

# Architecture et **technologie** des **ordinateurs**

Cours et exercices corrigés

**Paolo Zanella**

Ancien professeur d'informatique  
à l'université de Genève

**Yves Ligier**

Membre du comité de direction  
d'une institution genevoise  
Ancien enseignant en informatique


**Emmanuel Lazard**

Maître de conférences à l'université Paris-Dauphine

**6<sup>e</sup> édition**

DUNOD

Illustration de couverture : © scanrail – 123RF

<p>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.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> 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</p>	<p>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.</p> <p>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).</p>
	

© Dunod, 1991, 1993, 1998, 2005, 2013, 2018

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-078459-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), 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.

# Table des matières

## Avant-propos de la sixième édition

## Chapitre 0 – Informatique et société 1

## Chapitre 1 – Histoire de l'ordinateur 9

- 1.1 Introduction 9
- 1.2 Développement historique et conceptuel 10
- 1.3 Progrès au XIX<sup>e</sup> siècle 12
- 1.4 XX<sup>e</sup> siècle 14
- 1.5 Naissance de l'ordinateur : 1945 15
- 1.6 Naissance de l'industrie informatique 17
- 1.7 Évolution du matériel informatique 18
- 1.8 Évolution du logiciel 20
- 1.9 L'informatique au XXI<sup>e</sup> siècle 21

## Chapitre 2 – Présentation générale 23

- 2.1 Ordinateur et informatique 23
- 2.2 Principaux éléments d'un ordinateur 24
- 2.3 Valeurs et acteurs de référence 26
- 2.4 Principes de fonctionnement du matériel 30
- 2.5 Développement de logiciel 35
- 2.6 Utilisation des ordinateurs 37
- 2.7 Conclusion 39

## Chapitre 3 – Représentation interne des informations 41

- 3.1 Introduction 41
- 3.2 Données non numériques 42
  - 3.2.1 *UNICODE - ISO/IEC 10646* 43
- 3.3 Données numériques 51
  - 3.3.1 *Entiers positifs ou nuls* 52
  - 3.3.2 *Entiers négatifs* 54
  - 3.3.3 *Nombres réels* 57
  - 3.3.4 *Décimaux codés en binaire* 61

## Exercices 63

<b>Chapitre 4 – Encodage de l'information</b>	<b>69</b>
4.1 Codes détecteurs et correcteurs d'erreurs	69
4.1.1 Codes auto-vérificateurs	70
4.1.2 Codes auto-correcteurs	70
4.1.3 Détection d'erreurs groupées	75
4.2 Compression	78
4.2.1 Codage de Huffman	79
4.2.2 Codage de Lempel-Ziv-Welch (LZW)	80
4.2.3 Run Length Encoding (RLE)	81
4.2.4 JPEG	82
4.2.5 Ondelettes	82
4.2.6 JPEG 2000	84
4.3 Chiffrement	86
4.3.1 Data Encryption Standard (DES)	87
4.3.2 Algorithme RSA	88
4.3.3 Pretty Good Privacy (PGP)	88
Exercices	89
<b>Chapitre 5 – Circuits logiques</b>	<b>93</b>
5.1 Notion de circuit logique	93
5.2 Circuits combinatoires	93
5.2.1 Algèbre de Boole	94
5.2.2 Fonctions d'une variable	94
5.2.3 Fonctions de deux variables	94
5.2.4 Synthèse d'un circuit combinatoire	100
5.2.5 Analyse d'un circuit combinatoire	105
5.2.6 Multiplexeurs et démultiplexeurs	106
5.2.7 Décodeurs - Codeurs - Transcodeurs	107
5.3 Circuits séquentiels	110
5.3.1 Concept d'automate fini	111
5.3.2 Circuits asynchrones et synchrones	113
5.3.3 Bascules	114
5.3.4 Synthèse d'un circuit séquentiel	119
5.3.5 Analyse d'un circuit séquentiel	121
Exercices	123
<b>Chapitre 6 – Composants électroniques</b>	<b>131</b>
6.1 Électrons dans la matière	131
6.2 Électrons dans le vide	133
6.3 Conductivité	133

