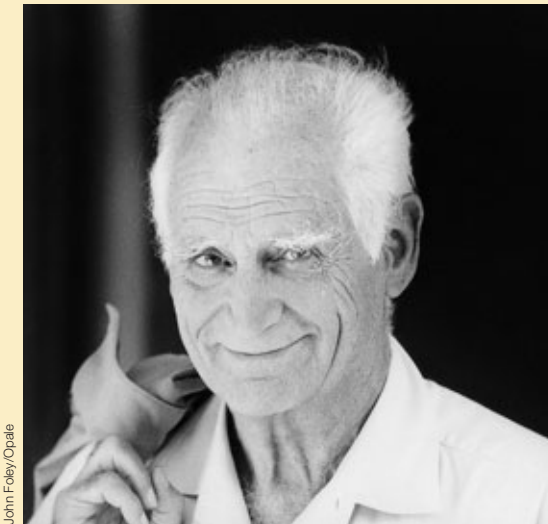


LA SIMULATION, TECHNIQUE NOUVELLE, ANCIENNE TRADITION



John Foley/Opale

Michel Serres

Que les formes repliées de telle protéine tournent et se déploient lentement sur l'écran d'ordinateur, laissant voir des sites que nous ne pourrions pas observer directement ; que des modèles à long terme miment l'évolution du climat ou le vieillissement de déchets nucléaires ; qu'un autre, de taille inverse, montre le contact atomique d'une pointe suraiguë avec une surface... voilà des pratiques usuelles, dites de simulation, nécessitées par le fait que ces phénomènes excèdent les conditions ordinaires de l'expérience.

Comment manipuler, en effet, une molécule, voire un seul atome ou, au contraire, un grand nombre de contraintes sur des millénaires et l'ensemble du globe, continents, mers et atmosphère ? Rien de tout cela ne tombe sous la main ; aucune de ces giga- ou nano-tailles d'espace et de temps ne peut se manipuler directement au laboratoire. Les dimensions elles-mêmes rendent donc nécessaire cette modélisation en images virtuelles. Par leur puissance numérique, seules les nouvelles technologies peuvent ainsi accélérer le temps, agrandir les espaces, multiplier dimensions, contraintes et connexions, bref contribuer à représenter l'irreprésentable.

Un changement épistémologique

Ces techniques de simulation élargissent même la notion de phénomène. Sur ses systèmes d'équations différentielles, Laplace avait démontré, par exemple, la stabilité du système solaire avec une assez bonne approximation. Un siècle plus tard, en des théorèmes célèbres, Poincaré nous avait amenés à en douter, quoique avant Laplace déjà, le chevalier d'Arcy eût signalé, dès le XVIII^e siècle, qu'à trois corps, le problème se révélait inintégré. Mais assuré-

ment nous ne doutions pas du statut épistémologique de cette stabilité ou de cette instabilité : il s'agissait d'un résultat mathématique, mécanique, probabiliste... En aucun cas, nous ne les aurions pensés comme des "phénomènes" ni n'aurions imaginé pouvoir les soumettre à "l'expérience", puisque leur test ou contrôle demandent des centaines de millions d'années.

Voilà l'un des meilleurs cas où nous comprenons le plus clairement du monde ce que signifie : sortir des conditions de l'expérience possible. Aucun laboratoire ne saurait la préparer ni la réaliser. Or une simulation numérique permet justement de décrire la conduite des petites planètes, plus chaotiques, et de beaucoup, que les grandes, sur cet immense laps de temps. Un résultat purement mathématique ou de mécanique céleste devient alors une sorte de fait, un quasi-phénomène quasi expérimentable. La simulation enjambe les classifications épistémologiques usuelles et les rend poreuses.

Prudence : conditions qualitatives

Mieux vaut, de plus, qu'un chirurgien s'exerce d'abord à opérer sur des images virtuelles, avant de tailler au scalpel dans la chair ou les os du patient ou qu'une arme nucléaire explose sur l'écran plutôt que dans l'environnement ; mieux vaut qu'au risque de se tromper, de les détruire donc et devoir les reconstruire, un architecte teste en simulation la résistance sismique d'une tour, d'un viaduc ou l'étanchéité d'un tunnel.

