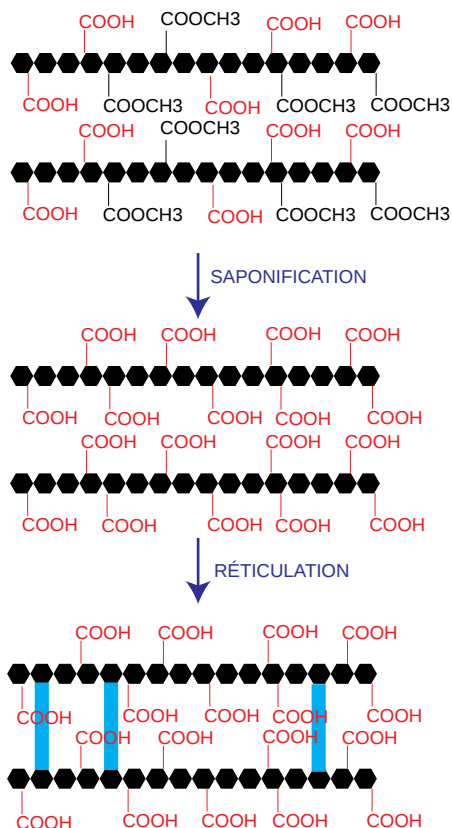




Pour obtenir des molécules de pectines qui captent efficacement les métaux, on les saponifie, afin d'augmenter le nombre de sites fixateurs (en rouge), puis on les réticule (par des molécules schématisées en bleu) afin de limiter leur gonflement.

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 sablier, 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.

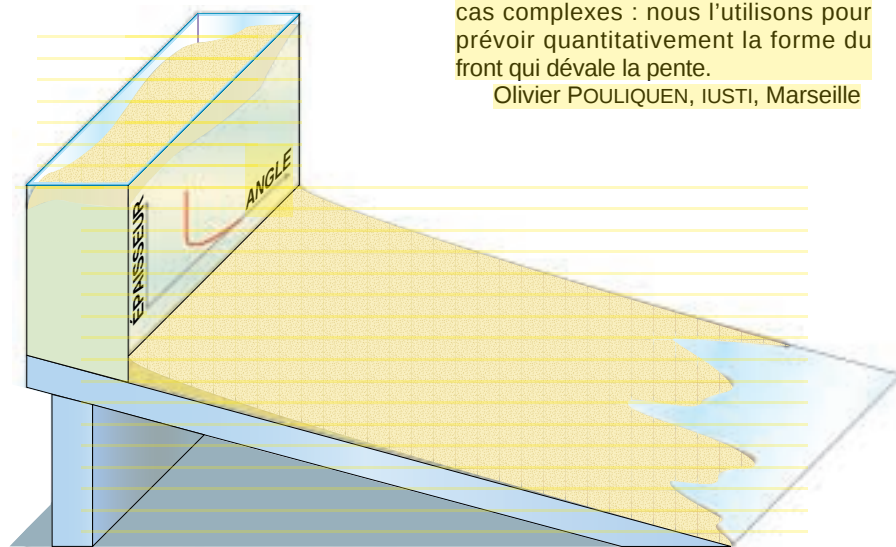
Une meilleure compréhension des propriétés d'écoulement passe par des expériences de laboratoire dans des configurations épurées.

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



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

Les stratégies de défense des plantes

SERGE KAUFFMANN • STÉPHAN DOREY • BERNARD FRITIG

Pour améliorer la protection des plantes, on étudie leurs mécanismes naturels de défense contre les micro-organismes : elles reconnaissent l'agent pathogène, déclenchent une réaction locale, puis globale, et «mémorisent» l'attaque pour réagir plus efficacement lors d'un éventuel assaut ultérieur.

A chaque instant les plantes doivent faire face à l'agression de champignons, de bactéries, de virus ou encore de nématodes (des vers) et, bien sûr, d'insectes ou d'herbivores. Ne pouvant fuir devant l'agresseur, elles ont élaboré au cours de leur évolution des défenses efficaces contre les divers agents pathogènes, et aujourd'hui l'apparition d'une maladie est plus l'exception que la règle. Pourtant, près de 20 pour cent des récoltes sont perdues à cause de l'attaque d'agents microbiens. De surcroît, ce résultat n'est obtenu que par l'emploi massif de produits phytosanitaires : le marché mondial des fongicides est estimé, à lui seul, à 40 milliards de francs.

