

Pablo Jensen



Figure 1. Image expérimentale (à gauche) et image tirée des simulations (à droite) des dépôts de nano-agrégats sur une surface de graphite cristallin (Bardotti *et al.*, 1995).

Les deux images ci-dessus illustrent ce qu'est un savoir pour les physiciens : la convergence entre une expérience (image de gauche) et des simulations numériques issues d'un modèle mathématique (image de droite). La ressemblance de ces deux images démontre un fait considéré jusque-là comme impossible : des particules contenant des milliers d'atomes peuvent bouger très rapidement sur une surface. La création d'un savoir est attestée par la publication de ce résultat dans *Physical Review Letters*<sup>1</sup>, la plus prestigieuse revue de physique. Dans le présent texte, je raconte comment s'est faite, concrètement, la convergence de ces images, que l'on pourrait presque confondre tellement elles sont semblables, tellement le monde artificiel créé par l'ordinateur a été rendu similaire au monde naturel des expériences, à moins que ce ne soit le contraire.

En janvier 1993, je partis passer une année de post-doctorat à la Mecque intellectuelle des physiciens : les États-Unis. Il s'agissait d'apprendre la modélisation numérique – jusque-là peu utilisée en France –, dans un environnement scientifique stimulant : l'équipe de Gene Stanley à l'université de Boston. Dans mes bagages, j'emportais de mon laboratoire lyonnais une énigme que j'espérais résoudre grâce à cette collaboration. Il s'agissait d'une contradiction flagrante entre certaines expériences et les modèles que nous développons pour comprendre les dépôts de nano-agrégats sur des surfaces, thème

central de nos recherches. Par « nano-agrégat », on entend une petite particule sphérique composée de quelques centaines ou milliers d'atomes, le préfixe *nano* indiquant que ces agrégats ont une taille de l'ordre du nanomètre, soit un milliardième de mètre.

## De l'importance des nano-agrégats

Pour comprendre l'importance de l'énigme, il faut replacer nos études dans leur contexte scientifique et technologique. Le dépôt de nano-agrégats sur une surface se situe à la confluence de deux questionnements majeurs en physique de la matière.

La première problématique est fondamentale. Elle concerne la transition entre les propriétés d'un atome isolé et celles du matériau massif correspondant. Les agrégats représentent en effet un état intermédiaire entre ces deux limites, et leurs propriétés s'avèrent surprenantes, ne se réduisant pas à une simple interpolation entre les propriétés de ces extrêmes. C'est un peu comme les caractéristiques des petits groupes d'individus qui ne se ramènent pas simplement à celles d'un individu ou à celles de la société tout entière. Ainsi, la couleur des nano-agrégats de certains matériaux dépend fortement de leur taille : imaginez qu'en cassant une bille rouge on en obtienne deux bleues... Autre surprise, la température de fusion de ces particules dépend de leur taille précise, variant de plusieurs dizaines de degrés lorsque l'on ajoute quelques atomes. Depuis les années 1960, diverses techniques furent développées pour fabriquer de tels nano-agrégats et les analyser, de préférence sans les déposer sur une surface, car cela perturbe leurs propriétés.

L'autre grand questionnement, le dépôt de particules sur une surface, est important du point de vue technologique. En effet, la compréhension des processus qui permettent de réaliser des couches très minces (quelques milliers d'atomes d'épaisseur) mais parfaitement contrôlées est à la base de toute l'industrie électronique. Le fonctionnement de ces objets quelque peu magiques repose en effet depuis la Seconde Guerre mondiale sur le même dispositif : le transistor, sorte d'interrupteur qui permet d'effectuer des calculs élémentaires. La révolution électronique est avant tout le résultat de la miniaturisation progressive de ce composant, dont la taille a été divisée par cent mille et atteint aujourd'hui la centaine de nanomètres grâce à la maîtrise de la matière à ces échelles infimes<sup>2</sup>. Désormais, les chercheurs savent que cet accroissement de la puissance des ordinateurs sera bientôt confronté à une limite physique. En effet, d'ici dix ans environ les transistors auront atteint une taille de quelques dizaines de nanomètres ; de nouveaux phénomènes physiques apparaîtront alors, empêchant leur bon fonctionnement. Ainsi, les courants de fuite à travers des barrières isolantes trop fines

empêcheront leur fonctionnement comme interrupteur. D'où l'importance de trouver de nouveaux dispositifs qui remplaceront les transistors, ce qui passe par une compréhension des propriétés de la matière à l'échelle du nanomètre.

