



INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences

Inria



VILLE DE NICE

UNIVERSITÉ  
CÔTE D'AZUR 

## Académie en région à Nice et Sophia Antipolis

### Regard sur l'informatique et les mathématiques de demain

Gérard Berry

Collège de France

Historiquement, toutes les sciences et technologies liées à la physique et au vivant ont été fondées sur la paire matière-énergie, puis sur le triangle matière-énergie-ondes. Au milieu du 20<sup>e</sup> siècle s'y est adjointe progressivement l'informatique, qui traite l'information codée numériquement à l'aide d'algorithmes conceptuels mis en œuvre par des programmes exécutés par des ordinateurs. Son explosion au début du 21<sup>e</sup> siècle a provoqué la transformation du triangle au tétraèdre, en permettant des nouveautés scientifiques et techniques majeures qui vont aller en s'amplifiant. La nouveauté fondamentale apportée par l'informatique est celle de *l'universalité* de l'information et de l'ordinateur en tant que machine à information, théorisée par Turing en 1936 : la notion d'information est la même quel que soit le domaine d'application et toutes les machines sont logiquement équivalentes, ne différant que par leur capacité de calcul et par leur prix. Cette universalité est unique dans l'histoire des sciences et des techniques. De plus, par rapport aux sciences naturelles, l'informatique est une science de construction : elle ne demande pas la compréhension d'une nature préexistante que nous n'avons pas choisie, car nous la construisons entièrement. En ce sens, elle prolonge les mathématiques, avec qui elle interagit constamment. Mais sa pratique doit bien sûr beaucoup aux progrès de la physique qui ont permis l'émergence du circuit intégré, qui rassemble maintenant des milliards de transistors sur quelques millimètres carrés de silicium. Il a permis la création des ordinateurs modernes puis d'objets vraiment nouveaux comme le smartphone, qui a tout bouleversé en dix ans. Des progrès au moins aussi grands ont eu lieu dans le domaine des logiciels, eux très indépendants de la physique. Ce sont devenus de très grandes créations intellectuelles, comportant couramment des millions de lignes de code. Mais devient clair que fameuse loi de Moore, qui a permis le doublement du nombre de transistors par unité de surface tous les 2 ans, va arriver en fin de course. C'est en fait un bonus pour la recherche en physique et en architecture logique des ordinateurs : enfin, il va falloir trouver d'autres matériaux et d'autres principes que ceux du silicium que nous améliorons progressivement depuis 50 ans, et peut-être même de nouvelles façons d'écrire les logiciels !

La plupart des applications modernes de l'informatique sont fondées sur le fait que raisonner et agir sur l'information est souvent plus efficace que le faire sur la matière. Ainsi, les rois modernes de l'hôtellerie sont ceux qui savent qui veut aller où quand, et ce qu'on pense de là

où on est allé ; ce ne sont plus ceux qui possèdent les hôtels. Internet et le Web permettent l'accès mondial à l'information, qu'elle soit astructurée ou structurée comme dans l'immense encyclopédie Wikipedia, et la musique et la vidéo deviennent dématérialisées et accessibles par tous. Naviguer dans cette immense masse d'information est devenu facile grâce par le moteur de recherche, une invention absolument majeure. Les données et articles scientifiques deviennent lisibles de n'importe où, et la notion de science ouverte et collaborative se généralise. Des systèmes comme *Software Heritage* (Inria et Unesco) cataloguent de millions de projets logiciels avec leur histoire complète. Bien d'autres innovations majeures restent encore à faire.

Des progrès encore plus grands viendront de la généralisation du couplage entre l'informatique et les autres sciences et techniques. L'ensemble de l'instrumentation physique ou médicale s'informatise à grande allure, les algorithmes y devenant aussi importants que les principes physiques. La conception assistée par ordinateur se généralise pour la conception, le design et la fabrication des objets de toutes sortes. Les objets deviennent de plus en plus connectés, et sont déjà plus nombreux que les hommes sur Internet. La modélisation et la simulation informatique des phénomènes physiques, qui couple étroitement informatique et mathématiques appliquées, se généralise : elle simule les machines physiques comme les avions, les systèmes naturels comme les planètes, étoiles et galaxies, les processus cellulaires, le fonctionnement du cœur, et même les instruments de musique pour leur donner de nouvelles possibilités expressives. L'idée centrale de la simulation, c'est simplement de remplacer la matière, l'énergie et les ondes d'un phénomène physique quelconque par la seule information traitée par des algorithmes et des programmes. Les lois physiques et leurs équations mathématiques s'y transforment en algorithmes. Il faut bien sûr des machines informatiques pour simuler, mais, leur universalité fait que ce sont les mêmes quoiqu'on simule. Et la simulation permet s'affranchir largement du temps. On peut par exemple simuler vite des phénomènes lents, comme la collision de galaxies en astronomie, ou lentement des phénomènes rapides, comme le repliement des protéines en biologie. On peut aussi simuler en temps réel, comme pour l'entraînement des pilotes d'avion ou des chirurgiens. Mais la simulation a bien sûr ses limites. Comme on dit aux USA, « You won't find oil by drilling the map » (vous ne trouverez pas de pétrole en forant la carte).

