

ron 200 fois plus de chaleur qu'une molécule de gaz carbonique.

Une autre modification néfaste de l'atmosphère est amplifiée par le dioxyde d'azote (NO_2), qui est libéré par les micro-organismes qui agissent sur les engrais azotés. Cet oxyde (qui est d'ailleurs produit en quantités encore supérieures lors des combustions) réagit, en présence du rayonnement solaire, pour produire le smog photochimique. Bien que le dépôt de composés azotés contenus dans l'atmosphère favorise la croissance des végétaux dans des prairies ou dans des forêts carencées en azote, des doses excessives risquent de surcharger des écosystèmes sensibles.

Lorsque l'on a commencé à utiliser les engrais azotés de synthèse, on ne prévoyait pas ces nuisances et, même aujourd'hui, on s'en préoccupe moins que de l'augmentation de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone. Pourtant, tout comme la libération massive de dioxyde de carbone, l'introduction d'azote réactif dans l'environnement est une expérience géochimique risquée.

De l'habitude à la dépendance

Les émissions de dioxyde de carbone, et les menaces qu'elles font encourir au climat, peuvent être réduites par un ensemble de mesures économiques et techniques. Même sans crainte d'un réchauffement des climats, on doit se préoccuper du remplacement des combustibles fossiles, car ces derniers se raréfient. En revanche, nous n'avons aucun moyen de cultiver les végétaux sans apport d'azote, et aucun procédé ne pourrait aujourd'hui remplacer la synthèse de Haber-Bosch.

Le génie génétique créera peut-être un jour des bactéries symbiotiques du genre *Rhizobium* qui fourniront directement de l'azote aux céréales, ou bien il obtiendra des végétaux fixant directement l'azote, mais la recherche n'a pas encore abouti. L'humanité devra augmenter sa consommation d'engrais azotés de synthèse pour nourrir les milliards de personnes qui naîtront avant que la population mondiale ne cesse de croître.

Une stabilisation rapide de la population globale et l'adoption générale du végétarisme pourraient réduire

Le curieux destin de Fritz Haber



UPI/Cordis-Batmann

FRITZ HABER reçut le prix Nobel de chimie en 1918, malgré son activité durant la guerre.

n'était pas de son avis ; notamment sa première femme, tourmentée par l'épouvantable contribution de son mari à cette guerre, se suicida la veille de la première utilisation des gaz, en 1915. Condamné par le milieu scientifique, Haber poursuivit néanmoins ses recherches. Plus tard, les mesures antisémites des nazis le firent partir pour l'Angleterre (il était juif). Il mourut en 1934 à Bâle.

Malgré la remarquable contribution de Fritz Haber à la chimie et malgré sa découverte du procédé industriel de synthèse de l'ammoniac, le Comité Nobel lui accorda avec réticence le prix Nobel de chimie en 1918. Directeur de l'Institut Kaiser Wilhelm de chimie physique au cours de la Première Guerre mondiale, il avait introduit le chlore, puis le phosgène et l'ypérite, comme gaz de combat, parce qu'il était persuadé que de telles armes permettraient aux armées allemandes de remporter une victoire-éclair, qui réduirait les souffrances générales. Tout le monde



Cordis-Batmann

LES GAZ DE COMBAT ont fait d'innombrables morts lors de la Première Guerre mondiale.

les besoins en engrais azotés, mais peut-on raisonnablement s'attendre à de telles transformations ? À défaut, on devra améliorer l'utilisation des engrais : on obtient des résultats impressionnants en surveillant les concentrations en azote disponible dans le sol et en réglant les apports sur les besoins.

On ne peut apprécier le potentiel réel de l'« agriculture biologique » qu'en conservant ces considérations géopolitiques à l'idée. Si la rotation des cultures, la culture des légumineuses, l'entretien des sols et le recyclage des déchets organiques sont des techniques utiles, elles ne satisferont pas les besoins croissants des pays très peuplés qui manquent de terres cultivables. Si tous les agriculteurs revenaient aux méthodes traditionnelles de l'agriculture biologique, on constaterait rapidement que celles-ci ne sont pas en

mesure de nourrir la population mondiale, car l'azote est trop rare, dans les sols, pour nourrir six milliards d'hommes.

