pour éviter l'autopollinisation.



Les fleurs de gingembre *Alpinia* sont de deux types : le matin, certaines ont un style rigide (a), d'autres ont un style souple (b). Les premières libèrent des grains de pollen que des insectes (en haut) véhiculent jusqu'aux stigmates réceptifs des secondes. L'après-midi, les styles rigides s'assouplissent (c), tandis que les souples se raidissent (d). Dans cette situation inversée, les secondes libèrent le pollen qui sera transporté jusqu'aux stigmates des premières. L'autopollinisation a été évitée.

Des lasers toujours plus brefs

Les physiciens du Laboratoire *Photons, atomes et molécules*, du CEA, ont découvert que les interactions entre un laser aux impulsions ultrabrèves et des atomes de xénon produisent des impulsions laser secondaires encore plus brèves (inférieures au millionième de milliardième de seconde, soit une femtoseconde). Le champ électromagnétique du laser déforme l'atome : des électrons sont arrachés et oscillent dans le champ appliqué. Contrairement à ce que pensaient les physiciens, certains électrons retournent vers l'atome ionisé dont ils proviennent, émettant alors une impulsion sub-femtoseconde (attoseconde) dans le domaine de l'extrême ultraviolet.

Edelweiss à la tonne

La rarissime étoile des neiges, la fleur sauvage des sommets enneigés... ne l'est plus. Elle est aujourd'hui domestiquée et produite à la tonne. Après plusieurs années d'efforts, des chercheurs du Centre de recherches en productions végétales de Conthey, en Suisse, ont mis au point une méthode de culture de la précieuse fleur. La récolte, cette année, devrait atteindre trois tonnes. La fleur d'edelweiss est censée contenir des substances antirides, et la société *Alpafleur*, intéressée par cette vertu présumée, a financé les recherches de domestication de la fleur des cimes. On ignore si cette propriété sera confirmée, mais d'ores et déjà l'edelweiss, que l'on sait désormais cultiver, est sauvé de l'extinction.

Quand la Terre illumine la Lune

L'albédo terrestre, la proportion du rayonnement solaire que la Terre renvoie dans l'espace, varie avec la couverture nuageuse, la quantité d'aérosols dans l'atmosphère, ou encore la nature du sol. L'astronome américain Philip Goode et ses collègues de l'Institut de technologie



du New Jersey ont étudié la lumière réfléchie par la Terre sur la Lune pour évaluer l'albédo de la Terre : pendant certaines phases lunaires où seul un mince croissant est éclairé par le Soleil, on distingue pourtant tout le disque. Cette « lumière cendrée » provient de l'éclairage de la nuit lunaire par un clair de Terre ; son étude a permis à P. Goode d'estimer que la Terre réfléchit environ un tiers de la lumière qu'elle reçoit. Surprise, cette valeur peut varier de 20 pour cent selon les saisons, et la comparaison avec des mesures antérieures montre que l'albédo aurait diminué de 2,5 pour cent au cours des cinq dernières années.

Nanotubes supraconducteurs

On imaginait les nanotubes de carbone isolants à basse température. Erreur : ils sont supraconducteurs !

Les nanotubes sont plus résistants que l'acier, 50 000 fois plus fins qu'un cheveu et plus élastiques que le nylon. Ils ont des propriétés si remarquables qu'ils pourraient remplacer le silicium dans des composants électroniques, entrer dans la composition d'immeubles qui résisteraient aux tremblements de terre, ou même servir de câbles vers l'espace. Matthieu Kociak, Sophie Guéron, Bertrand Reulet et Hélène Bouchiat de l'Université d'Orsay, en collaboration avec Alik Kasumov, de l'Académie des sciences de Russie, viennent de leur découvrir une autre propriété, fort inattendue : les nanotubes sont supraconducteurs à très basse température.

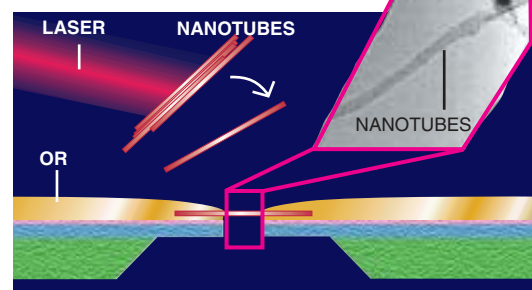
Les nanotubes de carbone sont des macromolécules constituées d'un feuillet de graphène (plan de graphite isolé), enroulé en un cylindre dont le diamètre est de l'ordre de quelques nanomètres et la longueur de quelques micromètres. La plupart de leurs propriétés sont connues, mais on étudie leur conductivité électrique aux très basses températures. Les nanotubes, selon leur forme (droite ou torsadée) et leur diamètre, sont conducteurs ou semi-conducteurs à température ambiante. Plusieurs équipes de physiciens sont parvenues à déposer un nanotube sur deux minuscules contacts métalliques. Comme le nanotube est seulement posé sur les plots, le contact électrique est mauvais : les électrons rencontrent une résistance très élevée pour passer du nanotube aux plots. Par conséquent, la mesure est perturbée par les contacts. De plus, à très basse température, les électrons n'ont plus assez d'énergie pour quitter le nanotube : leur comportement dans le nanotube à ces températures restait énigmatique.