Nos travaux étaient donc importants du point de vue fondamental (la compréhension des propriétés étranges de la matière à l'échelle nanométrique) et potentiellement riches d'applications technologiques (pour l'industrie électronique). Cela permit au Département de physique des matériaux<sup>3</sup> de bénéficier de moyens financiers et humains pour avancer ses recherches, y compris l'attribution d'un poste de chercheur du CNRS que j'eus la chance d'occuper dès septembre 1990.

## Les agrégats et la neige

L'objectif général de mon équipe consistait à comprendre comment se forme une couche de nano-agrégats. Une première idée simple est de comparer sa croissance à la formation d'une couche de neige sur un trottoir un jour d'hiver. En gros, les agrégats arrivent sur la surface et s'entassent les uns sur les autres comme le font les flocons de neige. Mais on peut se demander si ce modèle est correct. Sachant que les observations directes de la formation de la couche d'agréats sont impossibles, il faut trouver des moyens indirects pour observer la croissance. Un premier moyen, adapté au dépôt d'agréats métalliques, consiste à les déposer sur une surface de verre (qui ne conduit pas le courant) tout en mesurant le courant qui passe entre deux électrodes préalablement disposées aux deux bouts de la plaque de verre. Pendant un bon moment, aucun courant ne peut traverser la surface isolante du verre, mais après un certain temps on observe un saut de courant, attestant la création d'un premier chemin métallique entre les électrodes, qui permet au courant de circuler. Revenons à notre image de la neige. Imaginez qu'une fourmi veuille traverser la rue sans toucher le bitume, en ne marchant que sur la neige : quelle fraction de la rue faut-il recouvrir de neige pour qu'elle puisse passer d'un trottoir à l'autre ? Bien sûr, si la rue est totalement recouverte, c'est possible, mais un modèle mathématique simple, dit de « percolation<sup>4</sup> », montre qu'il existe un chemin continu reliant les deux trottoirs dès que 59 % de la rue a été recouverte.

En partant de ce modèle simple, on peut calculer la quantité d'agréats qu'il faut accumuler sur la surface pour observer le saut de courant (le « seuil de conduction »). À notre agréable surprise, ce calcul prédit assez bien le seuil de conduction et permet également de comprendre la raison pour laquelle cette quantité dépend de la taille des agrégats. Comme il est plutôt rare qu'un modèle aussi simple puisse expliquer des phénomènes réels, nous nous sommes empressés de publier notre

modèle<sup>5</sup>. Hélas, d'autres expériences n'ont pas tardé à nous montrer ses limites en établissant que le seuil de conduction dépend fortement du flux incident d'agrégats, contrairement à la constance prédite par le modèle simple. En effet, le nombre de flocons de neige nécessaires pour recouvrir 59 % d'une surface ne dépend pas de l'intensité de l'averse de neige ; celle-ci change simplement le temps nécessaire pour parvenir à cette couverture.

Ce fait expérimental démontrait que quelque chose clochait dans la formule, qu'un phénomène autre qu'un simple empilement des agrégats intervenait. Lequel ? Incapables d'observer les agrégats à l'œuvre, nous en étions réduits à des hypothèses : les agrégats pouvaient bouger sur la surface une fois déposés (ce qui n'arrive pas aux flocons !), ils pouvaient s'oxyder progressivement pendant le dépôt (la couche d'oxyde empêchant le passage du courant), ou bien ils pouvaient coalescer sur la surface, comme deux gouttes d'eau qui fusionnent pour n'en donner qu'une, plus grosse. Tous ces facteurs étaient susceptibles en principe d'affecter le seuil de conduction lorsque le flux incident variait. Mais lequel ou lesquels étaient réellement à l'œuvre dans les expériences ? Nous n'en savions rien.