6.3.1	<i>Conducteurs</i>	134
6.3.2	<i>Isolants</i>	134
6.3.3	<i>Semi-conducteurs</i>	134
6.4	Diode	137
6.5	Transistors	138
6.5.1	<i>Transistor bipolaire</i>	139
6.5.2	<i>Transistor à effet de champ</i>	141
6.6	Circuits intégrés	143
6.7	Circuits de base	149
	Exercices	153
<b>Chapitre 7</b>	<b>– Mémoires</b>	<b>157</b>
7.1	Généralités et définitions	157
7.1.1	<i>Hierarchie des mémoires</i>	157
7.1.2	<i>Organisation des informations</i>	160
7.2	Mémoire centrale	161
7.2.1	<i>Mémoires à semi-conducteurs</i>	162
7.2.2	<i>Structure physique de la mémoire centrale</i>	167
7.3	Mémoire cache	168
7.4	Mémoires auxiliaires	169
7.4.1	<i>Enregistrement magnétique</i>	170
7.4.2	<i>Disques magnétiques</i>	175
7.4.3	<i>Disques optiques numériques</i>	178
7.4.4	<i>Cartouches et bandes magnétiques</i>	183
7.4.5	<i>Disques SSD</i>	185
7.4.6	<i>Gestion du stockage</i>	187
	Exercices	191
<b>Chapitre 8</b>	<b>– Unité centrale de traitement</b>	<b>195</b>
8.1	Architecture	195
8.2	Unité de commande	196
8.3	Synchronisation des opérations	198
8.4	Séquenceur	199
8.5	Niveaux de programmation	201
8.6	Structure des instructions niveau machine	202
8.7	Jeu d'instructions	204
8.8	Registres du CPU	205
8.9	Adressage des opérandes	208
8.10	Taille de l'adresse et taille de la mémoire	209
8.11	Unité arithmétique et logique (UAL)	210
	Exercices	210

<b>Chapitre 9 – Superordinateurs et microprocesseurs</b>	<b>213</b>
9.1 Introduction	213
9.1.1 <i>Accroissement de la puissance des ordinateurs</i>	214
9.1.2 <i>Technologie et performance</i>	217
9.1.3 <i>Évaluation de la performance</i>	220
9.2 Superordinateurs	223
9.3 Microprocesseurs	225
9.3.1 <i>Microprocesseur et micro-ordinateur</i>	225
9.3.2 <i>Évolution des microprocesseurs</i>	225
9.3.3 <i>Micro-ordinateurs</i>	229
9.3.4 <i>Performances</i>	232
9.4 Machines parallèles	233
9.4.1 <i>Histoire et évolution des idées</i>	233
9.5 Parallélisme	236
9.5.1 <i>Parallélisme et applications</i>	237
9.5.2 <i>Toujours plus vite</i>	238
9.6 Évolution de l'architecture du CPU	239
9.6.1 <i>Architectures RISC et CISC</i>	239
9.6.2 <i>Amélioration des performances</i>	241
9.6.3 <i>Tendances futures</i>	249
9.6.4 <i>L'importance du logiciel</i>	250
9.6.5 <i>Conclusions</i>	250
<b>Chapitre 10 – Entrées / sorties</b>	<b>251</b>
10.1 Évolution	251
10.2 Clavier	253
10.3 Souris et autres dispositifs de pointage	254
10.4 Écrans	255
10.4.1 <i>Écrans cathodiques</i>	255
10.4.2 <i>Écrans plats</i>	260
10.5 Imprimantes	268
10.5.1 <i>Imprimantes avec impact</i>	269
10.5.2 <i>Imprimantes sans impact</i>	270
10.5.3 <i>Traceurs</i>	274
10.5.4 <i>Imprimantes 3D</i>	274
10.6 Scanners	276
10.7 Identification et surveillance	277
10.8 Architectures et procédures d'entrées/sorties	281
10.8.1 <i>Système d'interruption</i>	281
10.8.2 <i>Accès direct à la mémoire (DMA)</i>	284
10.8.3 <i>Canaux d'entrées/sorties</i>	286