Lorsque l'Académie des sciences de Suède décerna le prix Nobel de chimie à Fritz Haber, en 1918, elle mentionna qu'il avait créé « un moyen extrêmement important d'améliorer la production agricole et le bien-être de l'humanité ». Toute dithyrambe qu'elle soit, cette description est insuffisante : aujourd'hui, deux milliards de personnes sont en vie parce que les protéines de leur organisme contiennent de l'azote qui est dû au procédé Haber-Bosch. À moins d'avancées du génie génétique, la plupart des protéines nécessaires à la survie et à la croissance des deux autres milliards de personnes, à naître dans les deux prochaines générations, proviendront de la même source.

Vaclav SMIL est professeur de géographie à l'Université du Manitoba.

Vaclav SMIL, *Population Growth and Nitrogen : An Exploration of a Critical Existential Link*, in *Population and Development Review*, vol. 17, n° 4, pp. 569-601, décembre 1991.

James N. GALLOWAY, William H. SCHLESINGER, Hiram LEVY II, Anthony MICHAELS et Jerald L. SCHNOOR, *Nitrogen Fixation : Anthro-*

pogenic Enhancement – Environmental Response, in *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 9, n° 2, pp. 235-252, juin 1995.

Ester van der VOET, Rene KLEIJN et Udo de HAES, *Nitrogen Pollution in the European Union : Origins and Proposed Solutions*, in *Environmental Conservation*, vol. 23, n° 2, pp. 120-132, 1996.

Vaclav SMIL, *Cycles of Life : Civilization and the Biosphere*, Scientific American Library, W.H. Freeman and Company, 1997.

Sablier inversé

PIERRE ÉVESQUE

L'étrange comportement du sable quand on fait vibrer un sablier où les grains montent, au lieu de descendre.

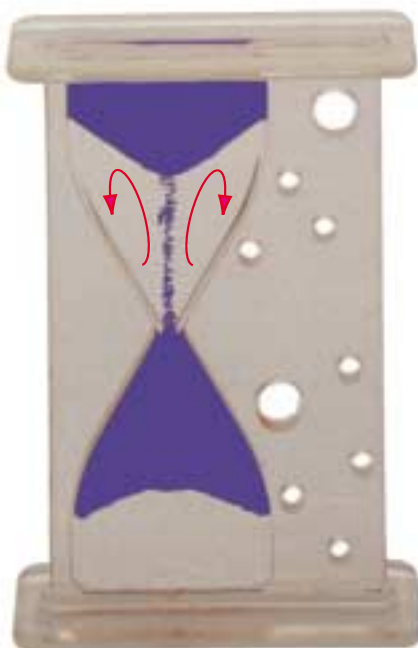
Étrange sablier ! L'écoulement du temps y est mesuré, non par la descente de grains de sable, mais par la montée de billes qui flottent dans un liquide. En avril 1995, nous en avons analysé le fonctionnement et avons vu que la chambre supérieure est le siège de deux circulations en sens opposés, engendrées par le déplacement du liquide, quand des billes remontent au centre de la chambre. Cet effet est semblable à celui qu'avait observé le médecin britannique M. Boycott, dans du sang coagulé qui sédimentait : les caillots qui descendent dans un tube vertical sont ralentis par le fluide qu'ils déplacent, mais la descente est facilitée quand le tube est incliné, parce que les caillots s'écoulent près de la face inférieure du tube, sans être gênés par le fluide qui remonte, au-dessus d'eux.

Nous avons également observé que, dans cette même chambre supérieure, la remontée des particules est plus lente près des parois verticales qu'au centre, et nous avons conclu que ce phénomène était dû à la viscosité du liquide environnant. Enfin nous avons remarqué l'existence d'une cheminée, dans la partie inférieure occupée par les billes : cette cheminée alimente en liquide la partie inférieure de la chambre inférieure, à mesure que les billes quittent cette dernière ; elle ressemble (en sens inverse) à la cheminée d'un volcan provoquée par l'expulsion des laves.