## Une chambre de dépôt virtuelle

Voilà le mystère que je voulais élucider lors de mon année de post-doctorat à Boston. Après quelques discussions avec mes nouveaux collègues, je décide d'explorer l'hypothèse de la diffusion des agrégats. Les raisons de ce choix sont assez subjectives, mêlant des influences scientifiques et culturelles. D'abord, la diffusion est relativement facile à programmer. Elle fait donc partie de la culture du milieu, car des modèles antérieurs l'ont prise en compte dans d'autres contextes. Ensuite, il existe depuis le début du xx<sup>e</sup> siècle une théorie solide et simple de la diffusion des particules sur une surface. En revanche, les autres hypothèses expérimentales (oxydation, coalescence), bien que tout aussi vraisemblables du point de vue scientifique, présentent des difficultés supplémentaires concernant la théorie ou la programmation. Un scientifique voulant publier doit avancer par des chemins de moindre résistance... Pourtant, inclure la diffusion des agrégats dans la modélisation pouvait apparaître peu raisonnable. En effet, la communauté scientifique sait que les atomes individuels peuvent diffuser rapidement sur une surface, car ils sont très petits et donc sensibles au tangage des surfaces, induit par l'agitation thermique des atomes de surface. Cependant, tous les experts

considéraient impossible la diffusion des nano-agrégats. En effet, ceux-ci étant plus gros que les atomes, ils peuvent s'ancrer fortement à la surface et rester immobiles.

Malgré la relative simplicité de la diffusion, il est impossible de trouver des formules mathématiques donnant le seuil de conduction lorsque l'on inclut la diffusion des agrégats. D'où l'intérêt des simulations par ordinateur, que le laboratoire de Boston maîtrise parfaitement. Il s'agit de reproduire, *in silico*, ce qui se passe lors du dépôt d'agrégats, en mimant les processus un à un et en suivant leur déroulement.

## Échec et divine surprise

Je me lance alors tête baissée dans la programmation du modèle. Au bout de quatre mois assez pénibles de programmation, de bugs et d'erreurs diverses, je parvins enfin à écrire un code capable de simuler le dépôt d'agrégats ainsi que leur diffusion sur la surface. J'avais en quelque sorte créé une chambre de dépôt virtuelle, où je pouvais effectuer des « expériences » numériques tout en observant en détail comment la couche d'agrégats se forme. Je pouvais changer à loisir le flux d'agrégats incidents et observer son influence sur la quantité d'agrégats nécessaire pour former un chemin continu, comme dans les expériences réelles. Le résultat essentiel est simple : la diffusion des agrégats augmente effectivement le seuil de conduction, comme nous en avions l'intuition, mais de manière très faible ! La conclusion de ces mois de travail dans l'hiver rigoureux de Boston est sans appel : la diffusion des agrégats ne peut expliquer les résultats expérimentaux.

Malgré le découragement – écarter une hypothèse ne conduit pas à une publication prestigieuse –, j'informe les chercheurs restés à Lyon des résultats par courrier électronique, qui représentait alors un nouvel outil de communication léger et flexible. Cela me permet notamment de leur transmettre des images générées par le modèle, que je trouve malgré tout assez jolies. Alain Hoareau, directeur de l'équipe lyonnaise, note une ressemblance frappante entre les images du modèle et celles obtenues quelques semaines auparavant par Laurent Bardotti, alors thésard au laboratoire. Il s'agissait d'images résultant d'une expérience menée de manière totalement indépendante, et qui visait à observer les couches d'agrégats au microscope à effet tunnel. Ce type de microscope, à la mode depuis que le prix Nobel a été décerné à ses inventeurs en 1986, permet de mesurer la hauteur de la couche d'agrégats. Pour mener à bien ces observations, il faut déposer les agrégats sur une surface lisse et sans défauts, le graphite cristallin. Heureux hasard, l'interaction entre l'agrégat et cette surface est très faible, ce qui permet à ces particules de diffuser fortement, et explique la ressemblance avec les images

issues du modèle.

