

À partir de C_i^* , on calcule les coordonnées R, V et B de la cellule i . Toutefois, les fonctions de chacune d'elles sont différentes afin d'éviter l'apparition du gris. En outre, dans ces fonctions, on choisit d'utiliser la valeur j , c'est-à-dire le rang de la ligne considérée : la coordonnée R est égale à $C_i^* \sin(j\pi/480)$, la coordonnée V à $(100 - C_i^*) \sin(j\pi/480)$, la coordonnée B à $90 - 0,8C_i^*$. Une fois ces règles définies, on laisse «travailler» l'ordinateur et on regarde ce qui arrive à partir d'une ligne initiale de 480 cellules aux couleurs choisies au hasard. Dans le tableau ci-dessous, ces règles ont été appliquées à une ligne où les bleus et les noirs ont été privilégiés. À chaque ligne initiale est associé un résultat graphique différent. Le tableau reproduit à côté du titre montre un autre résultat des mêmes règles appliquées à une ligne initiale différente.

Le résultat est *a priori* imprévisible dans ses détails ! Toutefois, on peut formuler *a posteriori* des hypothèses sur quelques caractéristiques du résultat obtenu. Par exemple, les discontinuités qui apparaissent surtout à droite du tableau seraient dues à la périodicité des fonctions *sinus* ainsi qu'au *modulo* : ces deux éléments ramènent brusquement la valeur de C_i^* qui dépasse 100 à 0. Par ailleurs, pourquoi le rouge et le cyan n'apparaissent-ils qu'au centre du tableau, selon l'axe vertical ? Pour des valeurs de j très petites (en haut) ou proches de 480 (en bas), $\sin(j\pi/480)$ est proche de zéro, réduisant les proportions de rouge et de vert dans le haut et le bas du tableau dominés alors par le bleu, ou par le noir quand la proportion de bleu est elle-même basse.

Certains artistes ont trouvé dans les automates cellulaires un moyen de création quasiment infini. Toutefois, ces derniers restent aussi des outils pertinents d'analyse : par exemple, les automates cellulaires sont utilisés pour simuler le comportement d'un gaz, les propriétés magnétiques d'un matériau, le développement urbain, la propagation d'un feu de forêt...

Grâce aux automates cellulaires, on étudie des univers virtuels dont on contrôle l'ensemble des lois. Peuvent-ils nous aider à comprendre le nôtre ? C'est ce que pense Stephen Wolfram, spécialiste de la complexité, qui, en étudiant notamment de façon systématique tous les automates cellulaires à une dimension où les cellules oscillent entre deux couleurs selon leurs voisins immédiats, s'interroge sur les formes complexes produites par un programme simple. Selon lui, les automates cellulaires à une dimension sont des calculateurs universels, c'est-à-dire qu'ils peuvent simuler n'importe quelle «machine». Aussi, défend-il l'idée selon laquelle on pourrait peut-être «reconstruire» notre univers dans ses moindres détails à partir d'un programme simple.

Bernard CAILLAUD est artiste et chercheur associé à l'Université de Caen.

Bernard CAILLAUD, *La création numérique visuelle. Aspects du Computer Art depuis ses origines*, Europia, Paris, 2001.

Stephen WOLFRAM, *A new kind of science*, Wolfram media, 2002.



Pièges à eau

JEAN-MICHEL COURTY • ÉDOUARD KIERLIK

Les meilleurs pièges à humidité (utilisés pour les couches-culottes !) sont ceux qui offrent une surface et une avidité maximales pour les molécules d'eau.

L'eau, c'est la vie, mais ses effets peuvent pourrir la vie. Elle s'infiltre dans les fondations des maisons, se condense sur les parois ou dans les locaux fermés, etc., commettant d'irréparables outrages. Et les bébés mouillés réveillent leurs parents. Comment se débarrasser de l'eau ? Avec des absorbants d'humidité ! Avec l'eau, tout est superficiel : les meilleurs absorbants d'humidité sont ceux qui offrent la plus grande surface de contact et qui ont la « plus grande soif ».