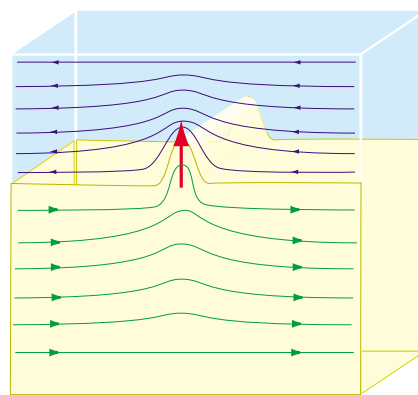
Je vous propose de reprendre le même sablier afin d'explorer d'autres effets hydrodynamiques. Nous nous limiterons à ceux qu'induisent des vibrations sur la forme de l'interface entre un liquide et un milieu granulaire (tas de sable ou tas de billes). Nous verrons que ces effets peuvent aussi être obtenus à l'interface de deux liquides.

Ces expériences permettent d'illustrer le comportement fluide d'un milieu granulaire. Nous verrons que, dans les cas examinés, les forces de frottement (forces visqueuses ou forces de frottement solide entre grains) sont négligeables et que les comportements

observés résultent des effets d'inertie dans les fluides incompressibles. Toutefois, avant d'examiner cette expérience avec le sablier inversé, nous examinerons une expérience similaire, dans une cellule de géométrie plus simple.



1. Circulation du liquide sous l'action de la montée des billes, dans un sablier inversé.



2. Une protubérance du milieu granulaire (en jaune) s'allonge dans le liquide qui surmonte ce milieu, parce que la vitesse augmente dans le liquide au passage de la protubérance : de ce fait, la pression diminue...

UNE EXPÉRIENCE DE VIBRATION

À l'aide de plaques de plexiglas, construisons une cellule rectangulaire, transparente, d'un centimètre d'épaisseur et de hauteur bien supérieure à l'épaisseur. Fixons cette cellule contre le cône d'un haut-parleur puissant, relié à un amplificateur où nous injectons l'enregistrement d'un *la* de diapason, le volume étant réglé au maximum (voir la figure 3). Ainsi nous pouvons faire vibrer la cellule horizontalement.

Remplissons à moitié la cellule de sable, complétons le remplissage avec de l'eau, et fermons hermétiquement sans laisser d'air. Lorsque la cellule est au repos, la pesanteur fait sédimenter les particules. La surface du tas de sable dans l'eau peut être horizontale ou inclinée, mais l'inclinaison ne peut être supérieure à un angle nommé angle de talus : la stabilité du sable dans une configuration inclinée résulte de l'existence d'un frottement solide entre les grains de sable ; en raison de ces forces de frottement, les grains des couches supérieures ne roulent pas sur les grains inférieurs.

Faisons alors vibrer la cellule horizontalement avec une amplitude a et une fréquence f fixes. Une telle vibration correspond à une accélération qui dépend du temps : aussi, dans la cellule, les particules sont soumises à une gravité effective qui est la somme de cette accélération et de l'accélération de la pesanteur. Cette accélération résultante oscille périodiquement autour de la verticale d'un angle β donné par $\tan \beta = 4\pi^2 a f^2 / g$.

Lorsque les amplitudes de vibration sont limitées, la gamme des inclinaisons possibles de la surface libre du sable diminue d'autant plus que les variations d'accélération imposées par la vibration sont importantes : toutes les pentes supérieures à $\phi - \beta$ sont déstabilisées. Ainsi, si l'angle β est inférieur à l'angle de talus ϕ , la surface libre reste stable dans une gamme d'inclinaisons, qui diminue quand l'amplitude de vibration croît. Puis, lorsque l'angle β devient supérieur à l'angle de talus ϕ , aucune surface libre n'est plus en équilibre, et l'on observe un va et vient rapide du sable, qui oscille autour d'une position d'équilibre : le sable se « liquéfie ». Un stroboscope nous montrera que le détail de la surface libre moyenne horizontale, créée par la vibration, a des caractéristiques insoupçonnées.

Avant de construire le stroboscope qui montrera les phénomènes invisibles à l'œil nu, remarquons que l'observation de la surface du sable redevient facile si l'on vibre encore plus fort la cellule : cette surface est ridée avec des rides perpendicu-

lares à l'axe de vibration, la distance entre rides est supérieure à l'amplitude de vibration et la hauteur des rides est environ égale à la distance entre les rides. En modifiant l'amplitude ou la fréquence de vibration, on constate que la hauteur des rides dépend de l'amplitude et de la fréquence de vibration. Enfin les rides forment un relief stationnaire, dont la hauteur n'oscille pas au cours du temps.

