

ceaux de musique. La difficulté vient de faire comprendre et de faire composer à un ordinateur cette musique visuelle».

Plus prosaïquement, les bons joueurs de go évaluent une position en fonction de la forme et des positions respectives des groupes de pierres, et leurs raisonnements sont souvent plus intuitifs que rationalisés. Comment programmer ces capacités intellectuelles? Les meilleurs programmes de go actuels exécutent des milliers de règles identifiées empiriquement par des experts du jeu, mais les joueurs ne savent pas décrire comment ils évaluent les positions et choisissent leur coup. D'où la difficulté de programmation.

Au Laboratoire d'informatique de Paris VI, l'équipe *Métaconnaissance* de Jacques Pitrat étudie des méthodes générales pour faire découvrir par l'ordinateur lui-même des connaissances d'experts. J'ai appliqué ces méthodes

au jeu de go : le programme nommé *Introspect* s'améliore par observation et analyse de son propre fonctionnement, puis il donne ses connaissances au programme qui joue véritablement, le programme *Gogol*. Fondé sur l'auto-observation, l'apprentissage d'*Introspect* s'effectue de la façon suivante : ayant en mémoire la configuration du damier, il cherche les conséquences de chaque coup joué et analyse les raisons tactiques de ce coup. Quand il trouve des idées tactiques qu'il n'aurait pas su mettre en œuvre, il s'enrichit d'une connaissance nouvelle.

Une fois apprises et traduites en langage d'exécution rapide, les règles sont données au programme *Gogol*. Celui-ci n'envisage que quelques coups parmi les quelque 250 coups envisageables à chaque branche de l'arbre de recherche ; exécuté par un microprocesseur *Pentium 133*, il joue un coup

en dix secondes sur un damier 19×19 . Il envisage à chaque coup des centaines d'arbres de recherche qui comprennent chacun entre 2 et 500 nœuds, et il prévoit des séquences jusqu'à 60 coups à l'avance. À chaque nœud de chaque arbre, le programme applique les règles qu'il a apprises et qui conseillent les coups à utiliser. Ces règles, écrites par le programme, sont au nombre de 10 000.

Ainsi mon «métaprogramme» bat la plupart des autres programmes de go qui ont été écrits par des humains (il s'est classé sixième sur 40, lors de la dernière coupe Fost, qui a eu lieu en août 1997) et son potentiel de progression est supérieur à celui des autres programmes : une petite amélioration du métaprogramme peut conduire à de grandes améliorations des programmes finaux.

Tristan CAZENAVE
Université Paris VI

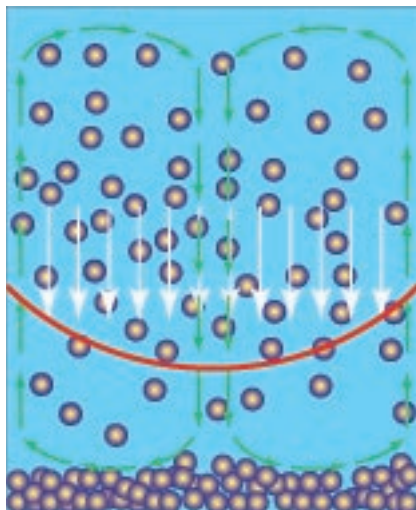
Convection intrinsèque

Lors de la sédimentation, un mouvement de convection s'ajoute à la chute des particules.

Les lois du phénomène de sédimentation permettent de retracer l'histoire des sédiments à partir de leur arrangement actuel. On utilise le phénomène pour séparer différentes espèces de particules ou pour clarifier les liquides. L'idée que l'on se fait de la sédimentation est en général assez simple : dans un liquide, les particules lourdes tombent au fond. La réalité est plus complexe : nous avons montré qu'au mouvement descendant des particules, s'ajoutait un mouvement de convection global de la suspension, c'est-à-dire des particules et du fluide.

Une sphère isolée tombant dans un liquide déplace ce liquide. En 1851, George Stokes a montré que la perturbation de la vitesse du liquide autour de la sphère décroît comme l'inverse de la distance à son centre. Cette perturbation modifie la vitesse d'une autre particule qui se déplace dans le liquide, laquelle modifie la vitesse de la première. Avec de nombreuses particules, chacune d'elles ressent les influences de toutes ses voisines. En modélisant cette interaction hydrodynamique à longue portée, on montre que, lorsque la concentration en particules augmente, la vitesse de sédimentation diminue. Cependant, ce résultat ne prend pas en compte l'effet des parois latérales du récipient.

Dans un récipient, les sphères ne peuvent s'approcher à moins d'un rayon des parois, en raison de leur volume. La densité de la suspension près des parois est ainsi inférieure à ce qu'elle est ailleurs dans la suspension. Étant moins dense, la suspension (les billes et le liquide) subit la poussée d'Archimède et remonte. Ce mouvement ascendant près des bords est équilibré par un mouvement descendant au centre. Ainsi se forment des rouleaux de convection.