10.8.4	<i>Contrôleur de périphériques</i>	288
10.8.5	<i>Bus</i>	289
10.9	Principaux bus d'extension	290
10.9.1	<i>Bus locaux</i>	290
10.9.2	<i>Bus externes</i>	292
10.9.3	<i>Bus local et externe</i>	296
	Exercices	297
<b>Chapitre 11 – Réseaux</b>		<b>299</b>
11.1	Introduction	299
11.2	Voies de transmission	301
11.2.1	<i>Transmissions série et parallèle</i>	302
11.2.2	<i>Modes de transmission et synchronisation</i>	302
11.2.3	<i>Modes d'exploitation d'une voie de transmission</i>	304
11.2.4	<i>Bande passante et capacité</i>	304
11.3	Transmission analogique et modulation	306
11.3.1	<i>Transmission analogique</i>	306
11.3.2	<i>Modulation d'amplitude, de fréquence et de phase</i>	306
11.4	Transmission digitale et modulation	308
11.4.1	<i>Transmission digitale ou numérique</i>	308
11.4.2	<i>Modulation par impulsion et codage</i>	309
11.5	Multiplexage	310
11.6	Topologie et protocoles	312
11.6.1	<i>Types de réseaux</i>	312
11.6.2	<i>Techniques de commutation de données</i>	313
11.6.3	<i>Topologie</i>	314
11.6.4	<i>Protocoles</i>	316
11.6.5	<i>Modèle ISO-OSI</i>	316
11.6.6	<i>Connexions entre réseaux</i>	319
11.6.7	<i>Protocole HDLC</i>	319
11.6.8	<i>Méthodes d'accès dans les réseaux locaux</i>	320
11.6.9	<i>Exemple de réseau local : Ethernet</i>	322
11.7	Développement des réseaux	324
11.7.1	<i>Standard FDDI</i>	324
11.7.2	<i>Évolution de la commutation par paquets</i>	325
11.7.3	<i>Relais de trames</i>	325
11.7.4	<i>Relais de cellules</i>	326
11.7.5	<i>Réseau numérique à intégration de services</i>	327
11.7.6	<i>ADSL</i>	327
11.7.7	<i>Réseaux locaux sans fil</i>	328
11.7.8	<i>Réseaux mobiles</i>	330

11.7.9	<i>Sécurité des réseaux</i>	330
11.8	TCP/IP : protocoles d'Internet	332
	Exercices	337
<b>Chapitre 12 – Systèmes d'exploitation</b>		<b>343</b>
12.1	Introduction au logiciel d'exploitation	343
12.2	Évolution des systèmes d'exploitation	344
12.2.1	<i>Préhistoire</i>	344
12.2.2	<i>Systèmes par lots</i>	345
12.2.3	<i>Vers l'indépendance des entrées/sorties</i>	346
12.2.4	<i>Multiprogrammation</i>	347
12.2.5	<i>Temps partagé</i>	348
12.3	Caractéristiques des systèmes d'exploitation	349
12.3.1	<i>Exploitation des ressources</i>	350
12.3.2	<i>Virtualisation de la machine</i>	351
12.3.3	<i>Machine à deux états</i>	352
12.3.4	<i>Notions de programme, processeur et processus</i>	353
12.3.5	<i>Structure d'un système d'exploitation moderne</i>	354
12.4	Noyau	356
12.4.1	<i>Allocation du CPU</i>	356
12.4.2	<i>Gestion des interruptions</i>	357
12.4.3	<i>Support de l'environnement des processus</i>	357
12.5	Gestion de la mémoire centrale	359
12.5.1	<i>Partitions de taille fixe</i>	360
12.5.2	<i>Partitions de taille variable</i>	360
12.5.3	<i>Translation dynamique et protection</i>	362
12.5.4	<i>Segmentation</i>	363
12.5.5	<i>Mémoire virtuelle</i>	365
12.5.6	<i>Pagination</i>	365
12.6	Organisation des entrées/sorties	373
12.6.1	<i>Quelques aspects du problème</i>	374
12.6.2	<i>Une approche répandue</i>	374
12.7	Gestion de fichiers	376
12.7.1	<i>Pourquoi un système de fichiers ?</i>	376
12.7.2	<i>Objectifs</i>	377
12.7.3	<i>Enregistrements logiques et physiques</i>	378
12.7.4	<i>Gestion des ressources disques</i>	379
12.7.5	<i>Catalogues</i>	379
12.7.6	<i>Méthodes d'accès</i>	381
12.7.7	<i>Intégrité et sauvegarde</i>	381
12.7.8	<i>Performance</i>	382



