

Simulations et modélisations

JACQUES DUBUCS

Deux sortes de simulation apparaissent dans les années 1970 : l'une reproduit le fonctionnement d'un système à partir des équations qui le décrivent ; l'autre imite son comportement grâce à un algorithme inspiré de ses propriétés.

Bien avant la mise au point des ordinateurs, les scientifiques recouraient au calcul numérique pour tester leurs hypothèses ou pour s'inspirer des lois empiriques mises en évidence et qui leur permettaient de formuler de nouvelles hypothèses. Euler, dont Condorcet devait annoncer la mort en disant qu'il avait à la fois « cessé de vivre et de calculer », avait passé son existence dans une nuée de chiffres, entouré d'apprentis à qui il confiait le soin de tester ses conjectures arithmétiques sur des entiers dont la taille nous étonne encore.


Aujourd'hui, les tâches de calcul sont assurées par des machines. Toutefois, la façon dont ces machines sont utilisées diffère à bien des égards de ce à quoi l'on pouvait s'attendre en ce domaine, il y a une trentaine d'années. La plupart des pronostics prévoyaient un découplage entre l'activité de théorisation scientifique proprement dite et les tâches de calcul : une fois déchargé du travail de routine désormais effectué par une armée de grouillots mécaniques, le savant allait pouvoir se concentrer sur des activités conceptuelles « nobles », telle la formulation d'hypothèses ou la conception des protocoles expérimentaux destinés à les tester. Quelques rares prophètes laissaient entendre que les ordinateurs, talentueux et universels, effectueraient eux-mêmes une partie notable des tâches nobles en question ;

ils travaillaient à mettre au point des programmes capables de résoudre les problèmes en général (*General Problem Solvers*) et de proposer des théories explicatives des données fournies. Rien de tout cela ne s'est produit, et ce à quoi l'on a assisté est plutôt une coopération croissante entre l'informatique et l'activité scientifique de modélisation, d'explication et de prédiction.

L'expression « simulation informatique », employée pour désigner la forme principale de cette collaboration dans la période récente, recouvre, en fait, trois entreprises distinctes. La plus familière est probablement la simulation prédictive, où l'on utilise l'ordinateur pour étudier de manière détaillée l'évolution de phénomènes dont les déterminants sont connus et dont les lois sont établies ou considérées comme telles ; deuxièmement, la simulation explicative, où les lois régissant les phénomènes sont, au départ, inconnues et où les algorithmes introduits dans les machines qui simulent la réalité sont, dans certaines conditions, tenus pour des explications des phénomènes concernés ; enfin, la simulation méthodique, cas hybride dans lequel les lois générales sont supposées connues, mais où la nature des paramètres à prendre en compte ne l'est pas toujours et où l'on cherche par la simulation informatique à valider une modélisation. Ici, nous nous intéresserons à l'évolution des deux premières formes de simulation informatique au cours des 25 dernières années.

La simulation des phénomènes physiques

Le cas typique des simulations prédictives est celui de la mécanique des fluides. Les processus étudiés y sont régis par des lois dont l'expression analytique (l'équation de Navier-Stokes) est connue depuis longtemps, mais dont la connaissance ne nous permet pas pour autant de prévoir en détail l'évolution des phénomènes. Ainsi, on ne sait résoudre certaines équations de Navier-Stokes que dans quelques situations très simplifiées, où, par exemple, la turbulence est négligeable. Dans la plupart des applications, notamment industrielles, on ne peut négliger ces phénomènes, et la « simulation réelle », c'est-à-dire les essais en soufflerie, est un passage obligé. Compte tenu de la lourdeur et du coût de cette procédure, il apparaît, dès les années 1970, qu'une simulation informatique fondée sur les équations pertinentes présenterait des avantages manifestes. Dans l'un des premiers articles expressément consacrés à la question, R. Chapman et ses cosignataires alertent leurs collègues sur la puissance de calcul requise par les « souffleries numériques ». Cette simulation consiste à découper l'espace autour d'un



1. LA SIMULATION PRÉDICTIONNE est souvent employée par les ingénieurs confrontés à des phénomènes complexes. Ici, la pression de l'air (maximale sur les zones orange et rouges) sur un Lockheed S-3A a été cartographiée. L'ordinateur a calculé la valeur de la pression de l'air en chaque point d'intersection d'un maillage.

aéronef, par exemple, en un «maillage» de petites cellules. L'ordinateur calcule alors les grandeurs physiques cruciales (vitesse, pression et température) en un point de ces cellules à chaque instant. Quand la complexité règne, sa prise en compte «réaliste» demande souvent des temps de calcul excessifs. Quand la turbulence accroît la complexité des phénomènes d'écoulement, des milliers d'années de calculs deviennent nécessaires!

