

Arabidopsis thaliana, une plante de la même famille que le chou (les crucifères) et bien adaptée aux études génétiques, le canal ionique, dénommé SKOR, qui transfère le potassium de la racine vers les vaisseaux qui véhiculent la sève.

Les ions potassium du sol pénètrent dans les cellules périphériques de la racine par le canal AKT1 découvert en 1992 par la même équipe ; puis ils circulent dans le réseau formé par les cellules jusqu'au cœur de la racine où des cellules les transfèrent par le canal SKOR dans les vaisseaux du xylème qui conduit la sève brute vers les parties supérieures de la plante. Une partie du

potassium redescend dans les vaisseaux du phloème et repasse dans les vaisseaux du xylème par un canal encore inconnu.

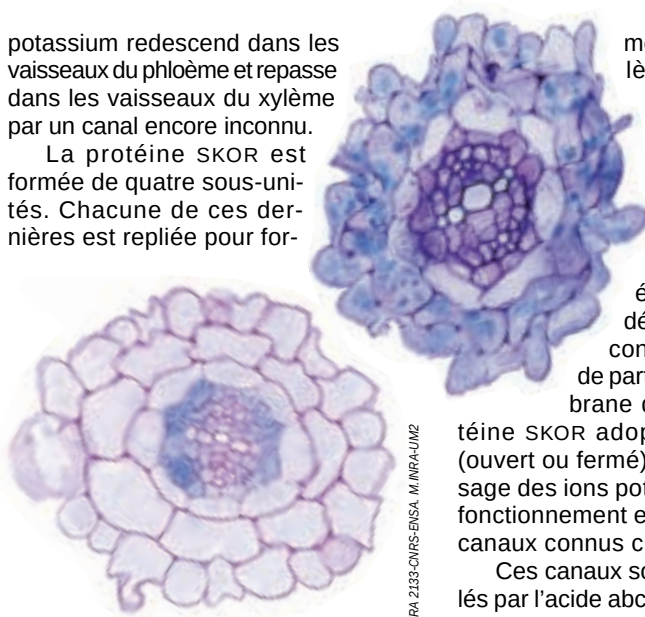
La protéine SKOR est formée de quatre sous-unités. Chacune de ces dernières est repliée pour for-

mer six segments parallèles qui traversent la membrane des cellules situées à la frontière entre les racines et les vaisseaux du xylème.

L'un des six segments est chargé électriquement et se déplace en fonction des concentrations ioniques de part et d'autre de la membrane de la cellule : la protéine SKOR adopte ainsi deux états (ouvert ou fermé) dont dépend le passage des ions potassium. Ce mode de fonctionnement est proche de celui de canaux connus chez l'homme.

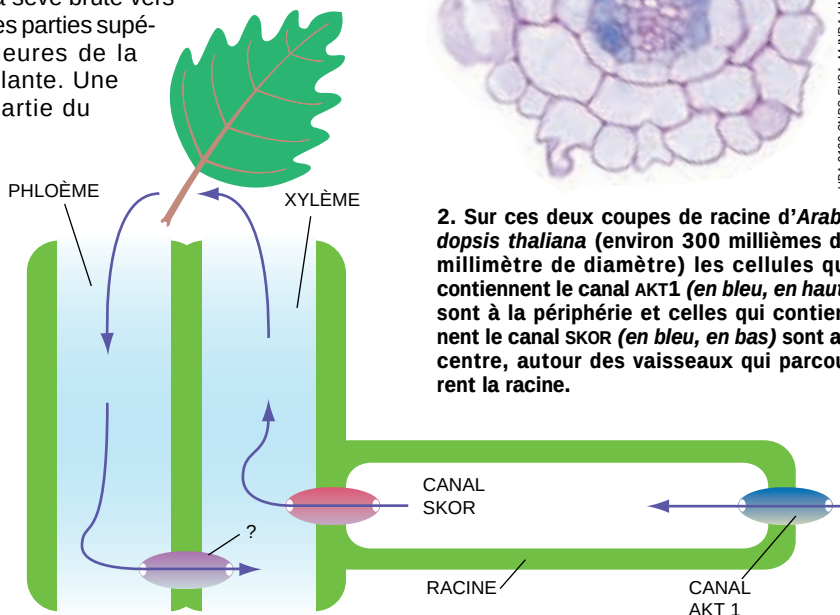
Ces canaux sont également contrôlés par l'acide abscissique, une hormone végétale impliquée dans les réactions au stress telles que la sécheresse et le froid, et qui agit sur l'ensemble de l'organisme, des racines aux feuilles.