Dans un récipient, une suspension de petites billes sédimente ; on filme la chute des billes et on détermine leur vitesse. Le profil de vitesse mesuré (courbe rouge) révèle une vitesse inférieure près des bords. Cette expérience confirme qu'au mouvement de chute des billes (flèches blanches) s'ajoute une remontée de la suspension près des bords et une descente au voisinage du centre (flèches vertes).

Prédite dans les années 1980, cette convection intrinsèque n'avait jamais été observée. Pour notre expérience, nous avons utilisé un récipient rempli d'un liquide d'indice de réfraction égal à celui de petites billes de verre. La suspension est ainsi transparente. Quelques billes de la suspension sont recouvertes d'une mince couche d'argent. À l'aide d'une caméra, on suit alors le mouvement de ces billes. La mesure de la vitesse de sédimentation moyenne est enregistrée d'un bord à l'autre du récipient lors du passage des billes. Nous avons observé que les particules tombent plus rapidement au centre que sur les bords, démontrant l'existence d'un mouvement de convection intrinsèque.

Ces mesures remettent en cause certains aspects de la théorie : pour des suspensions diluées, celle-ci prédit que la vitesse de la convection croît linéairement avec la concentration en particules. Or, nos expériences montrent que la vitesse de la convection croît à faible concentration et atteint une limite lorsque le volume de billes est compris entre 20 et 30 pour cent du volume de la suspension ; au-delà, elle s'annule. Nous avons aussi observé la structure de la suspension près des parois. À fortes concentrations, des couches diluées et concentrées alternent jusqu'à quelques diamètres de billes des parois. Aux concentrations élevées, la densité des couches externes est égale à celle du centre, et la convection n'a pas lieu.

Yannick PEYSSON
et Élisabeth GUZZELLI, ESPCI, Paris

L'architecture de la vie

DONALD INGBER

Un ensemble universel de règles de construction guide la conception des structures organiques, des simples composés carbonés jusqu'aux cellules et aux tissus les plus complexes.

La vie est la complexité même. De la bactérie à la baleine, les organismes se développent par le jeu des interactions compliquées d'un grand nombre de composants différents. Ces composants, ou sous-systèmes, sont eux-mêmes constitués d'éléments plus petits dont le comportement dynamique est autonome et spécifique, par exemple l'aptitude à catalyser des réactions chimiques. Pourtant, quand ces éléments sont combinés au sein d'unités fonctionnelles plus grandes – tels une cellule ou un tissu – des propriétés inattendues apparaissent, notamment la capacité de se déplacer, de changer de forme et de croître.

Bien que les chercheurs soient conscients de cette étrange particularité, ils n'en ont pas assez tenu compte dans leurs explications des principes fondamentaux de la vie. Au cours des dernières décennies, des biologistes ont exploré le fonctionnement du corps humain en caractérisant les propriétés des matériaux et des molécules essentielles de la vie, notamment l'ADN, matériau de base des gènes. Ils s'efforcent aujourd'hui d'identifier chaque élément de l'ensemble complet, le génome, spécifique de tout être humain. Les gènes spécifient la nature des protéines, les molécules clés de la vie ; aussi la connaissance prochaine du génome, Saint Graal de la biologie moléculaire, permettra-t-elle aux biologistes de constituer un catalogue presque complet des molécules d'un être humain. Toutefois, la structure des diverses parties d'une machine complexe, cellule ou moteur à explosion, n'explique pas le fonctionnement du tout. Aussi, identifier et décrire les pièces du puzzle moléculaire n'est que d'une aide minime pour la compréhension des lois régissant l'assemblage.

La nature fait appel à des règles d'assemblage simples illustrées par l'existence – à l'échelle moléculaire comme à l'échelle macroscopique – de motifs tels que spirales, pentagones et formes triangulaires. Ces motifs apparaissent dans les structures cristallines les plus régulières et dans les protéines les plus contournées, dans des organismes aussi différents que les virus, le plancton et l'être humain. Est-ce si étonnant ? Les matières organiques et minérales sont formées des mêmes éléments constitutifs : des atomes de carbone, d'hydrogène, d'oxygène, d'azote

et de phosphore ; la seule différence tient au mode d'assemblage des atomes dans l'espace.

Par auto-assemblage, les constituants se conjuguent pour donner naissance à des structures stables plus grandes dont les propriétés, nouvelles, ne pouvaient être prévues par les seules caractéristiques des éléments individuels. Dans la nature, l'auto-assemblage se manifeste à diverses échelles. À l'intérieur du corps humain, par exemple, de grosses molécules s'auto-assemblent en composants cellulaires, ou organites, qui s'auto-assemblent en cellules ; ces cellules s'auto-organisent en tissus, et les tissus en organes. Le résultat est le corps, organisé hiérarchiquement en différents systèmes, emboîtés comme des poupées russes. Ainsi, pour comprendre comment les créatures vivantes se forment et fonctionnent, il nous reste à découvrir les principes de cette organisation biologique.

Malgré des siècles d'étude, les chercheurs comprennent mal les forces qui poussent les atomes à s'auto-assem-