

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.

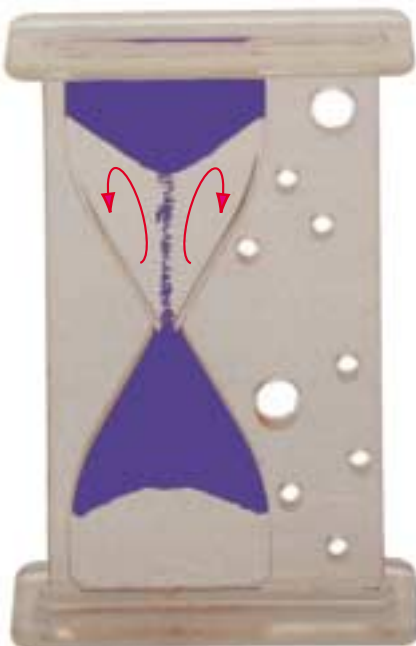
Étrange sablier ! L'écoulement du temps y est mesuré, non par la descente de grains de sable, mais par la montée de billes qui flottent dans un liquide. En avril 1995, nous en avons analysé le fonctionnement et avons vu que la chambre supérieure est le siège de deux circulations en sens opposés, engendrées 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.

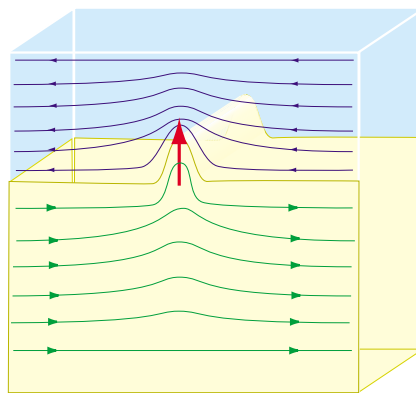
Je vous propose de reprendre le même sablier afin d'explorer d'autres effets hydrodynamiques. Nous nous limiterons à ceux qu'induisent des vibrations sur la forme de l'interface entre un liquide et un milieu granulaire (tas de sable ou tas de billes). Nous verrons que ces effets peuvent aussi être obtenus 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 examinons 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 $\operatorname{tg} \beta = 4\pi^2 a f^2 / g$.

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-