Pour étudier la conductivité des nanotubes, l'équipe d'Orsay a réalisé des bons contacts (la résistance est minimale). Pour cela, ils ont utilisé une technique de nanosoudure mise au point par A. Kasumov. À l'aide d'un faisceau laser, ils manipulent les longues chaînes carbonées et les font tomber sur deux contacts en or. Le faisceau laser fait fondre l'or, réalisant ainsi une nanosoudure. Les nanotubes ne sont

plus posés sur les plots : ils sont enfouis dans l'or de sorte que le contact électrique est excellent.

Avec ce dispositif, l'équipe d'Orsay a mesuré la résistance des nanotubes en fonction de la température. Elle augmente quand la température baisse, et les nanotubes auraient dû être isolants à très basse température. En effet, les électrons dans un solide subissent des interactions électrostatiques répulsives. Elles sont négligeables devant l'agitation thermique dans les solides à trois dimensions et à température ambiante (tout se passe comme si les électrons «avaient assez de place» pour s'éviter), mais ne le sont plus à une ou deux dimensions, et encore moins à basse température. Dans ce cas, les électrons ne sont plus indépendants : aucun d'eux ne peut bouger sans perturber les autres. Les physiciens s'attendaient à ce que les électrons soient figés par l'absence d'agitation thermique et par les répulsions électrostatiques qui les maintiennent éloignés les uns des autres dans le peu d'espace disponible. Or, les physiciens ont découvert que les nanotubes ne sont pas isolants, mais supraconducteurs à très basse température.

La transition supraconductrice est observée au voisinage de 0,3 kelvin. Cela signifie qu'apparaissent des attractions (et non plus seulement des répulsions) : les électrons se regroupent et forment des paires, dites de Cooper, qui se condensent en un état supraconducteur. Quand on augmente la température dans un nanotube supraconducteur, la résistance évolue par sauts. Des îlots de conduction normale apparaissent dans les tubes de carbone au sein des zones supraconductrices. Un tel comportement par sauts caractérise la supraconductivité d'un système unidimensionnel. Pourtant, la supraconductivité a été obtenue non pas avec un unique nanotube, mais avec un faisceau composé d'une centaine de nanotubes parallèles. La question est désormais de savoir si la supraconductivité se maintient dans un seul nanotube.



Le laser fait tomber des nanotubes sur l'or et fait fondre le métal. Dans ces conditions, les nanotubes, qui sont enfouis dans l'or, sont supraconducteurs à très basse température (en haut, photographie de la «jonction»).

L'azote lunaire

Au cours des âges, le Soleil, les météorites et les comètes ont apporté leur azote sur la Lune et à la Terre.

Le sol lunaire est une accumulation de débris provenant de météorites et probablement de comètes, tombés sur notre satellite depuis sa création voici 4,4 milliards d'années. À cela s'ajoutent les poussières fines et les gaz venus de l'espace interstellaire et surtout, du vent solaire. Tous ces fragments sont d'âges et de compositions différentes, selon leur provenance. La Lune a donc enregistré les apports de matière cosmique depuis sa création. En revanche, sur Terre, l'atmosphère empêche, depuis qu'elle existe, cet enregistrement dans le sol. Les apports de matière extraterrestre inscrits dans le sol terrestre avant la formation de l'atmosphère ont, quant à eux, été détruits par l'érosion et la tectonique des plaques. Parmi les éléments d'origine cosmique, l'azote est l'un des plus importants pour la vie, car il entre dans la composition de nombreuses molécules organiques. Le diazote représente en outre quelque 80 pour cent de notre atmosphère ! En étudiant des grains de sol lunaire, nous venons de prouver que l'azote terrestre, qui a la même origine que l'azote lunaire, a deux provenances majeures : le Soleil et les météorites.