12.7.9	<i>Serveurs de fichiers</i>	383
12.8	Allocation des ressources	383
12.8.1	<i>Grappes de serveurs et grilles</i>	384
12.9	Interface utilisateur	384
12.10	Virtualisation	386
12.11	L'informatique dans les nuages	388
12.11.1	<i>Cloud grand public</i>	388
12.11.2	<i>Cloud d'entreprise</i>	389
12.12	Systèmes actuels	390
12.12.1	<i>Systèmes pour smartphones</i>	391
12.12.2	<i>Systèmes pour ordinateurs personnels</i>	392
12.12.3	<i>Systèmes pour ordinateurs centraux</i>	395
	Exercices	398
<b>Chapitre 13</b>	<b>Langages de programmation</b>	<b>401</b>
13.1	Langage machine	401
13.2	Traduction et interprétation	402
13.3	Assembleur	403
13.3.1	<i>Codes opérations mnémoniques</i>	404
13.3.2	<i>Opérandes et étiquettes</i>	404
13.3.3	<i>Littéraux</i>	404
13.3.4	<i>Directives</i>	405
13.3.5	<i>Expressions arithmétiques</i>	405
13.3.6	<i>Macros et sous-programmes</i>	406
13.4	Fonctionnement de l'assembleur	410
13.4.1	<i>Macro-assembleur et cross assembleur</i>	411
13.5	Développement d'un programme	412
13.5.1	<i>Éditeur de texte</i>	412
13.5.2	<i>Éditeur de liens</i>	414
13.5.3	<i>Chargeur</i>	415
13.5.4	<i>Débogueur</i>	417
13.6	Langages évolués	417
13.6.1	<i>Définition d'un langage</i>	417
13.6.2	<i>Concepts de base des langages évolués</i>	419
13.6.3	<i>Exemples de langages évolués</i>	420
13.6.4	<i>Approche orientée objet</i>	425
13.6.5	<i>Intelligence artificielle</i>	428
13.6.6	<i>Éléments d'un langage de programmation</i>	432
13.7	Compilation	433
13.7.1	<i>Structure d'un compilateur</i>	433
13.7.2	<i>Analyse lexicale</i>	434

13.7.3	<i>Analyse syntaxique</i>	435
13.7.4	<i>Analyse sémantique</i>	436
13.7.5	<i>Génération de code intermédiaire</i>	436
13.7.6	<i>Optimisation de code</i>	436
13.7.7	<i>Génération de code objet</i>	437
13.7.8	<i>Table des symboles</i>	437
13.7.9	<i>Traitement des erreurs</i>	437
13.7.10	<i>Passes d'un compilateur</i>	438
13.7.11	<i>Portabilité des programmes</i>	438
13.7.12	<i>Machines virtuelles</i>	439
13.7.13	<i>Cross compilation</i>	440
Exercices		441
<b>Chapitre 14 – Génie logiciel</b>		<b>447</b>
14.1	Définition	447
14.2	Organisation de projet	449
14.2.1	<i>Projet informatique</i>	449
14.2.2	<i>Équipe de projet</i>	450
14.2.3	<i>Livrables</i>	452
14.2.4	<i>Industrialisation du processus de développement</i>	456
14.3	Cycles de vie du logiciel	458
14.3.1	<i>Activités génériques</i>	458
14.3.2	<i>Modèles de cycles de vie</i>	459
14.3.3	<i>Modélisation</i>	465
14.3.4	<i>Architecture n-tiers</i>	470
14.3.5	<i>Qualité</i>	471
14.4	Système d'information	473
14.4.1	<i>Système d'information et système informatique</i>	473
14.4.2	<i>Urbanisation d'un SI</i>	474
14.5	Standard ouvert et logiciel libre	476
14.5.1	<i>Standards ouverts</i>	477
14.5.2	<i>Logiciel libre et Open Source</i>	477
14.6	Transformation numérique	479
Exercices		480
<b>Chapitre 15 – Structures de données</b>		<b>483</b>
15.1	Types et structures	483
15.1.1	<i>Vecteurs</i>	485
15.1.2	<i>Tableaux</i>	485
15.1.3	<i>Listes</i>	486
15.1.4	<i>Arbres</i>	487