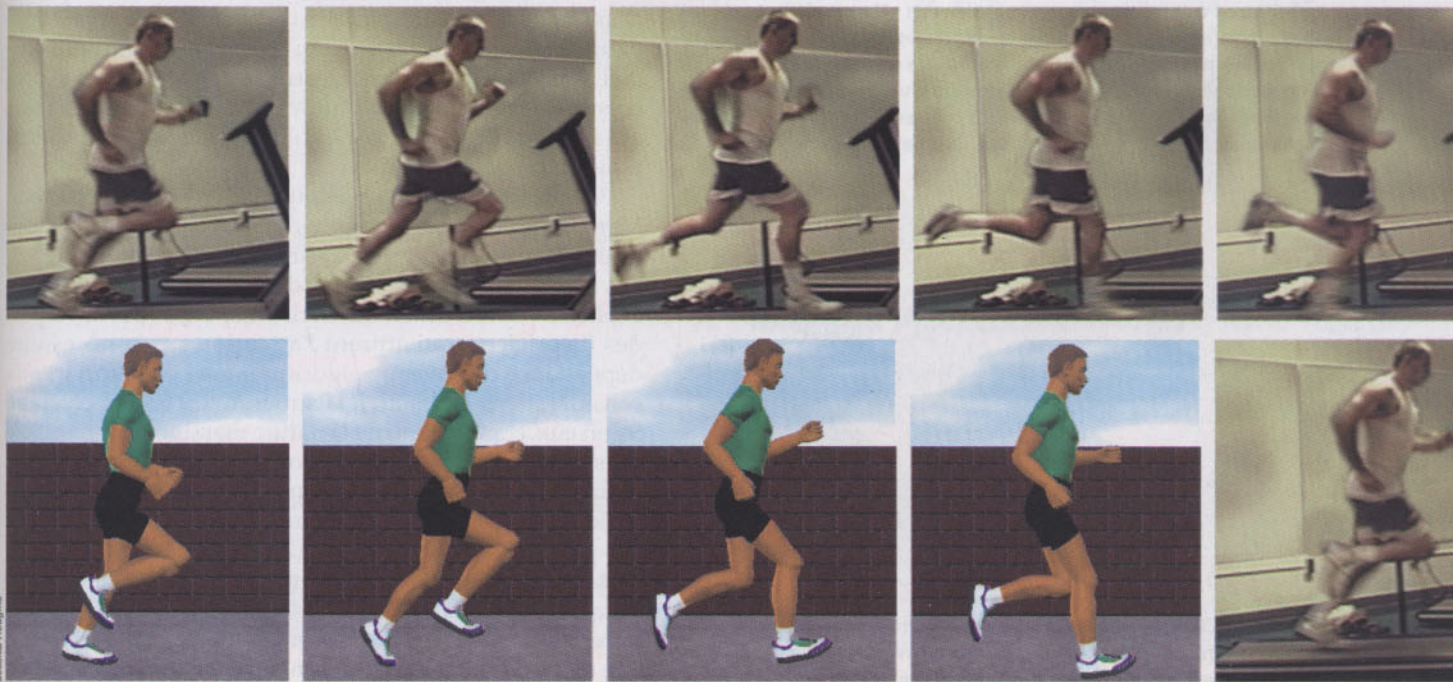
Il est impossible de donner une idée, même sommaire, des facteurs disparates qui ont permis de surmonter cet obstacle: l'augmentation spectaculaire de la rapidité des grands ordinateurs dédiés à ces simulations, les techniques dite de «maillage adaptatif» où l'on ne détaille les phénomènes que dans les zones critiques, les recherches mathématiques relatives au couplage de deux types de modélisation distincts, etc. En revanche, soulignons que les diverses communautés scientifiques impliquées – aérodynamiciens, mathématiciens et informaticiens – ont coopéré pour interpréter ces recherches. Au-delà des collaborations nouées à l'occasion de ces travaux, et qui donnent un tour désormais insolite à une déclaration comme celle d'Andrew Wiles, qui «ne voit pas la nécessité pour un mathématicien de savoir programmer ni même de posséder un ordinateur», un désaccord fondamental sépare deux interprétations rivales de ce mouvement de «numérisation» de la science.