Nous quittons alors les conditions de l'expérience pour ses buts, ses conséquences ou sa finalité, l'épistémologie pour l'économie, le quantitatif pur pour la prévention d'un risque possible ou d'un danger réel... bref, nous entrons en éthique.

On simule par nécessité, dans un cas, par prudence, dans l'autre. Dans les deux, on élargit la notion même d'expérience.

Essais ou images ?

Nous connaissons depuis longtemps la pratique des maquettes, modèles ou prototypes. Michel-Ange ne sculptait ni ne bâtissait avant d'avoir montré au pape Jules II, outre ses plans, des ébauches en réduction de leurs projets communs. Ainsi firent et feront mille autres envers leurs maîtres d'ouvrage. La construction navale ou les fabrications en série ne se décident qu'après avoir essayé, testé, vérifié... un exemplaire premier, un numéro zéro... qu'il s'agisse d'une nouvelle nef, d'un crayon à bille ou d'une résidence. Nous expérimentons toujours sur un témoin. Certes des risques demeurent : celui des effets d'échelle, car le navire enfin construit peut ne pas se comporter à la mer comme l'ébauche au bassin des carènes ; ou celui de l'exceptionnel, puisqu'à la limite aucun produit singulier ne ressemble à nul autre. Mais cet objet existe, l'artiste, le



patron, l'ingénieur, le client... peuvent le toucher. Ainsi rassure l'essai.

Ici, au contraire, rien que des images. Ce que nous ne pouvons faire, nous le figurons. Ce que nous ne pouvons pas réaliser, ce dont nous avons peur, nous le représentons. Ainsi le virtuel sort de la réalité... Devons-nous juger ainsi des techniques de simulation ? Ce mot n'avoue-t-il pas une dissimulation dont l'astuce aboutirait à une trahison ? Le passage à l'image se réduit-il à un repli vers un imaginaire où les sciences dites expérimentales perdraient du "réel" ? J'entrevois parfois dans les yeux de quelques Anciens ce soupçon sourcilieux. Ces nouvelles méthodes, disent-ils, vont donner à la jeunesse de mauvaises habitudes ; elle y perdra le sens du concret. Plus de main, plus de pâte, plus de main à la pâte. Mais qu'entendons-nous par ces mots de pratique et ces métaphores boulangères ?

L'histoire des sciences peut répondre à ces questions. Elle répute parfois le contemporain fort ancien et l'ancien, en récompense, assez moderne. Non, je ne crois pas que l'on passe si brusquement, et seulement aujourd'hui, du "réel" à sa "représentation". Que ces Anciens se rassurent donc, en réfléchissant à leur propre réel, au concret que leurs mains manipulent, enfin à ce que signifie l'expérience.

Qu'appelle-t-on expérience ?

De quand date la première expérience, vraie ou supposée ? D'après nombre de textes anciens, de Pythagore soi-même. Ayant oui, comme tout le monde, les sons émis par un forgeron frappant à la masse le fer chaud sur l'enclume, il chercha, dit-on, à les reproduire, en pendant des poids divers à des cordes qui se mirent à vibrer ; ainsi mesura-t-il pour la première fois les rapports harmoniques de tierce, de quarte, de quinte... Comment commence cette expé-

rimentation, sinon par une simulation ? En passant de la frappe de la masse sur l'acier résonnant aux cordes qu'il fait vibrer, en passant, dis-je, du passif perçu à la production active, Pythagore reproduisit des sons ; en cherchant à les imiter, il les simula. Certes, il se servit de cordes et de poids, tangibles et résistants ; reste qu'avec ces moyens "durs", la reproduction imite et simule.

Qu'appelle-t-on donc expérience ? Quand les praticiens l'appellent "manip", ils savent que ce nom suppose la main et certaine pâte en face d'elle. Or ladite manip ne se déroula presque jamais au grand air ou dans la nature, comme on dit, ou sur les choses elles-mêmes, directement sur la pâte du morceau de cire que cite Descartes, par exemple. Pythagore arrête sa promenade ou, comme on dirait aujourd'hui, quitte le terrain et, pensif, rentre chez lui, reconstruit le phénomène à étudier, le raffine, le débarrasse des bruits parasites, ne le recueille pas tel quel ou tel qu'il a pu le repérer *in situ* ou *in vivo*, mais le reproduit et le répète. Mais que signifient ces mots : *reproduit* et *répétable*, sinon imitable et simulé ?