15.1.5	<i>Queues</i>	488
15.1.6	<i>Piles</i>	489
15.1.7	<i>Tables</i>	489
15.2	Fichiers	494
15.2.1	<i>Notion d'enregistrement</i>	495
15.2.2	<i>Types de fichiers</i>	495
15.3	Bases de données	496
15.3.1	<i>Définition</i>	496
15.3.2	<i>Modèle hiérarchique</i>	498
15.3.3	<i>Modèle réseau</i>	498
15.3.4	<i>Modèle relationnel</i>	498
15.3.5	<i>Modèle à objets</i>	501
15.3.6	<i>Modèle distribué</i>	501
15.3.7	<i>De l'objet au relationnel</i>	502
15.4	Big data	504
15.5	Blockchain	505
	Exercices	508
<b>Chapitre 16</b>	<b>Multimédia</b>	<b>509</b>
16.1	Définition	509
16.2	Audionumérique	510
16.3	Images	513
16.3.1	<i>Images fixes</i>	513
16.3.2	<i>Images animées et vidéo</i>	523
16.4	Réalité virtuelle versus réalité améliorée	527
16.5	Dispositifs d'interaction	535
16.6	Multimédia et les cinq sens	536
<b>Chapitre 17</b>	<b>Internet</b>	<b>539</b>
17.1	Internet	539
17.1.1	<i>Origines</i>	539
17.1.2	<i>Protocole TCP/IP</i>	540
17.1.3	<i>Accès à Internet</i>	540
17.1.4	<i>Outils d'Internet</i>	542
17.2	World Wide Web	542
17.2.1	<i>Origines</i>	542
17.2.2	<i>Localisateurs URL</i>	543
17.2.3	<i>Langage HTML</i>	544
17.2.4	<i>Clients et serveurs web</i>	546
17.2.5	<i>Norme CGI</i>	547
17.2.6	<i>Intranet</i>	548

17.3	Internet et Sécurité	549
17.3.1	<i>Clé de chiffrement, clé publique</i>	550
17.3.2	<i>Signature</i>	551
17.3.3	<i>Certificats</i>	552
17.3.4	<i>PKI</i>	553
17.3.5	<i>SSL</i>	553
17.3.6	<i>PGP [Pretty Good Privacy]</i>	554
17.3.7	<i>IPSec [Internet Protocol Security]</i>	554
17.3.8	<i>SSO [Single Sign On]</i>	555
17.3.9	<i>Menaces</i>	555
17.4	Accès à l'information	560
17.4.1	<i>Guides spécialisés</i>	560
17.4.2	<i>Hiérarchies thématiques</i>	560
17.4.3	<i>Moteurs de recherche</i>	561
17.4.4	<i>Agents intelligents</i>	562
17.4.5	<i>Le web sémantique</i>	562
17.5	Programmation et Internet	563
17.5.1	<i>Langage Java</i>	564
17.5.2	<i>PHP</i>	565
17.5.3	<i>JavaScript</i>	565
17.5.4	<i>Norme CORBA</i>	566
17.6	L'Internet des objets	566
17.6.1	<i>Développement rapide des objets connectés</i>	566
17.6.2	<i>Technologies sans fil</i>	567
17.6.3	<i>Exemples de technologies sans fil</i>	568
	Exercices	570
	<b>Conclusion</b>	<b>571</b>
	<b>Documents photographiques</b>	<b>573</b>
	<b>Ouvrages recommandés</b>	<b>579</b>
	<b>Glossaire</b>	<b>581</b>
	<b>Index</b>	<b>595</b>

# Avant-propos de la 6<sup>e</sup> édition

L'informatique a été l'une des disciplines marquantes du XX<sup>e</sup> siècle et elle est au premier plan de tout développement scientifique, technologique et sociétal du XXI<sup>e</sup> siècle. L'impact sur la société est déterminant, tous les secteurs de l'économie, de la science jusqu'à la vie de tous les jours, au bureau, à la maison, dans la voiture, subissent d'importantes mutations.

L'évolution technologique rapide du monde informatique a réduit considérablement la durée de vie du matériel et du logiciel informatiques, ce qui rend nécessaire une mise à jour régulière de cet ouvrage. La première édition est parue en 1989, la deuxième en 1993, la troisième en 1998, la quatrième en 2005 et la cinquième en 2013. Bien que les concepts présentés dans les éditions précédentes soient toujours valides et présents, cette sixième édition a permis d'intégrer les dernières évolutions technologiques.

Cet ouvrage peut être parcouru de manière non séquentielle. Le chapitre 2 (Présentation générale) sert de chapitre de référence à partir duquel il est possible de passer à n'importe quel autre chapitre. Ainsi, certains chapitres techniques, tel que le chapitre 5 sur les circuits logiques, ne doivent pas constituer un obstacle rédhibitoire pour le lecteur.

Comment fonctionnent les ordinateurs, tant au niveau matériel que logiciel ? Les pages qui suivent apportent une réponse à cette question en faisant la synthèse des éléments qui jouent un rôle important dans la structure matérielle et logicielle des ordinateurs. Comment passe-t-on d'un électron à Internet ? C'est l'ambition de cet ouvrage de répondre à cette question de la manière la plus abordable possible.