Nous reconnaissons là un point d'accrochage possible entre des expériences et un modèle, et nous y concentrons nos efforts. D'autant plus que, parallèlement, une équipe suisse est parvenue à obtenir des images identiques de dépôts atomiques, technique nettement plus répandue que celle utilisée à Lyon. Notre modèle pourrait donc constituer un « point de passage obligé<sup>6</sup> », non seulement pour la petite communauté du dépôt d'agrégats, mais également pour celle, autrement plus importante, du dépôt d'atomes.

Nous nous dépêchons alors d'oublier la question initiale, qui ne présente plus d'intérêt en termes d'impact et donc de publication. Cette stratégie, conjuguée à l'influence du groupe de Gene Stanley, conduit à la publication dans la prestigieuse revue *Nature* d'une présentation sommaire du modèle<sup>7</sup>, explicitement relié aux expériences sur les atomes. La présentation détaillée du modèle sera publiée quelque temps plus tard, dans une revue de physique<sup>8</sup>.

Notre travail de modélisation a finalement abouti à plusieurs résultats. D'abord, un modèle valide pour la croissance des couches d'atomes ou d'agrégats. Ce modèle a été utilisé par de nombreux groupes dans le monde pour l'analyse de leurs expériences. Nous l'avons bien sûr beaucoup utilisé à Lyon, pour mieux comprendre les dépôts d'agrégats, aboutissant à un résultat étonnant. Contrairement à ce que l'on croyait jusque-là, les agrégats sont capables de diffuser très rapidement sur certaines surfaces. Ce savoir a été reconnu par la communauté scientifique, comme l'atteste le grand nombre de citations (positives) que l'article a reçues<sup>9</sup>. Plusieurs équipes de par le monde ont en effet étendu notre étude, en explorant le dépôt d'agrégats d'autres matériaux, en imaginant des modèles atomiques capables d'expliquer la diffusion rapide des nano-agrégats ou leur coalescence sur la surface.

## Comprendre, pour un physicien...

Pour mieux comprendre la démarche qui nous a conduits à la création d'un savoir, il convient de replacer notre travail dans l'histoire globale de la physique. Voici quatre siècles, les physiciens définissaient le savoir légitime comme celui qui peut se rattacher à une modélisation rigoureuse. Comme le résume Maurice Clavelin dans son étude sur Galilée<sup>10</sup> : expliquer, pour un physicien, c'est transformer un fait physique en un problème mathématique, puis le résoudre grâce aux outils rigoureux de cette discipline. Ce n'est pas le lieu ici de discuter de la fécondité et des limites globales de cette démarche intellectuelle<sup>11</sup>. Notre exemple incite plutôt à centrer la discussion autour de deux thèmes : le rôle des expériences contrôlées en laboratoire et celui des

simulations numériques.

Commençons par les expérimentations contrôlées. Pour créer un savoir légitime, la physique se limite à la portion de réalité qui peut être connectée à un modèle mathématique rigoureux. Cela passe notamment par la fabrication d'un monde artificiel purifié. Dans notre exemple, il s'agit d'abord de la surface cristalline de graphite, qui doit être très plane pour ne pas perturber la diffusion *uniforme* des agrégats, la seule que l'on peut décrire simplement. Les dépôts sur du verre ou sur du carbone désordonné (amorphe) sont d'ailleurs toujours mal compris. De plus, le dépôt doit être effectué dans un environnement purifié, sous un vide poussé qui élimine la contamination des agrégats par l'air ambiant. Pour que la jonction entre un modèle et des expériences puisse s'établir, il faut bien sûr construire un modèle adapté. Mais le plus difficile consiste à réaliser des « manip » suffisamment contrôlées pour que la réalité ressemble suffisamment au modèle.

Parmi les expériences menées dans ce cadre purifié, on oublie celles qui conduisent à des questions intéressantes, mais ne peuvent être reliées à un modèle. Nous avons ainsi laissé de côté la question de départ, l'augmentation du seuil de conduction avec le flux incident d'agrégats, énigme qui n'est toujours pas résolue. Dans les publications, l'effet du flux est attribué paresseusement à l'oxydation des nano-agrégats d'antimoine, sans trop de preuves. Comme l'a noté l'anthropologue des sciences Pascal Lécaillon lors d'un stage dans notre laboratoire<sup>12</sup>, Laurent Bardotti s'aidait de deux classeurs – étiquetés « utile » et « poubelle » – pour ranger les résultats de ses expériences. Le premier permet de préclasser ce qui a une chance d'être comparé et amarré aux simulations, le deuxième ce qui selon toute vraisemblance restera en attente et finira dans une poubelle à la fin de la thèse.