Les 17 missions Apollo ont récupéré un échantillonnage représentatif du sol lunaire qui fut exposé au bombardement cosmique à différentes époques géologiques. Au cours des trois dernières décennies, les cosmochimistes ont analysé la composition de ces échantillons et tenté d'en comprendre la provenance. Ils ont découvert que les gaz rares contenus dans les sols lunaires y sont implantés par le vent solaire. Leur composition chimique et isotopique est constante et similaire à celle que l'on mesure lors d'expériences d'irradiation par le rayonnement solaire. Si les gaz rares du sol lunaire proviennent du vent solaire,

est-ce le cas de l'azote ? Les chercheurs ont constaté que la composition isotopique de l'azote du sol lunaire variait beaucoup. D'une mesure à l'autre, le rapport de la concentration d'azote 14 sur celle d'azote 15 pouvait changer de 30 pour cent.

La première hypothèse lancée pour expliquer cette variabilité fut que la composition isotopique du Soleil avait varié au cours du temps, modifiant celle du rayonnement solaire. Si c'est le cas, les concentrations en isotopes de gaz rares auraient dû changer elles aussi, puisque ces éléments sont présents dans le Soleil. Les astrophysiciens ne connaissaient en outre aucun mécanisme physique susceptible d'engendrer des variations isotopiques aussi grandes. L'idée que ces écarts dans la composition en azote du sol lunaire résultent des contributions successives de plusieurs sources cosmiques s'est alors imposée. Il restait à en apporter une preuve expérimentale.

C'est ce que nous avons fait grâce à la sonde ionique du Centre de recherche en pétrochimie et géochimie de Nancy. Dans cette installation, des ions sont projetés sur une zone précise de l'échantillon, et en arrachent les atomes. Les « ions secondaires » ainsi produits sont analysés à l'aide d'un champ magnétique qui les dévie différemment selon leur nature, ce qui permet de les séparer. Cette technique livre les concentrations et les compositions isotopiques de tous les éléments présents dans la zone analysée, dont la position est connue à 10 nano-

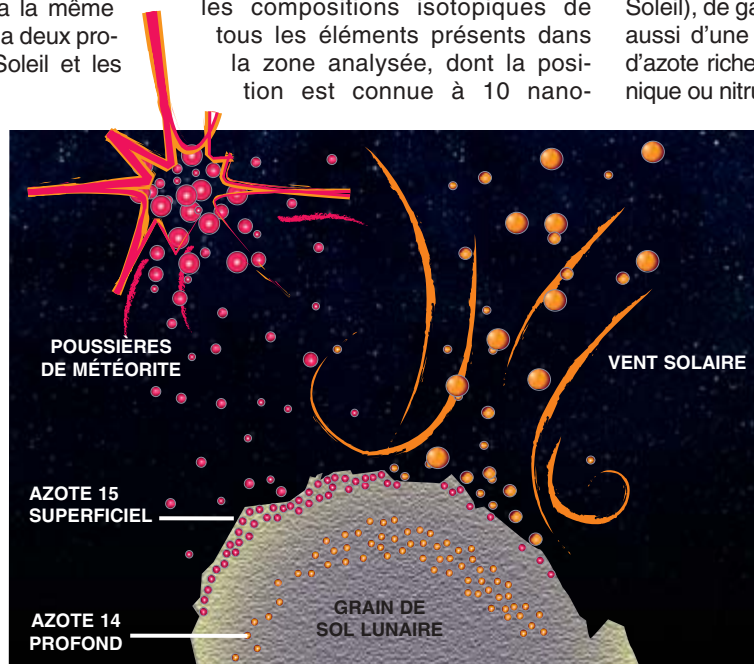
mètres près. Grâce à cette résolution spatiale, nous avons mesuré de quelle façon les concentrations d'azote 14, d'azote 15 et d'autres isotopes varient à partir de la surface du grain de sol lunaire étudié.

Qu'avons-nous constaté ? Nous savions que l'énergie cinétique des ions apportés par le vent solaire les fait pénétrer jusqu'à quelque 50 nanomètres à l'intérieur des grains. Or l'azote trouvé à cette profondeur est pauvre en azote 15, mais riche en azote 14. Comme il n'est pas associé à du deutérium (un atome d'hydrogène alourdi par un neutron qui est décomposé par le Soleil), on en déduit que cet « azote profond » est d'origine solaire.

En revanche, l'azote trouvé dans les premiers nanomètres contient 24 pour cent de plus d'azote 15 et est associé à des atomes de deutérium : il provient de météorites ou de comètes, qui contiennent du deutérium. L'impact sur le sol lunaire vaporise certains éléments, tel l'azote, qui, ensuite, se déposent en surface.