LA CAPILLARITÉ

De nos années passées sur les bancs de l'école, nous avons gardé le souvenir amusé de l'avidité des buvards. N'est-ce pas là une bonne méthode pour piéger l'eau ? Elle est en effet efficace, car elle exploite la capillarité. Au XVIII^e siècle, le médecin anglais James Jurin analyse le phénomène de capillarité en plongeant des capillaires (tubes fins) dans l'eau. L'eau présente une grande affinité pour le verre propre : elle « mouille » sa surface au maximum, cherchant à la recouvrir entièrement. La gravité qui la retient vers le bas l'empêche de monter jusqu'au sommet du capillaire. Ainsi, l'eau s'élève-t-elle dans le capillaire à une hauteur inversement proportionnelle au rayon de celui-ci. Elle monte par exemple à 14 millimètres dans un tube d'un millimètre de rayon et à presque un mètre dans un tube d'un rayon de dix micromètres.

Revenons à notre papier buvard et aux tissus qui, comme lui, sont constitués d'un entrelacs de fibres de cellulose. Ces matériaux offrent à l'eau de nombreux interstices, où elle pénètre par capillarité. Lorsque nous les soulevons après qu'ils se sont imbibés, l'eau reste piégée entre les fibres. L'imbibition des éponges et des chiffons absorbants de nos cuisines relève du même principe, la capillarité.

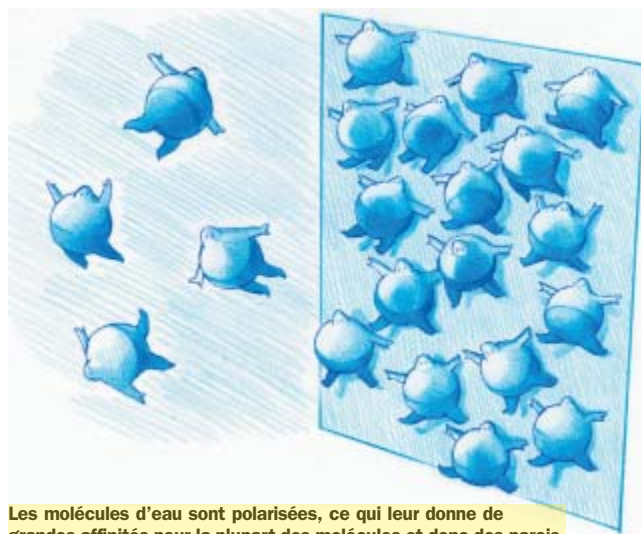
Nous nous interrogeons alors : pourquoi l'eau mouille-t-elle si facilement les surfaces de nombreux matériaux ? Comme nous le savons, une molécule d'eau est constituée d'un oxygène et de deux hydrogènes qui mettent en commun quatre électrons. Toutefois, l'atome d'oxygène tire à soi cette « couverture électronique ». La molécule d'eau est globalement neutre, mais elle présente une « polarité », c'est-à-dire des excès de charges, négatives sur l'oxygène et positives sur les deux hydrogènes. Cette molécule dite polaire interagit fortement avec les molécules chargées ou polarisées : tandis que l'oxygène (négatif) recherche la compagnie des charges positives, les hydrogènes (positifs) recherchent celle des charges négatives. Ainsi, les molécules d'eau se fixent durablement sur toutes les parois constituées de molécules polaires ou électriquement chargées, c'est-à-dire sur un bon nombre d'entre elles... Ces considérations permettent à l'ingénieur d'augmenter l'efficacité des éponges et autres papiers absorbants.