Enfin, pour réussir cette jonction, il existe des « tours de main » précis, acquis localement par l'expérience, le contact quotidien avec les instruments ou les ordinateurs<sup>13</sup>. Il a ainsi fallu un temps de tâtonnements à Laurent Bardotti avant qu'il réussisse à obtenir et à reproduire des surfaces de graphite suffisamment lisses. Concrètement, il y est parvenu en les chauffant à 500 degrés pendant quelques heures – pour éliminer les impuretés chimiques – et en les pelant grâce à du scotch collé à leur surface – pour obtenir une surface suffisamment lisse.

Abordons à présent le deuxième moyen dont disposent les physiciens pour relier le monde réel et les mathématiques. Les simulations représentent aujourd'hui un moyen commode d'extension du monde rigoureux des mathématiques cher à Galilée. Elles présentent des similitudes avec les mathématiques, qui les rendent suffisamment rigoureuses, et en même temps des différences, qui les rendent plus intéressantes dans de nombreux contextes<sup>14</sup>. Elles aident donc à

établir un pont entre réalité et mathématiques de plusieurs manières.

D'abord, bien sûr, en construisant, à l'égal des mathématiques, un monde bien défini, rigoureux, sans (trop de) surprises une fois qu'il a été défini et exploré. Ainsi, le modèle utilisé ici a permis d'interpréter les expériences en les reliant à des bases physiques solides (la diffusion des agrégats notamment) de manière aussi sûre qu'une théorie mathématique. Pour preuve, notre interprétation a tenu face aux objections de nos collègues qui doutaient de notre résultat improbable : les agrégats se déplacent des millions de fois plus vite que ce qui était accepté jusque-là.

Ensuite, autre similarité avec les mathématiques, les simulations nous obligent (et nous aident) à transformer nos intuitions en des règles rigoureuses, mécaniques. On peut évoquer trois manières différentes pour parvenir à ce but : en forçant le programme à être cohérent ( *via* la compilation ) ; en explorant tous les cas possibles (qui finissent par arriver lors des simulations<sup>15</sup>) ; en obligeant à préciser les valeurs de tous les paramètres qu'on a introduits mais sur lesquels on n'a pas forcément envie d'être précis. Écrire un programme opérationnel, c'est dialoguer avec un interlocuteur implacable, qui oblige à préciser sa pensée, force à décider ce que le modèle indique dans chaque configuration, sans ambiguïté<sup>16</sup>.

Les simulations présentent néanmoins des différences importantes avec l'approche mathématique habituelle, qui vise à établir des formules analytiques générales. Les simulations nous permettent en effet de dialoguer avec le monde mathématique de manière plus flexible, en utilisant d'autres variables, d'autres degrés de liberté plus proches de l'intuition, plus proches aussi de ceux utilisés dans les expériences<sup>17</sup>. Ainsi pour modéliser la rencontre entre les agrégats qui diffusent sur une surface et des îlots déjà formés, les mathématiques doivent passer par des coefficients (les « sections efficaces de capture ») qui tentent de rendre compte, en moyenne, de leur probabilité de rencontre. Ces coefficients n'ont pu être calculés, de manière approchée, que pour des îlots supposés circulaires, alors que les formes réelles sont plus complexes. Et tandis que les simulations obtiennent sans peine ces formes fractales (comme celles des illustrations plus haut), les formules mathématiques ne peuvent rendre compte que d'îlots circulaires. Or il est clair que les images obtenues grâce aux simulations permettent une confrontation plus aisée avec les expériences. Dans notre exemple, elles ont même donné l'impulsion initiale à la connexion entre expériences et modèle, qui ne se serait sans doute pas faite autrement...