Ainsi, nous avons mis en évidence la grande hétérogénéité des isotopes de l'azote dans le Système solaire. La majorité de cet élément contenu dans le Soleil est pauvre en azote 15. En revanche, l'azote contenu dans les planètes et les météorites est enrichi en azote 15. Cette dichotomie ne peut s'expliquer que par la présence, dans la nébuleuse protosolaire (qui a formé le Soleil), de gaz pauvre en azote 15, mais aussi d'une forme probablement solide d'azote riche en azote 15 (matière organique ou nitrures, par exemple). Il y aurait eu un transport de matière à l'échelle du Système solaire : les matières organiques azotées présentes dans les régions externes seraient parvenues dans la région centrale, où s'est formée la Terre. Nous espérons pouvoir appliquer bientôt notre méthode à tous les échantillons de sol lunaire du programme Apollo. Grâce à ces témoins du bombardement cosmique à plusieurs époques, nous pourrions quantifier le flux de matière reçu par la Lune au cours du temps, c'est-à-dire aussi celui qu'a reçu la Terre.

Bernard MARTY et Marc CHAUSSIDON, Centre de recherches pétrographiques et géochimiques, Nancy



Les constituants du vent solaire (les sphères jaunes) contiennent surtout de l'azote 14. Les particules pénètrent dans les grains de sol lunaire à environ 50 nanomètres de profondeur. Au contraire, en surface des grains, la proportion d'azote 15 (les sphères rouges) est supérieure : cet azote provient des retombées météoritiques. Ces compositions isotopiques renseignent les astronomes sur les flux de matière reçus par la Lune au cours du temps.

Des billes, modèles de cohabitation

Pour prévoir les interactions entre objets microscopiques, on étudie le comportement de billes macroscopiques chargées.

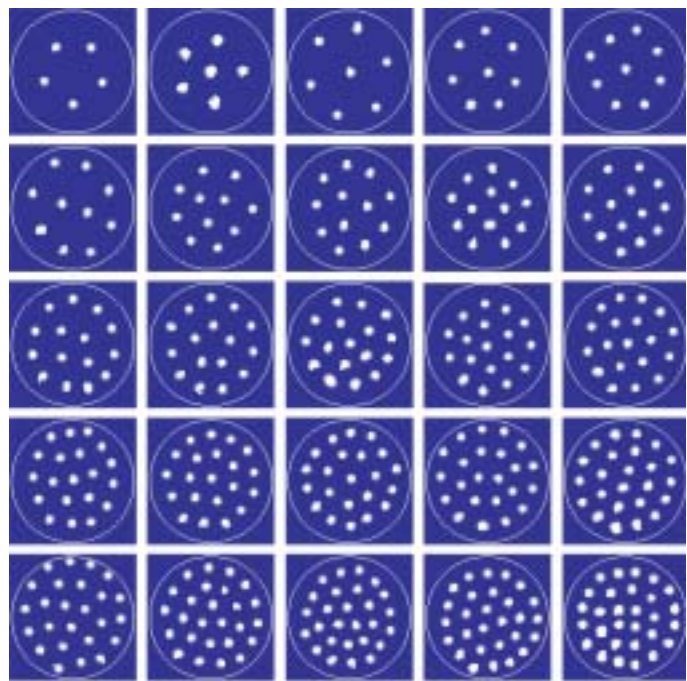
Comment s'organisent des êtres qui se détestent, mais qui sont condamnés à vivre sous le même toit? Loin des tribunaux, cette question se pose dans les systèmes physiques chaque fois que des objets qui se repoussent sont confinés à l'intérieur d'un espace clos. Michel Saint Jean, Catherine Even et Claudine Guthmann, du Groupe de physique des solides des Universités Paris VI et VII, ont réalisé un dispositif à l'échelle macroscopique qui permet d'observer pour la première fois les arrangements possibles de tels objets.