L'informatique touche de plus en plus de personnes et de domaines, mais cette discipline ne fait pas encore partie des enseignements de base. On constate un manque flagrant de connaissances de la plupart des utilisateurs. Cet ouvrage permet à toute personne désireuse d'appréhender les connaissances de base indispensables pour interagir et maîtriser l'outil informatique.

Ce livre est suffisamment détaillé pour servir d'ouvrage de base aux informaticiens, mais il est aussi suffisamment progressif pour permettre à toute personne, sans connaissances préliminaires, de s'initier à l'informatique.

Est-il nécessaire de connaître les mécanismes essentiels du fonctionnement des ordinateurs ? Oui, si l'on désire être un spectateur privilégié et averti, capable d'apprécier pleinement l'évolution spectaculaire du monde informatique. En effet, il faut pour cela une bonne connaissance de l'architecture des ordinateurs, du matériel et de l'organisation logicielle puisque ces éléments, ainsi que leur évolution, sont intimement

liés. Dans cet ouvrage, nous avons essayé de mettre en valeur les concepts durables, les fondements de l'informatique, mais nous essayons aussi de présenter les idées nouvelles et les innovations technologiques prometteuses qui éclosent dans ce monde en perpétuelle mutation.

Cet ouvrage est utilisé pour l'enseignement informatique de base dans différentes filières de différentes écoles et universités.

Ce livre se compose de trois parties. La première partie (chapitres 1 à 6) présente les notions de mathématique, de logique, de physique, d'électronique, d'informatique et son histoire qui, à notre avis, doivent faire partie de la culture de base de tous ceux qui se passionnent pour le monde des ordinateurs et de l'informatique. La deuxième partie (chapitres 7 à 11) montre l'architecture et la réalisation matérielle des ordinateurs depuis les microprocesseurs jusqu'aux superordinateurs et aux réseaux. La troisième partie (chapitres 12 à 17) décrit l'organisation logicielle des différents programmes nécessaires à l'exploitation des ordinateurs. Une liste d'ouvrages de référence permet d'approfondir les différentes notions. Un glossaire, donnant une explication claire et concise des termes les plus importants, ainsi qu'un index, complètent cet ouvrage.

Toutes les notions présentées sont illustrées par de nombreuses figures. Plutôt que de se baser sur des machines hypothétiques ou sur une machine particulière, nous avons préféré montrer les principes concrets utilisés dans les machines actuelles et celles réalisées au cours de la brève histoire de l'ordinateur.

À la fin des chapitres (excepté les chapitres purement théoriques) se trouvent des exercices ainsi que leur solution détaillée. Ils permettent de mieux comprendre les problèmes pratiques que l'on rencontre aux différents niveaux de conception d'un système informatique. Ils seront, nous l'espérons, appréciés par les enseignants qui veulent intégrer des séries d'exercices à leurs cours théoriques.

Comme la langue anglaise est largement utilisée en informatique, nous mentionnons les termes les plus importants, entre crochets, lors de la première apparition du correspondant français (exemple : logiciel [*software*]).

Nous tenons à remercier les personnes qui ont aidé à l'élaboration de cet ouvrage, que ce soit par leurs idées, leurs commentaires, leur relecture ou leur implication plus forte dans la rédaction d'un chapitre. Nous adressons des remerciements tout particuliers à Catherine Marti pour son active participation aux premières éditions. Merci à Olivier Baujard et Constantin Sandru pour leur aide précieuse. Depuis la cinquième édition, Emmanuel Lazard nous a rejoint comme co-auteur pour apporter son expertise du monde informatique. Merci à nos familles pour leur patience et leur compréhension.

# Informatique et société

La recherche scientifique, les grandes découvertes et les inventions du XIX<sup>e</sup> siècle sont à l'origine de la révolution industrielle et du développement économique basé sur l'innovation technologique. La première moitié du XX<sup>e</sup> siècle restera l'un des moments les plus passionnants de l'épopée humaine. Les empires ainsi que les valeurs d'une époque s'effondrent. La poésie et la peinture sont profondément redéfinies pendant que la musique est en rupture sur fond d'essoufflement du romantisme. Musiques nouvelles d'une part, mais simultanément révolution technique avec l'enregistrement, qui en permet la captation, alors que la stéréophonie vient d'apporter un nouveau raffinement. L'art s'enrichit de moyens d'expression comme la photographie, le cinéma et la TV. L'art et la science absorbent le choc technologique et poursuivent leurs chemins parallèles.

