

QUAND LA VIE REMPLECE LE SILICIUM

Aux frontières de la bio-informatique

Dennis Shasha

*Professeur d'informatique
au Courant Institute, Université de New York*

Cathy Lazere

*Auteure spécialisée
dans les nouvelles technologies*

Traduit de l'américain par Dominique Maniez

DUNOD

L'ouvrage original en langue anglaise est paru en 2010 sous le titre
Natural computing : DNA, quantum bits, and the future of smart machines
aux éditions :

W. W. Norton & Company, Inc.
500 Fifth Avenue, New York, N.Y. 10110
www.wwnorton.com

Copyright © 2010 by Dennis Shasha and Cathy Lazere.
All rights reserved.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced,
stored in a retrieval system or transmitted in any form or by any means,
electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without
permission of the copyright holder.

While every effort has been made to contact owners of copyright
material produced in this book, we have not always been successful. In
the event of a copyright query, please contact the Publisher.

Illustration de couverture version française :
3D render of DNA strands on abstract background
© Kirsty Pargeter - Fotolia.com

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage. Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements		d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).
--	---	--

© Dunod, Paris, 2011 pour la traduction française.
ISBN 978-2-10-056618-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^e et 3^e al, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	IX
PARTIE I. INFORMATIQUE ADAPTATIVE.....	1
Chapitre 1. S'inspirer des animaux	7
Chapitre 2. Concevoir pour une planète lointaine	17
Chapitre 3. Inviter l'évolution dans le processus de conception ..	35
Chapitre 4. Surfer sur la bonne vague	47
Chapitre 5. Penser l'ensemble du système	59
PARTIE II. PROGRAMMER LE VIVANT	75
Chapitre 6. Aux frontières du vivant	79
Chapitre 7. Un origami moléculaire	89
Chapitre 8. Programmer des bugs	101
Chapitre 9. Fabriquer un milliard de bio-ordinateurs	111
Chapitre 10. Du local au global	121
PARTIE III. PHYSIQUE ET VITESSE	131
Chapitre 11. L'architecte de la vitesse	135
Chapitre 12. Anton et le femtoscope géant	147
Chapitre 13. Retour à la nature	159
Chapitre 14. Vers une nouvelle loi de la physique	175
ÉPILOGUE	191
REPÈRES CHRONOLOGIQUES.....	195

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	199
Index	203

*Aux rebelles
qui envoient la science dans de nouvelles directions.*

AVANT-PROPOS

Lorsque nous avons entrepris ce livre, nous nous attendions à nous entretenir avec des scientifiques qui travaillaient sur des problèmes aux limites de ce qu'un ordinateur est capable de calculer. Nous nous attendions à des descriptions de nouvelles architectures d'ordinateurs et à une grande variété de nouvelles techniques logicielles. Les quinze scientifiques décrits dans cet ouvrage ont des métiers très différents : ils contrôlent à distance des vaisseaux spatiaux situés à des millions de kilomètres, ou incorporent de l'intelligence dans des bactéries, ou créent des ordinateurs qui ont autant de puissance qu'un million d'ordinateurs de bureau réunis. Ils travaillent sur les applications les plus exigeantes dans le domaine de la science, de l'ingénierie et même de la finance. Nous nous attendions à cette diversité, mais nous n'imaginions pas cette vision commune qui a émergé de toutes ces disciplines : l'avenir de l'informatique passe par une synthèse avec la Nature.

Cette vision comporte trois grands axes.

Premièrement, la réflexion en biologie a inspiré de nouvelles façons de faire de l'informatique. Ce n'est pas encore visible dans votre traitement de texte ou bien dans les salles serveur, mais cela existe dans les applications qui repoussent les limites de la technologie. Par exemple, les ordinateurs contrôlent les vaisseaux spatiaux pendant le vol et après l'atterrissage. Une fois en vol, la réparation du matériel embarqué est bien souvent impossible manuellement, c'est pourquoi des ingénieurs créatifs conçoivent des machines qui se réparent toutes seules. Si vous n'êtes pas de la partie, vous aurez sans doute du mal à apprécier le changement de mentalité que cette approche représente. Au lieu de créer une machine de haute précision qui puisse gérer chaque possibilité, les concepteurs construisent

une machine qui va s'adapter aux possibilités que les ingénieurs ne peuvent même pas imaginer.

Bien qu'il y ait des discussions sur la manière de réaliser cette nouvelle démarche philosophique de la conception, la plupart des scientifiques présentés dans cet ouvrage suggèrent que les mécanismes de l'évolution ou une certaine forme d'apprentissage doivent intervenir. De prime abord, l'évolution et l'apprentissage peuvent sembler très différents. L'évolution se produit sur plusieurs générations et plusieurs organismes alors que l'apprentissage et l'adaptation ne se produisent que dans un seul organisme. Conceptuellement, ces notions sont cependant très similaires : dans les deux cas vous essayez quelque chose et vous voyez comment cela fonctionne ; puis vous répondez à la réaction en tentant quelque chose de nouveau qui risque d'être meilleur. Nous associons l'apprentissage à une amélioration consciente, alors que l'évolution se produit de manière subconsciente, chimique, voire métabolique. Mais quand il s'agit de survie, l'apprentissage et l'évolution ont le même effet.