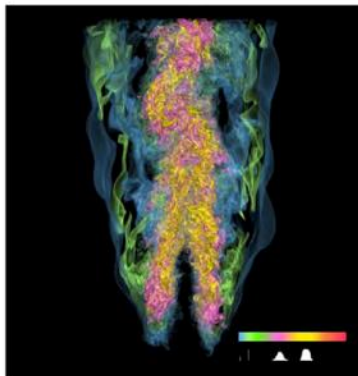
Jusqu'aux années 2010, les données étaient souvent vues comme passives par rapport aux algorithmes et programmes. Mais l'explosion récente des techniques d'apprentissage automatique leur donne un rôle bien supérieur : quand elles sont en deviennent massives, elles permettent d'entraîner des algorithmes génériques comme les réseaux de neurones profonds, avec des applications qui prennent de plus en plus d'importance dans des domaines autrefois peu informatisés, que ce soit en linguistique ou en biologie et médecine.

Mais tout ça n'est pas magique et peut aussi être dangereux, car l'informatique est bien loin d'être un domaine facile. Trois dangers majeurs sont à l'œuvre : la mauvaise spécification de ce qu'on doit réaliser, souvent liées au manque de culture informatique de beaucoup d'acteurs ; les bugs informatiques, micro-erreurs d'origine toujours humaine dont les conséquences peuvent être catastrophiques car l'ordinateur exécute les programmes faux aussi vite et aussi efficacement que les justes ; enfin les problèmes de sécurité, dont l'importance devient majeure avec l'augmentation des attaques sur les données et sur les systèmes informatisés comme les usines, hôpitaux, transports, ou réseaux d'énergie. En bref, faire de l'informatique, c'est facile, faire de l'informatique sûre et résistante aux attaques, c'est beaucoup plus difficile. La science informatique est très active sur la résolution de ces questions. C'est d'ailleurs là qu'informatique et mathématiques se rejoignent et se complètent le mieux. Par exemple, la vérification formelle des programmes, indispensable pour en garantir la sûreté maximale, contribue beaucoup aux progrès de la logique mathématique. Elle permet maintenant la preuve vérifiée en machine de grands théorèmes comme celui de Feit-Thompson sur la classification des groupes, et même la résolution de

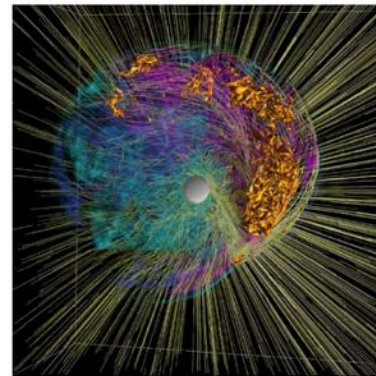
conjectures très anciennes comme celle de Kepler sur le rangement optimal des sphères (ou des oranges). Mais la coopération des deux domaines est bien plus large : l'analyse des performances des algorithmes et la cryptologie font appel à des mathématiques variées et de plus en plus aux probabilités, en les enrichissant. Le calcul formel permet de manipuler de très grandes formules mathématiques. Le traitement du signal comprime et améliore les sons et les images. Les nouveaux systèmes de calcul Booléen permettent de résoudre de grands problèmes combinatoires en théorie des nombres, etc.

Mais un problème lancinant ne progresse que bien trop peu : le manque d'acculturation à l'informatique de la population, des décideurs et même des scientifiques. Le système éducatif secondaire français a longtemps refusé d'enseigner l'informatique, qui n'est entrée dans les programmes du Lycée qu'en 2019, mais avec un manque criant de professeurs formés. Et beaucoup trop d'acteurs cherchent à avoir un avis de préférence péremptoire sur l'informatique et ses conséquences sans faire l'effort de comprendre ce qu'elle est vraiment. Ce n'est plus une position tenable pour bien conduire le futur.

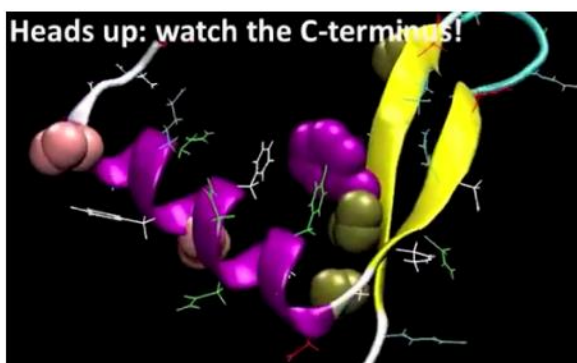
### Modélisation et simulation numérique : quelques exemples



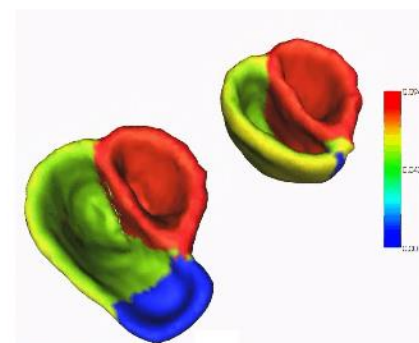
Ariane 5



Supernova



repliement de protéine



Préparation d'opération du cœur