D'un côté, la plupart des mathématiciens sont prêts à suivre Pierre-Louis Lions, médaille Fields et spécialiste des équations aux dérivées partielles, qui maintient en substance que les simulations informatiques, certes indispensables pour les applications, n'ont qu'un rôle auxiliaire, et que la compréhension des phénomènes reste donnée par les équations fondamentales qui les régissent. En ce sens, la mention d'une question difficile relative aux équations de Navier-Stokes dans la liste de celles dont la solution serait récompensée par l'un des fameux prix Clay (un million de dollars) est à cet égard pleinement justifiée!

De l'autre côté, certains physiciens et informaticiens pensent que des simulations numériques comme celle qui vient d'être décrite ne peuvent être interprétées dans cette perspective traditionnelle. Elles feraient plutôt partie de ce qu'Edward Fredkin nomme la «physique numérique», où le format nécessairement «discret» dans lequel l'ordinateur simule les phénomènes est appelé à remplacer la théorisation qui fait appel aux mathématiques du continu. La forme la plus radicale de cette interprétation de la simulation informatique contemporaine est sans doute celle qui est défendue par Stephen Wolfram, théoricien des automates cellulaires. Selon lui, l'expression même de «simulation» est trompeuse, car elle suggère que la méthode nous permet certes de comprendre des phénomènes, mais que l'on pourrait tout aussi bien y parvenir en résolvant les équations qui en décrivent l'évolution. Selon lui, il vaudrait mieux parler d'émulation informatique. Ainsi, puisque le seul moyen de comprendre le processus étudié est de le laisser se dérouler dans le temps, S. Wolfram insiste pour nous persuader que la «science traditionnelle, fondée sur des équations mathématiques, n'a jamais été capable de fournir aucune explication sous-jacente convaincante». Pour lui, un automate capable de manifester le comportement étudié en est lui-même l'explication.

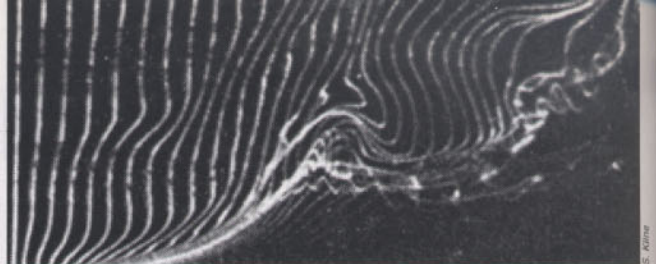
Simulations explicatives et sciences cognitives

Abordons une situation différente de la précédente: aucune théorie préalable n'est disponible ou admise pour expliquer le comportement étudié, par exemple parce que les lois qui régissent les composants du système ne permettent pas de décrire les phénomènes dont il est le théâtre. On fait alors provisoirement abstraction de la nature des composants, et on propose une explication qui ne fait appel qu'à la façon dont ces composants sont organisés. C'est



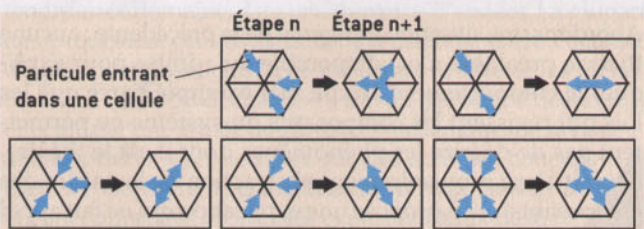
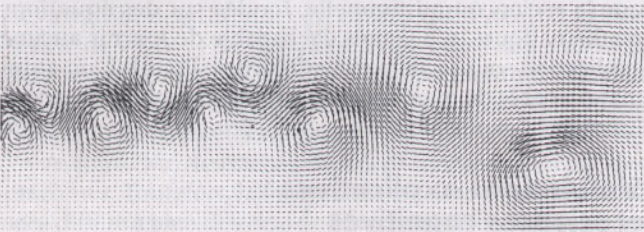
2. LA MÉCANIQUE DE LA COURSE est simulée (en bas) par un ordinateur. Pour ce faire, on photographie les mouvements d'une course réelle (en haut). Un ordinateur détermine les couples des forces en jeu. Ensuite,

on introduit dans un ordinateur ces lois physiques du mouvement et, grâce à de nombreux calculs, on reproduit la course réelle. Dans ces séquences, les images sont séparées de 0,066 seconde.