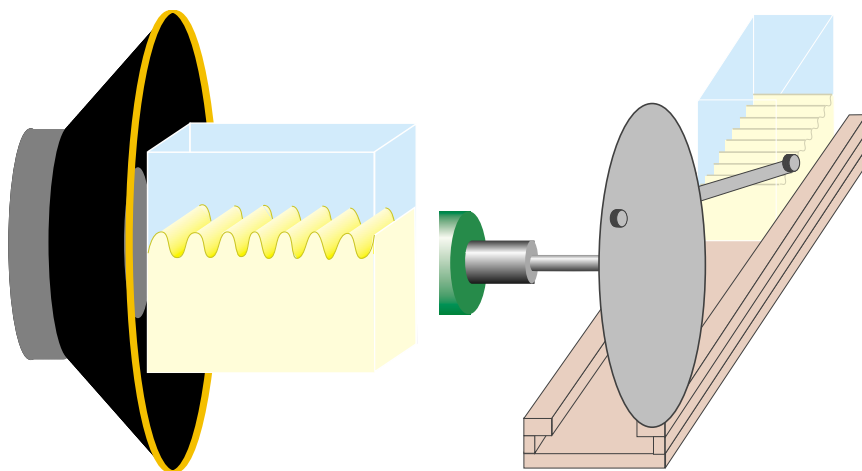
UN RELIEF STATIONNAIRE À LA SURFACE DU SABLE

Quand on réduit l'amplitude de vibration, l'aide du stroboscope devient essentielle, car le relief est complètement brouillé par le mouvement de la cellule. Pour construire le stroboscope, je vous conseille d'utiliser une perceuse à variateur de vitesse qui fera tourner un disque cranté (faites une dizaine de trous dans le disque pour augmenter la fréquence d'éclairement) devant une source intense de lumière. Vous continuerez de voir le profil stationnaire lorsque les distances entre rides sont inférieures à l'amplitude de vibration. Ainsi, quelle que soit l'amplitude de vibration, un relief stationnaire se crée !

Ceux qui voudront se lancer dans de la physique plus quantitative pourront déterminer les variations de la distance entre rides en fonction de l'amplitude et de la fréquence de la vibration : ils trouveront que le paramètre qui détermine les structures est $2\pi af$, et ils pourront vérifier expérimentalement que le résultat ne change pas si l'on change la taille des grains.

Le phénomène aurait-il encore lieu si les grains étaient de taille nulle ? Ce cas est celui de deux liquide non miscibles : dans les conditions de l'expérience précédente, on trouve que les rides n'apparaissent pas pour des vibrations trop faibles, mais qu'il existe un seuil au-delà duquel les rides apparaissent ; ce seuil correspond à des rides de longueur d'onde assez grande, observables à l'œil nu. L'absence de rides aux petites longueurs d'onde s'explique par l'existence de forces capillaires, à la surface des deux liquides : celles-ci empêchent l'existence de rides de petite longueur d'onde, qui correspond à un plissement trop important de l'interface (ces forces n'agissent pas dans le cas du sable plongé dans l'eau, car l'eau est partout présente). De surcroît, l'observation des rides pour des grains de taille nulle (pas de grains) montre que l'on doit chercher le moteur de la formation des rides dans le comportement liquide du milieu granulaire.

Pour comprendre la formation des rides, examinons les forces et les phé-



3. Deux façons de faire vibrer une cellule : à l'aide d'un haut-parleur ou d'une perceuse reliée à la cellule par une bielle. Ces vibrations engendrent des rides à l'interface du sable et de l'eau

nomènes importants dans les expériences précédentes. Le physicien américain Richard Feynman avait introduit les notions d'eau sèche et d'eau mouillée, pour distinguer respectivement les cas où les effets d'inertie sont les seuls à prendre en compte et ceux où la viscosité du fluide est notable.

UN LIQUIDE SEC

Un liquide sans aucune viscosité pourrait s'écouler contre une paroi sans exercer aucune force tangentielle sur cette dernière : au contact d'une paroi, la vitesse du liquide serait différente de la vitesse de la paroi. En revanche, un liquide visqueux se déplace à la même vitesse que les solides qu'il baigne : il mouille les parois. Loin de ces dernières, le liquide peut être soumis à des effets d'inertie qui l'obligent à bouger à une vitesse différente de celle de la paroi. L'eau réelle a les deux types de comportement : l'eau au contact d'une paroi a la même vitesse qu'elle, mais l'eau loin de la paroi peut avoir une vitesse différente si on exerce des forces qui la mettent en mouvement.