Un modélisateur est confronté en permanence à deux partenaires inflexibles : l'expérimentateur qui lui rappelle que son modèle ne doit pas trop s'éloigner du monde expérimental, dont il se fait le porte-parole, et l'ordinateur qui l'oblige à rester rigoureux, précis. Cette co-



construction du modèle est essentielle pour que soit réussi l'alignement entre mathématiques et expériences. D'où l'importance de contacts quotidiens entre expérimentateurs et théoriciens, induisant une meilleure adaptation réciproque. Dans ce contexte, l'article scientifique joue un rôle important de cristallisateur des tâtonnements quotidiens, en forçant l'accord sur certains résultats, obtenus au jour le jour, dans un foisonnement d'avis et de contacts.

## Épilogue : Simuler la société ?

Ce travail m'avait enseigné la puissance des simulations numériques, capables de dépasser les mathématiques dans la compréhension de la croissance des couches de nano-agrégats. Après une dizaine d'années consacrées à la modélisation des nano-agrégats, j'ai eu envie de changer de domaine et de tester cette approche sur un champ beaucoup plus difficile : les sciences sociales.

Envisagée comme une méthode de compréhension générale du social, cette idée peut sembler au mieux naïve, au pis irresponsable. En effet, l'étude évoquée précédemment nous a montré l'importance de l'expérimentation contrôlée, des situations purifiées pour parvenir à la compréhension rigoureuse au sens du physicien. Quelle pertinence espérer pour cette approche dans le domaine social, heureusement peu contrôlable ? Côté simulations, s'il est tentant de fabriquer des « sociétés virtuelles » *in silico*, en partant du comportement des individus, il est clair que cet « individualisme méthodologique » est par trop simplificateur. Il ignore par exemple un fait essentiel sur le plan sociologique : les relations « sociales » sont durables, car elles sont portées également par des objets, des institutions, c'est-à-dire des structures au niveau mésoscopique qui ne sont pas prises en compte dans cette approche<sup>18</sup>. À quel type de savoir peut-on envisager de parvenir en simulant « rigoureusement » le social<sup>19</sup> ?

Je n'ai bien entendu pas de réponse définitive à cette question. Cependant, il existe des éléments objectifs qui poussent à s'intéresser à des systèmes sociaux spécifiques armés des outils de modélisation du physicien. D'abord, depuis quelques années, des données numériques de plus en plus nombreuses deviennent disponibles. Citons les itinéraires de voitures suivies par GPS, les réseaux scientifiques décrits par les articles et leurs citations, les transactions sur Internet ou encore la géolocalisation des appels téléphoniques par les portables. Face à cette avalanche de données, des outils d'analyse quantitatifs soutenus par la puissance des ordinateurs peuvent aider à mieux comprendre les mécanismes sociaux sous-jacents. Ainsi, la jeune science des réseaux complexes<sup>20</sup> permet de fouiller des millions d'articles et d'éclairer l'histoire des disciplines scientifiques<sup>21</sup>, et cela de manière complémentaire à l'approche traditionnelle par l'analyse

approfondie de quelques textes. Ce n'est d'ailleurs pas la première fois que l'avalanche de données sociales suscite des tentations du côté des chercheurs en sciences exactes. Ainsi, au début du xix<sup>e</sup> siècle, l'affirmation des bureaucraties étatiques avait conduit à la collecte de nombreuses données à l'échelle des nations (taux de naissance, de mortalité, de suicide...). Ces données ont révélé des régularités inattendues, faisant fantasmer des astronomes comme Quételet qui conçut l'idée d'une « physique sociale ». Le bilan de ce mariage entre sciences sociales et mathématiques est fort mince du côté des sciences sociales. Il est bien plus intéressant pour les mathématiques appliquées et la physique, qui ont hérité d'un nouvel outil d'analyse de la variabilité du réel, la loi Normale<sup>22</sup>.