De nombreuses applications sont basées sur des techniques évolutionnistes. Dans cet ouvrage, un surfeur devenu financier utilise des algorithmes évolutionnistes pour déterminer quand acheter ou vendre des bons du Trésor américain. Un professeur analyse la sécurité d'un système de défense antimissile en testant l'adaptation des procédures aux pannes. Dans ces exemples, l'évolution, l'apprentissage et l'adaptation sont liés.

Deuxièmement, les entités biologiques peuvent remplacer le silicium. L'informatique basée sur l'ADN ou des cellules bactériennes est presque gratuite (des milliards de bactéries n'ont besoin que d'un peu d'eau sucrée pour grandir) et possède aussi des capacités massivement parallèles. Il est possible qu'un jour des bactéries vivantes, et non pas de l'électronique à base de silicium, réalisent des calculs dans nos corps ou bien dans des micro-usines. L'exploitation de la vie de cette manière va nécessiter le développement d'un modèle informatique totalement nouveau. Le temps est révolu où l'on concevait des ordinateurs trônant dans un local climatisé, prévus pour durer sept ans, et commercialisés par des marques mondialement connues .

Les « ordinateurs » composés de bactéries ou de virus se comptent par millions, n'ont pas de nom, et ont une nature provinciale car ils

ne communiquent qu'avec leurs voisins. Ils se trompent aussi souvent. Il paraît impensable de leur faire réaliser quelque chose d'utile, mais cela doit être possible car nous avons déjà ce que les mathématiciens appellent une preuve d'existence : les êtres humains sont composés de près de 100 milliards de cellules et nous sommes capables de courir, penser et aimer, même si aucune de nos cellules individuelles ne sait faire des choses pareilles.

Troisièmement, de nouvelles applications peuvent nécessiter de repenser la physique sous-jacente du calcul. La simulation du repliement d'une protéine ou le décryptement de codes nécessite la coordination du travail de milliers de processeurs. Or la communication entre les commutateurs et la mémoire de l'ordinateur est lente comparée à la vitesse des transistors, et une telle stratégie fonctionne mieux quand il y a peu de communication entre les processeurs éloignés. C'est la raison pour laquelle les machines numériques les plus rapides de la planète sont conçues pour déplacer aussi peu d'informations que possible.

Par exemple, un inventeur multimillionnaire s'est lancé dans la conception d'une machine qui simule le comportement des protéines. Pour ce faire, son matériel déplace les informations concernant chaque atome de la protéine dans des endroits très spécifiques au sein de la circuiterie active. Dans ces endroits, l'information est combinée avec les données correspondantes des atomes voisins, sans retourner dans la mémoire lente de l'ordinateur. Le résultat peut se traduire par une accélération des calculs d'un facteur 1 000, ainsi une tâche qui nécessiterait en temps normal un siècle peut alors se réaliser en moins de 100 jours.

Un autre inventeur, bien moins fortuné, a construit un ordinateur dont l'élément principal de calcul est un morceau de mousse relié à 25 câbles. La mesure du courant électrique peut offrir une méthode pour simuler les équations différentielles qui caractérisent toute une série de problèmes scientifiques « continus », de la prévision des trajectoires des étoiles dans les galaxies à la propagation de la pigmentation des ailes de papillon. Cet « ordinateur analogique étendu » incarne une approche différente de la simulation de la nature : au lieu de calculer une réponse en utilisant des zéros et des uns avec une arithmétique binaire dans un ordinateur numérique, il mesure une réponse.

Vous vous surprendrez peut-être à éprouver de l'affection pour ces machines. Au lieu d'engins métalliques qui font des calculs, envoient des courriels ou bien jouent aux échecs, vous verrez des machines qui sont plus humaines, qui se réparent toutes seules, qui tentent de résoudre des problèmes extrêmement complexes, et qui parfois font des erreurs. Il s'agit de calculateurs qui pourront peut-être un jour réparer une fracture osseuse, assurer la stabilité d'un pont ou même vous aider à respirer sous l'eau.

En écrivant ce livre, nous avons découvert une foule d'idées qui pourraient améliorer le monde de façon décisive. Chaque chapitre de cet ouvrage décrit une voie unique vers une découverte. Nous espérons que vous prendrez autant de plaisir à lire les histoires de ces aventuriers coureurs de risques que nous en avons eu à les écrire.

Remerciements

La science ne peut être expliquée que partiellement avec des mots. Afin de nous aider à transcrire des idées complexes en images accessibles, nous avons fait appel au jeune et talentueux Aidan Daly, qui a dessiné avec beaucoup d'esprit les illustrations qui ouvrent chaque chapitre ainsi que les schémas explicatifs de l'ouvrage. Nous avons aussi bénéficié des commentaires de trois excellents relecteurs : Aaron Apple, Glenn Butterfoss et Ariana Green.

De nombreux amis et nos familles nous ont prodigué des encouragements pendant la rédaction de ce livre, notamment Claude Chereau, Tom et Sophie Kent, Ann Metcalfe, Carla Paganelli et Richard Solomon. Du côté français nous remercions l'excellent traducteur Dominique Maniez et notre éditeur Jean-Luc Blanc.

Nous tenons enfin à remercier tout particulièrement les scientifiques dont nous avons dressé le portrait dans cet ouvrage. Ils ont été extrêmement généreux en nous offrant leur temps, leurs idées et leurs perspectives sur l'avenir.