Au XX<sup>e</sup> siècle, la physique fait des progrès sans précédent dans la connaissance de la matière jusqu'à ses composants élémentaires, qui amènent à la découverte de nouveaux matériaux et de nouvelles sources d'énergie. Dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup> siècle, la biologie, après la découverte de la structure de l'ADN et le grand projet du génome humain, ouvre la voie à l'étude des causes des maladies et de leurs soins. Les nouvelles connaissances au niveau moléculaire stimulent les recherches sur les mécanismes élémentaires de la vie qui révèlent une nature basée sur l'information et la communication. La société humaine qui s'était transformée d'agricole et artisanale à industrielle, est ainsi devenue société de l'information et de la connaissance. Cela a apporté une grande variété de services et de produits nouveaux aux citoyens et aux entreprises et c'est en train de changer notre monde et notre vie quotidienne. Cette nouvelle révolution s'est appuyée sur l'ordinateur, inventé en 1945 et apparu sur le marché dès 1950, réalisant ainsi un ancien rêve et répondant à une demande croissante. Les technologies de l'information et de la communication (TIC) [*ICT: Information and Communication Technology*] se sont développées grâce à l'invention du transistor, des circuits intégrés et des fibres optiques, permettant la création de systèmes de calcul puissants ainsi que le traitement, le stockage et la transmission de grandes quantités de données. Les méthodes et l'approche de la recherche en physique des particules ont évolué, produisant des résultats spectaculaires, suivies par l'exploration de l'espace et la biologie moléculaire qui toutes ont bénéficié de l'apport des TIC. De nouvelles disciplines sont apparues telle la bio-informatique. Depuis les années quatre-vingt-dix, l'innovation technologique est basée sur le développement de la microélectronique, des fibres optiques, d'Internet et de la toile. Si le réseau et l'ordinateur sont responsables du déluge d'informations qui nous submerge, ils sont aussi les seuls moyens disponibles pour résoudre ce problème.

Aujourd'hui, nous avons les moyens de résoudre des problèmes complexes dans les disciplines scientifiques, techniques ou humaines, grâce au progrès des TIC qui avancent sans fléchir. Un circuit intégré de la première génération (1971) pouvait contenir un bon millier de transistors sur une surface de 2 cm<sup>2</sup>. En 2017, on peut y placer quelques milliards de transistors pour en faire un microprocesseur multicœur! Le nombre de transistors nous donne une idée de la complexité d'un tel système et des difficultés des problèmes qu'il peut traiter, ainsi que des connaissances nécessaires pour réaliser ces solutions. Pour développer de telles machines et des systèmes qui les exploitent, il faut des équipes multidisciplinaires composées d'experts et de jeunes chercheurs. Le modèle unifiant les activités de recherche dans les sciences et l'industrie se base sur les ressources disponibles. Les solutions doivent tenir compte du débit des données à traiter, et des contraintes de temps imposées à la production des résultats.

### ***Réflexions sur le paradigme : Formation-Recherche-Technologie-Innovation***

Dès 2007 le monde a été secoué par une grande crise financière d'abord et économico-industrielle ensuite, qui a balayé entreprises et lieux de travail et mis en difficulté de nombreux pays. La reprise est lente, mais les crises et les récessions finissent tôt ou tard et produisent à moyen terme des effets positifs en donnant lieu à des nouvelles opportunités que nous devons être prêts à cueillir.

Pour relancer l'économie, les entreprises et les instances publiques doivent investir en formation technique et scientifique, en recherche et développement technologique ainsi qu'en innovation. Sans quoi on risque de rester à la traîne. Sans des universités modernes, des centres d'excellence et des entreprises compétitives, il est difficile de faire de la recherche ayant un impact réel sur l'économie. En ce qui concerne les TIC, leur rapport avec l'innovation est très solide et peut créer des opportunités pour les entreprises. La révolution informatique est vigoureuse et les TIC auront sans aucun doute un futur éclatant.

Dans un monde numérique le progrès se base sur les TIC. Il faut développer de nouvelles applications et les adapter aux nouvelles exigences. L'informatique est reconnue comme essentielle au progrès des sciences et comme facteur habilitant les entreprises à augmenter leur efficacité et leur compétitivité.

### ***Considérations sur le développement post-industriel***

L'ordinateur est devenu un produit industriel il y a plus de 60 ans. Avant lui, le développement de nouvelles idées, de prototypes et de réalisations durait des siècles. L'ordinateur n'a pas été une exception. La durée de sa gestation peut être estimée à trois siècles. Mais, après sa conception, le monde industriel a subi une accélération extraordinaire, précédée par une augmentation des innovations technologiques et des investissements humains et financiers dans la recherche et le développement.