Que se passe-t-il si l'on impose à une plaque plane, mince, infinie, immergée dans l'eau, un mouvement vibratoire parallèle à son plan ? L'eau se comporte-t-elle comme de l'eau sèche, qui reste immobile, ou comme de l'eau visqueuse, entraînée par la vibration ? Le physicien irlandais George Stokes étudia théoriquement ce mouvement en postulant que l'eau était visqueuse. Il montra notam-

ment que le mouvement était essentiellement localisé sur une épaisseur nommée épaisseur de la couche visqueuse, et que l'amplitude de ce mouvement décroît exponentiellement avec la distance à la plaque. Par exemple, pour les fréquences de dix hertz dans l'eau, l'épaisseur de la couche visqueuse est de l'ordre de 0,5 millimètre.

Dans le cas qui nous intéresse, l'épaisseur de la couche visqueuse est inférieure à toutes les dimensions de la cellule, mais supérieure à la taille des pores entre les grains de sable. Aussi la viscosité des deux milieux peut être négligée, et ces derniers ne sont soumis qu'aux effets inertiels ; en revanche, les pores entre les grains ne sont pas suffisamment gros pour que le liquide interstitiel s'y mue librement. Aussi l'eau interstitielle est piégée entre les grains et se meut à la vitesse du milieu granulaire. L'ensemble des grains et de l'eau interstitielle forme une phase unique, que nous nommerons phase granulaire.

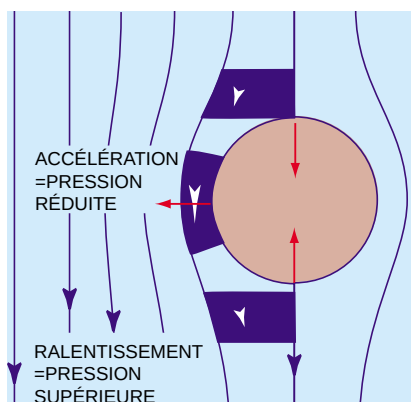
LES DEUX PHASES

Cette observation explique pourquoi les phénomènes qui s'observent dans une cellule contenant du sable et de l'eau se retrouvent dans une cellule contenant deux liquides non miscibles. De surcroît, l'analyse précédente nous permet de négliger l'effet de la viscosité sur la dynamique de chacune des phases et de considérer que la mécanique y est régie par l'inertie. Dans ce cas, les deux milieux sont soumis à une gravité effective qui varie périodiquement en amplitude et en direction. Le milieu le plus dense tend à se mouvoir dans la direction de la gravité effective, et pousse le milieu le moins dense en sens inverse (le milieu le plus dense est le plus inerte). Cela

Pour se procurer le sablier utilisé dans les expériences décrites par P. Évesque, voir la page 92.



4. Quand on fait vibrer verticalement le sablier inversé, on observe la montée de «gouttes» de matière granulaire, qui se déforment en strates horizontales.



5. Une goutte qui s'élève dans un liquide s'aplatit, parce que le liquide accélère en la contournant : cette accélération s'accompagne d'une réduction de la pression sur la ceinture de la goutte ; simultanément, la pression augmente au-dessus et au-dessous de la goutte, quand le fluide ralentit.

crée un mouvement périodique des deux liquides, la phase la plus dense se dirigeant dans le sens opposé à la vibration, et la phase la moins dense se dirigeant dans le sens opposé à la phase dense.

Que se passe-t-il quand une petite excroissance stationnaire se forme à la surface des deux phases ? Supposons que celle-ci soit engendrée au centre de la cellule, et qu'elle corresponde à l'invasion du liquide par la phase granulaire (voir la figure 2). Lors des mouvements de chaque phase, le débit de matière vers la droite est égal au débit

de matière vers la gauche, car toute la matière se conserve, dans la cellule fermée. Par exemple, si la phase supérieure se déplace vers la droite, la phase inférieure doit se déplacer vers la gauche. Or une excroissance née spontanément dans la phase supérieure réduit la section de la zone où la phase supérieure se déplace : la vitesse du fluide supérieur augmente, tandis que la vitesse du fluide inférieur diminue, à la verticale de l'excroissance. Selon la loi de Bernoulli, qui stipule que les fluides ont une pression inférieure quand leur vitesse augmente (parce que la quantité de liquide est conservée dans un écoulement), on doit alors admettre que la pression diminue au-dessus de l'excroissance, et qu'elle augmente en dessous : l'excroissance peut croître.