M. Saint Jean et ses collègues placent des billes d'acier de quelques millimètres de diamètre au centre d'un anneau métallique pris en sandwich entre deux plaques horizontales, l'une en métal et l'autre en verre, dont la surface a été rendue conductrice. Un potentiel électrique positif est appliqué sur la surface du verre, ce qui attire les électrons de la plaque inférieure vers les billes. L'espace qui sépare les billes de l'électrode supérieure interdit la circulation du courant et les charges restent piégées dans les billes : elles se chargent négativement et se repoussent. L'anneau, isolé des deux plaques

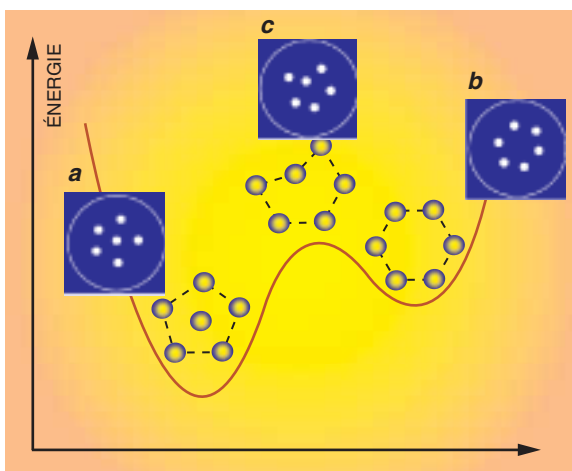
conductrices et soumis à un potentiel négatif, crée un champ électrique qui confine les billes à l'intérieur de l'anneau et les repousse vers son centre.

On ajoute des billes progressivement à l'intérieur de l'anneau et l'on observe les structures qu'elles forment. On observe que la première bille se place au centre ; avec une seconde, elles forment une paire centrée ; avec une troisième, un triangle isocèle ; avec une quatrième, un carré. Quand le nombre de billes atteint cinq, il existe deux motifs possibles : un pentagone ou un carré avec une bille au centre. Avec six billes, le nombre de motifs possibles passe à trois. L'un est un pentagone avec une bille au centre, un autre est un hexagone, et le dernier est une situation intermédiaire entre les deux, où la bille qui se trouvait au centre du pentagone se décale légèrement en direction de la position qu'elle prend au sein de l'hexagone. Le nombre d'organisations possibles augmente à chaque fois que l'on ajoute de nouvelles billes.

Pour un même nombre de billes, quelle est la configuration la plus stable parmi toutes celles observées? Pour le savoir, un système mécanique fait vibrer les plaques. L'agitation ne doit pas être trop intense, sinon le «cristal de billes» fond, c'est-à-dire que toute organisation macroscopique disparaît : les billes quittent leur position définie et retrouvent leur liberté comme dans un liquide ou dans un gaz. Plus la configuration résiste à l'agitation, plus elle est stable. Pour six billes, le résultat est par ordre décroissant de stabilité : le pentagone centré, l'hexagone, puis l'arrangement intermédiaire, le pentagone décentré. Pour qu'une structure existe, c'est-à-dire qu'elle persiste dans le temps, il faut qu'elle résiste à de petites variations de la position des billes. Autrement dit, les structures stables sont situées dans «les vallées de stabilité», où l'énergie est minimale. Le pentago-



Des billes métalliques chargées qui se repoussent et qui sont confinées à l'intérieur d'un anneau par un champ électrique radial adoptent diverses configurations. On fait varier ici le nombre de billes de 5 à 29. L'anneau est figuré par le cercle blanc. Pour un même nombre de billes, plusieurs organisations sont observées, mais seule la plus stable a été représentée.



Pour un nombre de billes égal à six, il existe trois structures stables. La première (a), le pentagone, correspond à un minimum de l'énergie du système ; la deuxième, l'hexagone (b), également, mais sa «vallée de stabilité» est plus élevée que la première. La troisième configuration (c), instable, est un état intermédiaire dont l'énergie correspond au col qui sépare les vallées des deux autres états.

ne centré, l'état le plus stable des trois configurations observées, correspond au minimum global de l'énergie. L'hexagone est également dans une vallée de stabilité, dont «l'altitude» est supérieure à la vallée du pentagone : c'est un état métastable. Sur la courbe d'énergie, le pentagone centré et l'hexagone se situent dans deux vallées mitoyennes, l'une étant plus basse que l'autre. Pour passer d'une vallée à l'autre, on doit franchir le col qui les sépare. Ce col correspond au troisième état observable : le pentagone décentré.

Peut-on prévoir les différentes organisations adoptées par les billes? Les billes sont partagées entre deux tendances : celle de s'arranger en réseau le plus régulier possible en se plaçant aux sommets de triangles équilatéraux, et celle de respecter la symétrie axiale du champ de confinement. Les états les plus stables seront ceux qui satisfont au mieux ces deux tendances simultanément. Pour six billes, le pentagone centré et l'hexagone respectent tous les deux la symétrie du confinement, mais le pentagone centré est plus proche du réseau triangulaire que l'hexagone, ce qui lui confère une plus grande stabilité. Pour un grand nombre de billes, on découvre progressivement tous les arrangements autorisés.