L'ordinateur permet également de concevoir des sociétés virtuelles *in silico*. Le but consiste à expliquer le niveau macroscopique (la société) par le niveau microscopique (les individus et leurs interactions). En économie, avec ce type de simulations on peut dépasser un grand nombre d'hypothèses restrictives adoptées pour simplifier les calculs, menant à cet individu caricatural qu'est l' *homo œconomicus*. Les simulations de type « multi-agents » permettent en effet d'analyser des systèmes comprenant des individus hétérogènes, à rationalité limitée et n'ayant qu'une connaissance imparfaite du monde. Pourtant, si les physiciens acceptent couramment que les simulations prolongent la rigueur mathématique, cela n'est pas (encore) le cas des économistes, qui continuent à privilégier les démonstrations mathématiques. Le physicien qui s'y risque doit passer par un long travail d'acculturation pour rentrer dans le paradigme économique. Cela se traduit notamment par l'utilisation des caractéristiques de base des acteurs économiques (utilité individuelle, prix de réserve, stratégie d'optimisation...) qui rendent le savoir produit par les simulations assimilable par les économistes et cumulable avec leurs modèles. Cela est souvent frustrant pour le physicien, qui trouve que ces caractéristiques sont plus dictées par convenance mathématique que par des données empiriques. Mais, à moins de vouloir refonder l'économie sur de nouveaux ingrédients de base, les simulations doivent se plier à ceux utilisés aujourd'hui, faute de quoi les résultats ne seront pas considérés comme un savoir... en économie.

## Notes

[1.](#) Bardotti *et al.*, 1995.

[2.](#) Pour plus de détails, le lecteur pourra consulter Jensen, 1996.

[3.](#) Rebaptisé depuis la mode des nanosciences en « Laboratoire de physique de la matière condensée et des nanostructures ».

[4.](#) De Gennes, 1976.

- [5.](#) Jensen *et al.*, 1992.
- [6.](#) Ce terme renvoie aux analyses de Bruno Latour et Michel Callon, voir par exemple Latour, 2001.
- [7.](#) Jensen *et al.*, 1994.
- [8.](#) Jensen *et al.*, 1994a.
- [9.](#) Dix citations par an depuis sa publication, chiffre que l'on peut comparer aux citations reçues en moyenne par un article de physique (moins d'une citation par an) ou par l'article d'Albert Fert qui lui valut le prix Nobel en 2007 (deux cents citations par an).
- [10.](#) Clavelin, 1996.
- [11.](#) Je renvoie le lecteur à Jensen, 2001.
- [12.](#) Lécaille, 1996.
- [13.](#) Collins, 2001.
- [14.](#) Sur la nouveauté apportée par les simulations, notamment dans le domaine de la fiabilité et de la preuve mathématique, la lecture indispensable est MacKenzie, 2001.
- [15.](#) Comme la rencontre entre trois particules qui diffusent, événement rare que je n'avais pas prévu explicitement et qui a « planté » la première version du programme.
- [16.](#) Pour une discussion plus générale du rôle similaire de l'écriture par rapport à l'oral, on se référera au livre classique de Goody, 1979.
- [17.](#) Pour une discussion approfondie de l'importance croissante des simulations dans les sciences, le lecteur pourra consulter Galison, 1997, Creager et Lunbeck, 2007. Sur le cas spécifique de la physique de la matière, voir Jensen et Blase, 2002.
- [18.](#) Comme le démontre avec humour Bruno Latour (Latour, 2007), l'individualisme méthodologique est une approche parfaitement adaptée à une société de babouins, dont les structures sociales sont très limitées et coûteuses (en temps) à entretenir !
- [19.](#) Pour une analyse subtile de la « vanité de la rigueur en économie », voir Cartwright, 2005.
- [20.](#) Voir, par exemple, une présentation flatteuse dans Barabási et Bonabeau, 2003. Pour une analyse plus critique, on consultera Keller, 2005.
- [21.](#) Pour l'exemple de l'émergence d'une discipline à l'interface entre biologie et cancer, voir Cambrosio *et al.*, 2006.
- [22.](#) Pour une histoire de ces échanges interdisciplinaires, le lecteur pourra consulter Desrosières, 2002, ainsi que Porter, 1994.