CHLORURE DE CALCIUM

Pour piéger l'eau, il faut lui présenter la surface la plus grande. Comment faire ? Nous plaçons souvent des dessiccants dans les armoires où nous rangeons des objets délicats, par exemple des appareils de mesure. Ces dispositifs déshydratants sont généralement composés d'un bac récepteur et d'une recharge contenant des cristaux de chlorure de calcium (CaCl_2). Mis en solution dans l'eau, ce sel se dissocie en anions calcium Ca^{++} et en cations chlorure Cl^- ; ceux-ci s'entourent de molécules d'eau, l'ion calcium attirant la partie oxygène de la molécule d'eau, l'ion chlorure, la partie hydrogène. Le même phénomène a lieu en présence des molécules d'eau de l'air ambiant : ainsi, le cation Ca^{++} et les deux anions Cl^- captent jusqu'à six molécules



Le papier absorbant de nos cuisines s'imbibe par capillarité : l'eau remonte entre les fibres de cellulose avant de se fixer à leurs surfaces.



Les molécules d'eau sont polarisées, ce qui leur donne de grandes affinités pour la plupart des molécules et donc des parois.

d'eau. Si l'humidité ambiante est grande, un gramme de chlorure de calcium «absorbe» jusqu'à un gramme d'eau. Dans la pratique, la capacité d'absorption des cristaux utilisés dans les sachets et dans les autres absorbeurs d'humidité est d'un demi-gramme d'eau par gramme, car le chlorure de calcium y est associé à d'autres composés indispensables au bon conditionnement. Grâce à cette capacité d'absorption, on contrôle l'humidité de l'air ambiant. À 20 °C, de l'air saturé (cent pour cent d'humidité) contient une dizaine de grammes d'eau par mètre cube. Dans un tel climat, un sachet de 100 grammes de chlorure de calcium suffit pour maintenir sèche une grande armoire (environ deux mètres cubes). La méthode n'a qu'un inconvénient : le chlorure de calcium absorbe tellement l'humidité, qu'il en devient déliquescent : il se transforme en une saumure peu esthétique dont il faut se débarrasser régulièrement.

GEL DE SILICE

Si cette saumure ne nous convient pas, nous pouvons revenir à notre idée première et utiliser un matériau solide offrant une très grande surface à l'eau, comme des granules de «gel» de silice. Une molécule de silice est constituée d'un atome de silicium et de deux atomes d'oxygène (SiO_2). Le gel de silice est constitué de granules de quelques millimètres de diamètre, très poreux (un quart de leur volume est vide). Ce squelette de silice, obtenu par évaporation du solvant d'une suspension de silice (gélifiée) dans ce même solvant, a une masse volumique de seulement 0,7 gramme par centimètre cube.

Le vide interne de chaque grain est constitué par une multitude de pores interconnectés de taille «nanoscopique», formant une surface totale considérable. Ainsi, chaque gramme de gel de silice présente une surface interne de 700 mètres carrés et un volume interne de 0,35 centimètre cube. Au cours de la préparation du gel de silice, on fabrique de nombreux groupements polaires qui attirent l'eau.

La surface interne des grains de silice est donc «friande» d'eau. En se gorgeant, les pores de la silice fixent jusqu'à 0,35 gramme d'eau par gramme, soit un peu moins que le chlorure de calcium, mais sans l'inconvénient de la formation de saumure : même saturée d'eau, la silice reste sèche au toucher. Ces avantages expliquent que l'on en trouve partout, au sein des emballages d'appareils photographiques comme dans ceux des médicaments. Les déshydratateurs industriels qui fonctionnent par adsorption en contiennent aussi : l'air à traiter y est envoyé à travers le gel de silice où il abandonne sa vapeur d'eau. Pour faire «rendre son eau» au gel de silice, il suffit de le chauffer jusqu'à 130 °C. Ainsi, l'oxyde de silicium, l'un des minéraux les plus courants à la surface de la Terre, permet de produire un déshydratant d'usage non seulement universel, mais réversible !