Or la qualité du moût de raisin, et donc du vin, dépend de la concentration en potassium dans les baies : plus elles sont riches en potassium, plus l'acidité du moût et les qualités organoleptiques du vin diminuent. Toutefois, comme les ions potassium sont indispensables à la bonne croissance de la vigne, les agronomes cherchent à diminuer la teneur en potassium, mais uniquement dans les baies. Pour ce faire, ils tentent, par des modifications génétiques ciblées sur le canal SKOR, de contrôler le transport et la répartition des ions dans la vigne.



URA 2133-CNRS-ENSA, M. INRA-UN2

2. Sur ces deux coupes de racine d'*Arabidopsis thaliana* (environ 300 millièmes de millimètre de diamètre) les cellules qui contiennent le canal AKT1 (en bleu, en haut) sont à la périphérie et celles qui contiennent le canal SKOR (en bleu, en bas) sont au centre, autour des vaisseaux qui parcourent la racine.



1. Les ions potassium pénètrent dans la racine par le canal AKT1 (en bleu), puis sont sécrétés par le canal SKOR (en rouge) dans le xylème qui les véhicule jusque dans les feuilles. Ils empruntent ensuite le phloème et rejoignent le xylème par un canal inconnu (en violet).

Déchets contre déchets

La pulpe de betterave pour le traitement de l'eau.

Comment éviter les rejets de métaux lourds dans les eaux usées des usines ? Les lagunages qui sont à la mode dans nombre de communes rurales éliminent bien les composés organiques des eaux usées, mais ils ne retiennent pas les métaux comme le plomb, le cuivre et leurs cousins, tous toxiques en concentrations élevées. Jean-François Thibaut et ses collègues de la Station INRA de Nantes ont trouvé un procédé pour capter ces atomes à l'aide d'un déchet de l'industrie agro-alimentaire : ils font passer les eaux usées à travers des pulpes de betteraves.

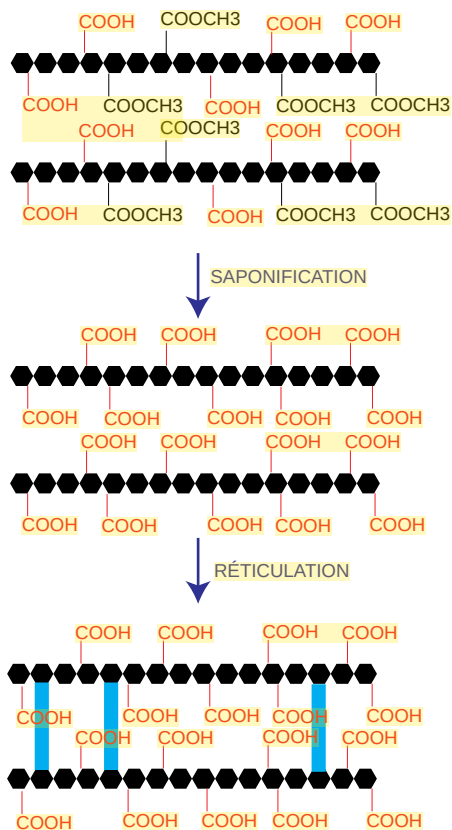
Ces dernières sont produites en abondance par les industries sucrières : les

25 millions de tonnes de betteraves produites chaque année en France engendrent, après extraction du sucre, 1,3 million de tonnes de pulpe sèche. Celle-ci est vendue pour l'alimentation animale à raison de 700 francs par tonne, mais elle est composée de molécules intéressantes : quelques sucres résiduels, et, surtout, de la cellulose et de la pectine. Ne peut-on tirer un meilleur parti de ces molécules élaborées ?