## Bibliographie

- Barabási et Bonabeau, 2003 : Albert-László Barabási et Éric Bonabeau, « Réseaux invariants d'échelle », *Pour la Science*, n° 314.
- Bardotti *et al.*, 1995 : Laurent Bardotti *et al.*, « Experimental observation of fast diffusion of antimony clusters on graphite surfaces », *Physical Review Letter*, 74, p. 4694.
- Cambrosio *et al.*, 2006 : Alberto Cambrosio *et al.*, « Mapping the

emergence and development of translational cancer research », *European Journal of Cancer*, 42, p. 3140-3148.

- Cartwright, 2005 : Nancy Cartwright, « The Vanity of Rigour in Economics. Theoretical Models and Galilean Experiments », in P. Fontaine et R. Leonard (éd.), *The « Experiment » in the History of Economics*, Londres, p. 135-153.
- Clavelin, 1996 : Maurice Clavelin, *La Philosophie naturelle de Galilée*, Paris (nouv. éd.).
- Collins, 2001 : H. M. Collins, « Tacit Knowledge, Trust and the Q of Sapphire », *Social Studies of Science*, vol. 31, n° 1, p. 71-85.
- Creager et Lunbeck, 2007 : Angela Creager et Elizabeth Lunbeck (éd.), *Science without Laws*, Durham.
- De Gennes, 1976 : Pierre-Gilles De Gennes, « La percolation : un concept unificateur », *La Recherche* ; repris dans le n° 999, mai 2000.
- Desrosières, 2002 : Alain Desrosières, « Adolphe Quételet », *Courrier des statistiques*, n° 104, p. 3-8.
- Galison, 1997 : Peter Galison, *Image and Logic, A Material Culture of Microphysics*, Chicago.
- Goody, 1979 : Jack Goody, *La Raison graphique. La domestication de la pensée sauvage*, Paris.
- Jensen et al., 1992 : Pablo Jensen et al., « Experimental achievement of 2D percolation and cluster-cluster aggregation models by cluster deposition », *Physica A*, 185, p. 104-110.
- Jensen et al., 1994 : P. Jensen et al., « Controlling nanostructures », *Nature*, 368, p. 22.
- Jensen et al., 1994a : P. Jensen et al., « Deposition, diffusion and aggregation of atoms on surfaces : a model for nanostructure growth », *Physical Review, B*, p. 50, 15316.
- Jensen, 1996 : P. Jensen, « Fabriquer des objets à l'échelle atomique », *La Recherche*, 283, p. 42.
- Jensen, 2001 : P. Jensen, *Des atomes café crème : la physique peut-elle expliquer le monde ?*, Paris.
- Jensen et Blase, 2002 : Pablo Jensen et Xavier Blase, « La matière fantôme », *La Recherche* (avril).
- Keller, 2005 : Evelyn Fox Keller, « Revisiting "scale-free" networks », *BioEssays*, 27, p. 1060-1068.
- Latour, 2001 : Bruno Latour, *Pasteur : guerre et paix des microbes*, Paris (nouv. éd.).
- Latour, 2007 : Br. Latour, *Changer de société – Refaire de la sociologie*, Paris.
- Lécaille, 1996 : Pascal Lécaille, *Ethnographie du travail de laboratoire, à propos de la simulation*, mémoire de maîtrise, Université de Lyon 2.
- MacKenzie, 2001 : Donald MacKenzie, *Mechanizing Proof. Computing, Risk and Trust*, Cambridge.
- Porter, 1994 : Th. M. Porter, « Chance Subdued by Science », *Poetics Today*, vol. 15, p. 467-478.

## Nos partenaires

Le projet *Savoirs* est soutenu par plusieurs institutions qui lui apportent des financements, des expertises techniques et des compétences professionnelles dans les domaines de l'édition, du développement informatique, de la bibliothéconomie et des sciences de la documentation. Ces partenaires contribuent à la réflexion stratégique sur l'évolution du projet et à sa construction. Merci à eux !



- CONCEPTION :  
[ÉQUIPE SAVOIRS](#),  
PÔLE NUMÉRIQUE  
RECHERCHE ET  
PLATEFORME  
GÉOMATIQUE  
(EHESS).
- DÉVELOPPEMENT :  
DAMIEN  
RISTERUCCI,  
[IMAGILE](#), [MY  
SCIENCE WORK](#).  
DESIGN : [WAHID  
MENDIL](#).