Est-il vraiment utilisé partout ? Les jeunes parents connaissent les réveils nocturnes résultant de l'irritation des fesses mouillées de bébé. Les couches contiennent-elles du gel de silice ? Non. Chaque miction représente environ 50 grammes de liquide et pour absorber les trois mictions de bébé, pas moins de 430 grammes de gel de silice seraient nécessaires. Or, nous savons que les couches de bonne qualité ne deviennent pas humides malgré leur finesse et qu'elles pèsent moins de 100 grammes ! Que contiennent-elles ?

De l'acide acrylique polymérisé, c'est-à-dire de longues chaînes dont chacun des maillons est une molécule d'acide acrylique. Sec, ce polymère a l'aspect d'un sel, car pour le produire, on doit notamment neutraliser l'acide acrylique avec de la soude ou de la potasse. De ce fait, le polymère contient de nombreux atomes d'oxygène chargés négativement liés à des ions sodium ou potassium chargés positivement. En outre, les chaînes sont connectées par des liaisons moléculaires élaborées au



La masse de polyacide acrylique contenue dans une couche-culotte absorbe et y fixe jusqu'à un demi-litre d'eau. L'ajout de chlorure de sodium ou de tout autre sel en libère la plus grande partie.

moment de la préparation. Au final, ce polymère forme un réseau tridimensionnel comparable à des spaghettis reliés par un grand nombre de fils de fromage fondu.

Comment ce gel se comporte-t-il en présence d'eau ? Avec l'acide acrylique polymérisé, les physiciens pensent avoir réalisé une sorte d'«éponge ultime», dont les pores sont de taille moléculaire. En outre, puisque le réseau formé par les chaînes de ce polymère contient de nombreux cations de sodium et de potassium et de nombreux anions d'oxygène, il constitue un véritable «paradis» pour une molécule polaire comme l'eau. Une fois introduites dans le réseau, les molécules d'eau trouvent mille partenaires à qui se lier : tandis que certaines se rapprochent des ions d'oxygène négatifs, d'autres entourent les ions positifs (les hydratent). Ainsi partiellement libérés de l'attraction électrostatique des ions positifs, les ions d'oxygène négatifs se repoussent ; les chaînes du polymère se déplient et le volume du matériau augmente. Toutefois, les liaisons inter chaînes sont suffisamment solides pour que le matériau gonfle sans se dissoudre : il ne donne pas la saumure exécrée. Les résultats obtenus grâce à l'acide acrylique polymérisé sont vertigineux : ce matériau absorbe de 500 à 3 000 fois sa masse d'eau distillée !

Hélas, l'absorption est plus faible avec de l'eau salée ou de l'urine qui contiennent des ions. Ces derniers retiennent les molécules d'eau, contrecarrant ainsi l'attraction exercée par les ions qui se trouvent au sein du polymère. Pour cette raison, la masse de polymère absorbe seulement environ 30 fois sa masse. Une couche absorbe, par exemple, jusqu'à 500 grammes d'eau et la fixe si bien qu'elle y reste même si on comprime le polymère (bébé s'assoit).

Ce type de super absorbant n'est plus cantonné aujourd'hui aux couches-culottes ou aux serviettes hygiéniques. Coincé entre deux couches de tissus, il joue les déshydratants dans les barquettes alimentaires. Mélangé avec du caoutchouc, il donne un mortier d'étanchéité incroyablement efficace. Un tel mélange a par exemple été utilisé pour prévenir les infiltrations d'eau du tunnel sous la Manche. Si de l'eau parvient près du mortier, celui-ci gonfle, bouchant ainsi les fractures d'une barrière imperméable. Jamais, nous n'aurions imaginé un super absorbant capable de bloquer la Manche !

Jean-Michel COURT est physicien, chargé de recherche au CNRS. **Édouard KIERLIK** est physicien et maître de conférences à l'Université Pierre et Marie Curie.

F. BUCHHOLZ, *Journal of chemical education*, vol. 73, p. 512, 1996.

P.-G. de GENNES, F. BROCHARD-WYARD et D. QUÉRÉ, *Gouttes, bulles, perles et ondes*, Belin, 2002.