La pectine est un polymère, c'est-à-dire une molécule composée par l'enchaînement de sucres élémentaires, essentiellement l'acide galacturonique. C'est une molécule que connaissent bien les cuisiniers qui font des confitures : quand on chauffe des fruits en présence de sucre, elle est extraite des parois et passe en solution ; puis, quand le mélange refroidit, les molécules de pectine s'associent et forment un gel, la confiture. Toutefois, toutes les molécules de pec-

tine ne gélifient pas : tout dépend de leur groupes latéraux, qui sont soit des groupes acide carboxylique ($-\text{COOH}$), soit des groupes acides estérifiés par du méthanol ($-\text{COOCH}_3$). Ne gélifient que les molécules de pectine méthylées, c'est-à-dire comportant une forte proportion (plus de 70 pour cent) de groupes latéraux estérifiés. Les molécules de pectine de betterave, qui comportent peu de groupe méthylés, ont longtemps semblé sans intérêt, parce qu'elles ne gélifient pas, mais cet inconvénient portait un avantage : les nombreux groupes acide carboxylique peuvent se lier aux atomes métalliques ionisés (c'est-à-dire qui ont perdu des électrons).

Ayant vérifié les propriétés d'absorption d'ions métalliques par la pulpe de betterave préalablement lavée, les chimistes de Nantes ont d'abord cherché un traitement qui augmenterait ces propriétés. Pourrait-on détacher le méthanol des



Pour obtenir des molécules de pectines qui captent efficacement les métaux, on les saponifie, afin d'augmenter le nombre de sites fixateurs (en rouge), puis on les réticule (par des molécules schématisées en bleu) afin de limiter leur gonflement.

groupes latéraux méthylés afin de créer de nouveaux sites de liaison aux ions métalliques? Les chimistes ont traité la pulpe de betterave par une base, afin d'effectuer une réaction chimique de saponification (par la même réaction, on transforme les graisses en savon). Un traitement qui dure seulement une heure et demie double la capacité d'absorption des atomes métalliques.

Hélas, quand on saponifie ainsi les pectines, les mêmes groupes latéraux qui fixent des ions métalliques se lient aux molécules d'eau, de sorte que la pulpe gonfle excessivement quand on la met dans l'eau. Ce gonflement serait gênant, lors d'un traitement des eaux, car la pulpe qui aurait capté des ions métalliques devrait être coûteusement séchée avant d'être incinérée. Comment éviter ce gonflement? Les chimistes nantais ont proposé de lier les molécules. Les deux composés testés (le formaldéhyde, ou formol, et l'épichlorhydrine) relient des groupes latéraux hydroxyle ($-OH$) portés par les molécules de pectine. Si la réticulation par le formaldéhyde réduit la capacité de liaison, la réticulation par l'épichlorhydrine réduit considérablement le gonflement sans diminuer la capacité de fixation.