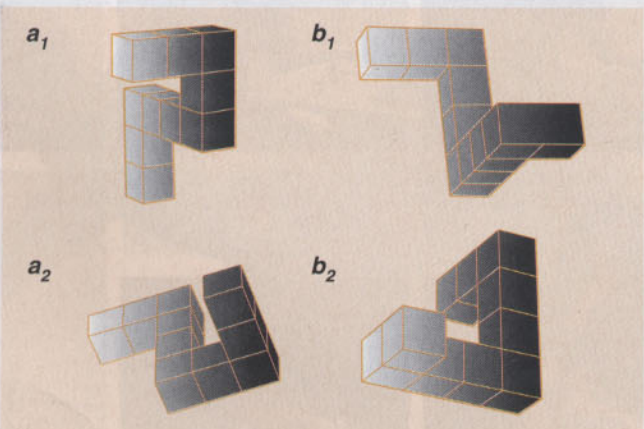


3. SIMULATION DES TRAJECTOIRES de particules dans un fluide turbulent s'écoulant entre deux plaques (à gauche), réalisée en 1980 à l'Université de Stanford. Obtenue à l'aide d'un des tout premiers ordinateurs

parallèles, elle est l'une des premières simulations numériques. Elle ressemble beaucoup à la photographie d'un écoulement d'eau entre deux plaques (à droite).



4. LES PHÉNOMÈNES TURBULENTS sont bien reproduits par des automates cellulaires. Pour simuler à deux dimensions un sillage turbulent créé par un obstacle (en haut), on pave l'espace de cellules hexagonales au sein desquelles des particules se réfléchissent les une sur les autres suivant les cinq règles simples schématisées ci-dessus. Puis, on calcule les vitesses moyennes dans chaque bloc de 25×25 cellules. La «structure d'écoulement» ainsi obtenue (au milieu) simule très bien l'écoulement réel.



5. CES STRUCTURES démontrent l'une des caractéristiques générales de la vision : une rotation mentale nous permet de «voir» que les figures a_1 et a_2 représentent le même objet. De même, pour les objets b_1 et b_2 , Les durées de ces opérations mentales sont «proportionnelles» à l'angle de rotation, ce qui indique que notre système de vision procède par petites rotations successives lorsqu'il «tourne» un objet pour le comparer à un autre.

la démarche qui a été adoptée, au début de la période qui nous occupe, par David Marr (1945-1980) : au lieu de répondre directement à la question de savoir comment notre cerveau opère, dans les faits, pour accomplir une tâche intelligente, telle la reconnaissance des formes visuelles, on examine comment procède un système de traitement de l'information quelconque (éventuellement doté de certaines propriétés plus ou moins semblables à celles du cerveau humain). Pour qu'une telle méthode puisse mettre au jour les structures internes «objectives» à l'origine de la performance, il importe d'abord de déterminer de façon rigoureuse la performance réalisée (la nature des «entrées» et des «sorties») ainsi que les contraintes auxquelles il doit satisfaire (pour l'essentiel, le temps qui lui est alloué). Ainsi, le «problème» de la vision consiste à obtenir en temps réel une représentation tridimensionnelle du monde à partir de l'ensemble des stimulations rétinienne ponctuelles. Ayant défini, pour ainsi dire, la «fonction» calculée par le système, on cherche alors à établir un algorithme de calcul de cette fonction, dont on a de bonnes raisons de penser (par exemple, parce que l'ordinateur donne les mêmes résultats en des temps comparables) qu'il coïncide avec celui du système étudié.

Ce niveau «fonctionnel» d'explication est indépendant du niveau «physique», qui détermine comment les procédures algorithmiques mises en évidence sont «réalisées» dans la structure physique ou neurophysiologique étudiée. Tant que ce dernier niveau n'est pas en cause, le processus de traitement de l'information dans l'ordinateur qui simule la performance peut être considéré comme identique au processus étudié.

Quelles que soient les réalisations que les idées de David Marr aient pu inspirer dans le domaine de la vision artificielle, il faut convenir que, 20 ans après la parution de son ouvrage pionnier, l'idée même de simulation informatique explicative est considérée avec circonspection par la plupart des théoriciens, qui attirent l'attention sur la nécessaire dépendance du niveau «algorithmique» par rapport aux considérations touchant à la structure du cortex cérébral. Selon eux, compte tenu de la nature massivement parallèle du système neuronal, tout algorithme calculant la même «fonction» que le cerveau humain en un temps comparable n'est pas un candidat plausible pour une explication des processus visuels. Au total, la faveur dont a joui cette variante de la simulation informatique dans les années 1980 aura certainement eu des effets bénéfiques sur la façon de tester les théories de la vision, mais elle ne peut nullement être tenue pour l'amorce d'une neurobiologie «numérisée».

Jacques DUBUCS dirige l'Institut d'histoire et de philosophie des sciences et des techniques, CNRS/Université de Paris I.