Pour je ne sais plus quel anniversaire, nous avons tenté jadis de refaire l'expérience célèbre de Blaise Pascal sur la pression atmosphérique, prétendument réalisée au sommet du puy de Dôme. Il va sans dire que nous avons échoué. Comment transporter, dans les conditions du temps, c'est-à-dire à dos d'âne, sans la casser, une colonne fragile et interminable et, de plus, fabriquée dans les premières années de l'industrie manufacturière du verre ? Nous avons vite soupçonné que Pascal s'adonnait, comme tant d'autres et là comme ailleurs, à des expériences de pensée. Il simulait dans des récits, comme nous à l'ordinateur !

Et pour réaliser vraiment cette expérimentation comme toutes les autres, mieux vaut construire des cabinets, comme



Palais de la Découverte

L'expérience sur la pression atmosphérique de Torricelli est censée avoir été répétée au sommet du puy de Dôme par Périer sur les instances de Pascal. On peut se demander aujourd'hui si le récit de cette expérience n'était pas... une simulation !

on les appelait jadis, c'est-à-dire des laboratoires, dont, peu à peu, les instruments transformèrent l'allure et la taille, au lieu d'aller sur le terrain, où l'on ne maîtrise pas les conditions. En ce nouvel environnement, hautement abstrait, artificiel, technique, raffiné, sophistiqué même, que font les physiciens anciens, classiques, et même ceux des XIX^{e} et XX^{e} siècles, sinon reproduire, c'est-à-dire imiter ou simuler des faits qui se développent au grand air ? Où se trouve le concret, le "réel" ? En haut du puy de Dôme ou sur la paillasse ? Sur celle-ci ne commence-t-on point par simuler ce qui se passe là ? Je le répète, qu'au laboratoire, on imite le fait avec un équipage de verre, de fils de laiton ou des barres de fer... bref au moyen de choses dures et non de signes ou de codes, n'empêche point qu'il s'agit toujours d'une reproduction, donc d'une imitation. De plus, il faut que tout physicien puisse la répéter. Relisez attentivement la célèbre formule : *"Dans les mêmes circonstances, les mêmes causes produisent les mêmes effets"* ; trois fois répété, le mot même y emporte, certes, notre adhésion à propos de ce principe, mais, à bien regarder son sens, il exige, de nouveau, l'imitation. La maîtrise maximale des conditions et de la réalisation garantit la fidélité de la répétition.

Et qu'entend-on, enfin, par conditions de l'expérience ? L'ensemble des réquisits qui la rend reproductible, maîtrisable et fidèle à elle-même, c'est-à-dire des réquisits de simulation. Toute expérience suppose-t-elle donc, en quelque façon, plusieurs types de simulation ? Qui peut le nier ? Elle quitte le "réel" tel quel depuis l'aurore même de la physique expérimentale.

Variations sur le réel

"De tous temps l'homme observa les graves tomber, s'étonna du tonnerre et de l'arc-en-ciel, contempla les étoiles..." Voilà l'énoncé du tic le plus commun en histoire des sciences, telle qu'elle se pratique tout naïvement : sans erreur possible, vous reconnaîtrez les mauvais livres à ce commencement. Comment se délivrer de cette sottise ? En répétant, à temps et à contre-temps, qu'il n'y avait ni étoiles ni chute des corps ni tonnerre pour les Chaldéens ni pour les Chinois, ni pour les Égyptiens ni pour Aristote, quoiqu'ils usent parfois du même mot que nous, à la traduction près ; que le ciel à leurs yeux n'avait pas la même réalité qu'à ceux des astrophysiciens d'aujourd'hui, dont les données n'ont, de plus, rien à voir même avec celles de Galilée ou de Tycho Brahé... Newton estimait la vieillesse du monde à quatre mille ans... la langue grecque ancienne n'a même pas de mot pour dire : "volcan", alors que l'une des plus belles civilisations hellènes disparut corps et biens dans la caldera de Santorin...