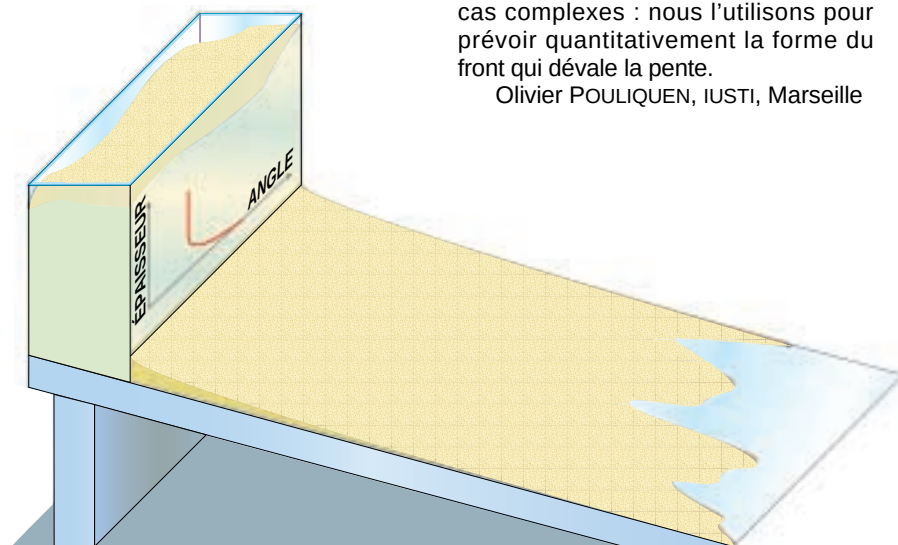
Glissements de terrain

La mécanique de l'écoulement du sable : une couche mince s'écoule difficilement.

Quoi de commun entre un éboulement de terrain, la chute du sable dans un silo, le déchargement d'un silo de céréales? Dans tous les cas, de la matière en grains s'écoule. Comment? Malgré l'importance des écoulements granulaires dans l'industrie et en géophysique, la simple question «à quelle vitesse coule une couche de sable sur une pente?» reste ouverte. Des expériences d'écoulement sur plan incliné apportent un début de réponse.

Les comportements des milieux composés de grains sont d'une grande variété. Lors de la construction d'un édifice, par exemple, le sol (granulaire) se déforme sous le poids et se comporte comme un solide, car les frottements des grains sont importants et les déformations sont lentes. En revanche, quand on secoue énergiquement une boîte partiellement remplie de sable, les collisions entre les grains sont élastiques et le milieu a les caractéristiques d'un gaz.

Toutefois, dans de nombreuses applications ou lors d'événements naturels, comme les avalanches et les glissements de terrain, les grains ont un comportement intermédiaire. Au cours d'une avalanche de roches, les grains roulent tout en restant en contact avec leurs voisins. Ils interagissent à la fois par collisions et par frottements. Comment décrire ces écoulements denses? Par analogie avec un liquide? Peut-être, mais le sable est loin de se comporter comme de l'eau.



Ce dispositif expérimental mesure l'épaisseur d'un dépôt après une avalanche de sable.

Une meilleure compréhension des propriétés d'écoulement passe par des expériences de laboratoire dans des configurations épurées.

L'expérience que nous avons réalisée consiste à faire couler un milieu granulaire simplifié (des billes de verre de 0,5 millimètre de diamètre) sur un plan incliné rugueux. Contrairement à un fluide classique, un milieu granulaire ne s'écoule pas dès que l'on incline le plan. Depuis un travail d'Augustin Coulomb, en 1773, on sait que le sable s'écoule quand l'angle du plan sur lequel il repose est supérieur à un angle critique, l'angle dit angle de talus. Toutefois nos expériences ont montré que le phénomène d'écoulement est plus complexe que ne l'avait pensé Coulomb : le seuil d'écoulement dépend à la fois de l'angle du support et de l'épaisseur de la couche de sable ; une couche mince coule plus difficilement qu'une couche épaisse.

Cet effet semble dû à la rugosité du support. Le dépôt qui subsiste après un écoulement est, d'ailleurs, une manifestation du phénomène : lorsque l'écoulement n'est plus alimenté, il reste sur le plan rugueux une couche immobile car le sable ne s'y écoule plus. Son épaisseur, mesurable, est celle pour laquelle l'écoulement s'arrête.

L'épaisseur du dépôt subsistant renseigne sur la vitesse de l'écoulement, comme l'ont révélé les mesures systématiques de vitesses d'écoulement que nous avons entreprises pour différentes valeurs des paramètres : angle d'inclinaison, épaisseur et rugosité du fond. Les données expérimentales se rassemblent sur une courbe reliant l'épaisseur du dépôt en fonction de l'angle d'inclinaison et elle permet de prévoir ces vitesses. La justification théorique de cette variation n'est pas élucidée, mais on détermine ainsi la vitesse d'écoulement dans des cas complexes : nous l'utilisons pour prévoir quantitativement la forme du front qui dévale la pente.

Olivier POULIQUEN, IUSTI, Marseille