Cette utilisation de substances aidant les plantes à lutter contre les micro-organismes pathogènes est contestée, car elle n'est pas sans conséquences sur l'environnement. Depuis quelques années, la connaissance des mécanismes de défense des plantes a notablement progressé, et de nouvelles stratégies de protection des végétaux sont envisagées : elles sont fondées sur une stimulation maîtrisée des défenses que les plantes ont naturellement élaborées au cours de l'évolution. Elles complèteraient, voire remplaceraient, les méthodes actuelles de phytoprotection.

Dans la nature, la plupart des espèces végétales sont protégées contre la plupart des micro-organismes. Ces derniers sont généralement incapables de franchir les barrières protectrices externes des plantes, par exemple la cuticule, une cire qui recouvre les feuilles, ou la paroi

pecto-cellulosique, l'enveloppe semi-rigide qui entoure les cellules végétales (la pectine et la cellulose sont les deux principaux constituants de cette paroi). Cette résistance passive existe indépendamment de la présence d'un agent pathogène. Toutefois, certains agresseurs contournent ces barrières mécaniques et pénètrent dans les plantes par les pores naturels, les stomates, ou par une blessure accidentelle. Les envahisseurs ne se développent pas nécessairement dans la plante, car ils n'y trouvent pas toujours les éléments nécessaires à leur multiplication.

De la défense passive à la défense active

Lorsqu'un agent pathogène dispose des armes nécessaires pour envahir une plante, ou bien la plante ne le détecte pas, et l'envahisseur en profite : l'issue de l'interaction peut être fatale pour la plante hôte ; ou bien la plante parvient à confiner l'agresseur sur le site d'attaque grâce à la mise en place de défenses actives, déclenchées par la présence de l'agent pathogène.

Ces mécanismes de défense se déroulent en trois phases. La première, l'étape de reconnaissance de l'agent pathogène, est essentielle, puisque, sans elle, les étapes ultérieures ne se déclenchent pas. La deuxième phase est celle de l'activation d'une cascade de signaux dans les cellules attaquées et de la transmission des signaux d'alerte aux cellules environnantes et à la plante entière. Enfin, au cours de la troisième étape, les réactions de défense s'expriment.

Ce scénario – perception, signalisation, réaction – est celui de toute méthode de défense active contre un agresseur. Ainsi, lors d'une infection chez les mammifères, l'agent infectieux est détecté, divers signaux activent le système immunitaire et des réactions de défense adaptées s'expriment.

Dès qu'une plante détecte un agent pathogène, elle met en place un des systèmes de défense naturelle les plus efficaces : une réaction d'hypersensibilité. Cette réaction violente se manifeste souvent par l'apparition d'une petite tache nécrotique localisée sur le site de pénétration du parasite (voir les figures 1 et 2) :

1. LA DÉFENSE ACTIVE des plantes lors de l'attaque d'un micro-organisme pathogène a deux objectifs : elle limite la dissémination de l'agent pathogène au site d'attaque et prépare la plante à mieux réagir à une possible agression ultérieure. Deux mécanismes concourent à stopper l'assaillant. D'une part, sur le site de pénétration de l'agresseur, les cellules infectées s'autodétruisent (a) pour retarder la progression de l'agresseur ; on constate une tache nécrosée en lumière visible. D'autre part, avant de s'autodétruire, les cellules émettent des signaux d'alerte vers les cellules avoisinantes, créant une zone de résistance locale acquise où s'accumulent de nombreux composés de défense. Cette zone, plus large que la zone nécrosée est visualisée chez le tabac quand la feuille est observée sous un rayonnement ultraviolet (b). Des signaux d'alerte sont également envoyés dans la plante entière (c) pour créer un état de veille qui lui permettra de réagir encore plus efficacement contre une nouvelle infection : c'est la résistance systémique acquise.