Le réel change avec les pratiques et les peurs, les religions et les mythes, les théories et les moyens d'observation, avec les outils et les appareils. Du coup, la perception commune et les objets eux-mêmes changent d'objectivité. Divinité, âme d'un défunt, trou dans un bouclier d'airain, épaulement d'Orion... l'étoile met des millénaires à devenir ce qu'elle nous semble aujourd'hui : un ensemble évolutif et temporel de réactions nucléaires. Ce "de tous temps" n'eut jamais lieu, cet "homme" stable ne vécut nulle part, le monde et les choses "réels" varièrent en temps variables pour des sens variables.

À chaque génération ou presque son réel. J'ai connu, dans ma jeunesse pourtant pas si lointaine, des savants et non des moindres qui, en ces temps, n'iaient farouchement l'exis-

tence des plaques tectoniques ou des grosses molécules biochimiques. Ils les pensaient imaginaires, virtuelles... simulées ! Ils n'exprimaient là que leur retard et que la proximité de leur retraite. Ils ne voyaient pas la réalité basculer. Celle que visent les techniques de simulation me paraît donc aussi "réelle", ou aussi peu, que celle de ces Anciens sourcilleux qui croient, eux, la manipuler plus et mieux que leurs successeurs, parce qu'ils utilisaient des règles à calcul et que leurs enfants adoptèrent les ordinateurs dès l'âge tendre. Oui, cette réalité dépend, là, de la puissance de calcul. Cela ne signifie pas qu'il n'y a pas de "réel". Disant cela, je ne cède pas aux relativismes, ni subjectif, comme celui des opinions ou des goûts, ni culturel ou sociologique, comme celui des idéologies, des lois, des institutions et des mœurs. Que la réalité change ne veut pas dire qu'elle s'évanouit. Je la crois présente et promise comme une tâche infinie, cédant sans cesse à nos prises comme un horizon asymptotique, derrière les profils successifs des théories et des vérités que découvrent les sciences au cours de leur histoire. Absente au départ, changeante dans le temps, mais convergente à la limite, quoique les sciences ne sachent rien de son accessibilité. Qu'elle existe, nos prévisions précises et l'efficacité de nos applications nous en donnent tous les jours des preuves invincibles.

Variations des laboratoires

Il faudrait donc définir des générations d'expériences ou de laboratoires, comme on dit qu'il existe des générations d'ordinateurs. Elles dépendent toutes de l'état des techniques. Cette technicité change avec le temps, où l'on voit croître la finesse et la portée des simulations. Qu'ont en commun, en effet, les gigantesques appareils du CERN et le soi-disant labo de mon ancien lycée où la machine d'Atwood avoisinait le pont de Wheatstone ? Et qu'avait en commun cette salle avec celles où trônaient le plan incliné de Galilée, la balance de Roberval et les hémisphères de Magdebourg ?

Lieu de simulations, modèle réduit d'un sous-ensemble, bien découpé, de la nature, chaque état du laboratoire vise un monde différent, celui de la mécanique classique, celui de l'électromagnétisme, celui de la physique quantique... Alors que les générations précédentes se succédaient souvent sur un seul de ces états, j'aurai vécu donc plusieurs états du laboratoire où, dans le dernier, pullulent les ordinateurs. Et, de nouveau, le virtuel entre-t-il dans le réel ou nous en fait-il sortir ?

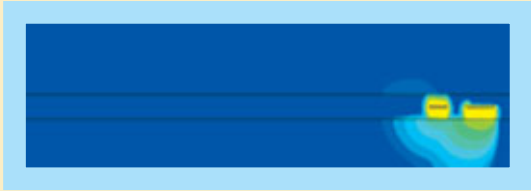
Qu'appelle-t-on virtuel ?

Que je sache, l'usage de ce terme ne date pas de l'âge des ordinateurs. L'image virtuelle sert à l'optique depuis au moins l'âge classique ; les travaux virtuels occupent les mécaniciens depuis Lagrange ; et la physique atomique utilise ce même terme aussi bien pour les noyaux que pour l'émission d'une particule. Avant même que naisse la physique proprement dite, le virtuel pénétrait donc l'optique et la mécanique, encore mathématiques et presque dénuées d'expérience. Ces trois disciplines étudient, certes, le "réel", mais y incluent le possible depuis fort longtemps. Rien de nouveau sous le soleil.