Comme l'interface n'est jamais en équilibre parfait, un ensemble de petites excroissances est amplifié, jusqu'à ce que les excroissances de plus grande longueur d'onde s'imposent. Pourquoi existe-t-il une limite à la taille des excroissances ? Parce que la pesanteur aplatit les excroissances trop grandes.

LA VIBRATION À L'ENVERS

Quel résultat obtiendrions-nous en faisant vibrer le sablier inversé ? Nous pouvons obtenir la vibration voulue en remplaçant la petite cellule parallélépipédique par le sablier, sur le haut-parleur, mais nous pouvons aussi faire vibrer le sablier à l'aide d'une perceuse électrique équipée d'un variateur électronique. On fixe la perceuse sur un bâti où l'on place des glissières, et l'on engage sous ces glissières un support que l'on fait glisser en le reliant à l'axe de rotation de la perceuse par un système simple de bielle et de manivelle (voir la figure 3). Ainsi obtient-on des vibrations intenses et rapides : les meilleurs résultats s'obtiennent pour des amplitudes de vibration comprises entre 0,1 et 10 millimètres, et des fréquences comprises entre 1 et 60 hertz. Attention aux yeux et aux doigts : les accélérations sont si fortes qu'on prendra garde à ne jamais se placer dans la direction du mouvement, qui risque de désolidariser les pièces ; en outre, on recouvrira le montage d'un carter de protection.

Redressons le sablier et faisons-le vibrer verticalement. En l'absence d'écoulement (si tous les grains sont déjà piégés dans la chambre supérieure), rien ne se passe. En revanche, si l'on retourne le sablier et qu'on déclenche l'écoulement, on observe des phénomènes qui

dépendent de l'amplitude et de la fréquence de vibration. Pour les examiner, vibrions à amplitude constante et à fréquence croissante.

Les effets, à fréquence nulle, faisaient l'objet du précédent article : tant que la fréquence est faible, les grains montent normalement. Si l'on fait vibrer lentement, les différences de densité provoquent la déviation des grains au passage du col (en dessous, aucun effet n'est visible, car les grains sont tassés contre le col). Pourquoi sont-ils alors collés contre les parois ? L'effet est le même que quand on souffle sur une feuille de papier posée sur une table : la vitesse de l'air augmentant entre la table et la feuille, la pression qui diminue (encore l'effet Bernoulli !) plaque la feuille contre la table. De même, la vitesse du liquide (imposée par les oscillations), entre les grains et les parois, plaque les grains contre les parois. Après une petite propagation contre les parois, les particules se détachent et remontent normalement.

Si l'on augmente encore la fréquence de vibration, le phénomène s'accroît et la longueur sur laquelle l'écoulement granulaire suit la paroi inclinée augmente. L'écoulement finit toutefois par se détacher, et l'on observe la formation de «gouttes» de milieu granulaire. Si l'on augmente encore la fréquence, les gouttes deviennent oblongues, s'étirant horizontalement en remontant lentement ; vers le sommet, les gouttes sont si déformées qu'elles s'arrangent sous la forme de couches horizontales qui montent très lentement (voir la figure 4).

On explique encore ce phénomène de stratification par l'effet Bernoulli. Considérons une goutte de matière granulaire (voir la figure 5). La vibration provoque un mouvement de va-et-vient dans le liquide. Au sommet et à la base de la goutte, la vitesse relative du liquide est nulle ; en revanche, elle est importante sur les bords verticaux. Aussi la pression est supérieure en haut et en bas de la goutte, qui est donc écrasée. Ce même mécanisme devrait s'observer sur les bulles de gaz qui remontent dans un liquide. Je suis heureux de signaler aux lecteurs de *Pour la science* que cet effet de stratification des gouttes de liquide granulaire vient d'être découvert ; ils l'ont en avant-première.

Pierre ÉVESQUE est directeur de recherche à l'École Centrale de Paris.

A. Ivanova, V. Kozlov et P. Évesque, *Europhysic Letters*, 35, p. 159-164, 1996.