Que la poussée du possible se renforce aujourd'hui, qu'il borde et entoure de plus en plus ledit "réel", voilà une conquête qui rend compte du monde plus souvent qu'elle ne le déréalise. Nous pensons toujours ces questions à l'aide



20 000 ans



50 000 ans



100 000 ans



200 000 ans



1 000 000 ans



10 000 000 ans

CEA/DEN

Simulation d'un relâchement d'iode dans le milieu géologique par un site de stockage de déchets radioactifs, selon un scénario d'altération des colis. Seules des modélisations à long terme peuvent mimer le vieillissement de tels déchets sur des millénaires.



d'une logique classique, dont le carré de base oppose le particulier au général et l'affirmation à la négation. Je crois, quant à moi, à la logique modale : nous pensons un monde contingent et expérimentons sur lui, par manipulation du possible jusqu'aux limites de l'impossible et par découverte de lois nécessaires. Plus souple que l'ancien, le carré des

modes rend mieux compte de nos avancées. À suivre patiemment les linéaments de divers sites sculptant certaines grosses molécules responsables de maladies, les simulations permettent de découvrir, voire d'inventer des médicaments qui, en se logeant exactement dans ledit site, en inhibent les fonctions délétères. Même obtenue à l'aide d'images possibles, quoi de plus réel, bien que contingent, qu'une guérison ? Quoi de plus "réel" que d'éviter les accidents possibles dans les usines nucléaires ou devant des équipages sous hautes pressions ?

Qu'appelle-t-on abstrait ?

Prenant ainsi droit de cité dans notre épistémologie, le virtuel, du coup, occupe un immense espace intermédiaire entre l'abstrait, d'une part, et le concret, de l'autre, entre la théorie et les applications, entre les mathématiques et les techniques proprement dites. Comme un lien, il attache ce que je ne peux point avoir sous les yeux et ce que je puis me représenter. Il assume cette fonction, aussi bien dans les images ou travaux virtuels de nos prédécesseurs que dans les simulations de l'évolution du climat ou la modélisation des macromolécules.

Inversement, qu'est-ce alors que l'abstrait ou que le théorique, sinon la totalité du virtuel possible ? Les mathématiques expriment le réel, c'est-à-dire tout le possible, et les expériences délivrent des profils du monde contingent. Dès lors, la simulation en images virtuelles extrait l'abstrait de son royaume pour, elle aussi, nous en livrer des profils. Or, qu'est-ce, à nouveau, que l'expérience, sinon une falsification, au sens de Popper, de l'abstrait ? Donc la simulation a un statut semblable à celui de l'expérience. Voilà ce que je voulais démontrer.

Elle l'élargit, varie sur ses conditions et ses buts, raccourcit le chemin entre elle et la théorie, lui donne donc un autre visage. Entendez-la donc comme une extension ou une généralisation de l'expérience. Mais, de génération en génération, ce visage expérimental changea plusieurs fois. Certes, nous venons de franchir une nouvelle étape, mais sur une voie que l'histoire des sciences reconnaît comme canonique.

Simulacres

Je ne résiste pas, pour finir, au plaisir de citer, encore et toujours, le vieux Lucrèce, que les physiciens ne lisent plus (Jean Perrin le savait par cœur) parce qu'il écrit en latin et que les latinistes ne comprennent jamais parce qu'il fait de la bonne physique. Voici plus de deux mille ans, il prétendait que nous percevons par simulacres ; il appelait ainsi des membranes translucides qui se détachaient des choses et volaient, à travers l'air, du perçu vers le percevant. Par homothétie, elles gardaient la forme de ces choses et venaient ainsi frapper l'œil. Bien qu'étrange, cette explication de la perception touche pourtant juste quelque part : ces simulacres simulent par similitude ! Nous ne connaissons jamais que par imitation. En voyant évoluer devant mes yeux éblouis les sites et les plis des molécules, je ne puis m'empêcher de rêver, avec l'ancien poète latin, qu'elles m'envoient leurs simulacres.

Michel Serres

de l'Académie française
Professeur à l'Université Stanford (Californie)