Dès 1950, la recherche scientifique et l'innovation technologique ont entamé une croissance extrêmement rapide, qui a engendré les changements continus de notre époque. De nouveaux secteurs industriels ont fait leur apparition tels que les TIC, la microélectronique, le nucléaire, les énergies renouvelables, les transports modernes et récemment dans le sillage de la nouvelle biologie moléculaire, on assiste à l'essor d'entreprises dans les secteurs du biomédical et des biotechnologies.



Ces nouvelles entreprises sont caractérisées par un engagement important dans la recherche et visent l'excellence. La capacité d'innovation est donc un facteur décisif pour réussir dans une compétition globale où les pays sont classés selon leur niveau de développement économique.

Les étapes marquantes de l'évolution des TIC sont : l'invention du transistor (1949) puis celle du microprocesseur (1971) et ensuite, dans les années quatre-vingt, l'apparition des PC, des réseaux locaux et nationaux, des superordinateurs parallèles extrêmement performants, ainsi que le développement de logiciels toujours plus complexes appliqués à ces systèmes. Les années quatre-vingt-dix ont vécu la révolution du web et d'Internet qui se sont imposés dans le monde entier.

L'accélération du progrès technologique de ces 60 dernières années a été impressionnante et ne donne à ce jour aucun signe de ralentissement. La suite « recherche-technologie-innovation » a créé de nouvelles sources de bien-être au fil de ces dernières décennies. Ainsi, à l'aube du III<sup>e</sup> millénaire, nous sommes entrés dans la société de l'information et de la connaissance, qui s'appuie sur des plateformes et des infrastructures tributaires de la science et de la technologie de l'information. Les différences entre pays se modifient rapidement. Pendant que certains émergent à grande vitesse, d'autres ont de la peine à suivre les plus avancés. Désormais, le monde change à la vitesse des ordinateurs et d'Internet !

### *Perspectives futures*

La vitalité des entreprises modernes s'exprime grâce à la fertilité des nouvelles technologies telles qu'Internet, la téléphonie mobile, les systèmes multimédias, ou les opportunités offertes par les applications en médecine et dans la santé publique ainsi que dans les domaines de l'énergie et de l'environnement. Le progrès technologique et la diffusion des réseaux permettent de transporter des centaines de Gbit/s sur notre planète et de réaliser de puissants moteurs de recherche. Ainsi, a-t-on conçu des réseaux sociaux et toute une série d'applications internet créées par des jeunes entrepreneurs familiarisés avec les TIC et capables de capter les besoins de la jeunesse.

En même temps, les progrès faits par le calcul parallèle ont permis la mise en œuvre de systèmes ayant une capacité de calcul de plusieurs pétaflops (un million de milliards d'opérations par seconde), et une mémoire de plusieurs dizaines de pétaoctets. Mais que peut-on faire avec de tels systèmes ? On peut par exemple, explorer les profondeurs de la terre à l'aide de méthodes d'imagerie géophysique pour découvrir des gisements de pétrole ou encore concevoir un avion et simuler son comportement en vol, faire le projet d'une centrale nucléaire, comparer les données de milliers de génomes humains pour étudier les causes génétiques de certaines maladies, construire un modèle de la circulation du sang pour étudier les fibrillations cardiaques, écrire un programme capable de battre le meilleur joueur humain au go et tant d'autres.

Contrairement à ce que dit la légende affirmant qu'il n'y a plus rien à découvrir puisque tout a été fait, nous ouvrons continuellement dans tous ces domaines de nouvelles voies inexplorées. Des problèmes réputés insolubles deviennent chaque jour abordables grâce aux nouvelles technologies et au progrès de l'informatique. Pour prendre une image plus terrienne, si les fruits des branches basses de l'arbre ont tous déjà été cueillis, il en reste

encore beaucoup sur les branches du haut. Ils sont moins faciles à cueillir mais, « *il faut gravir la montagne pour atteindre les étoiles* ».

Les grands défis que les nouvelles générations devront affronter seront nombreux et difficiles et il faut d'ores et déjà se préparer sérieusement. Il est primordial de commencer par acquérir les compétences techniques et scientifiques indispensables pour gagner dans un monde qui devient chaque jour plus petit et global en même temps que plus peuplé et compétitif. La science avance dans le microcosme de la matière en explorant le monde subnucléaire à l'aide des grands accélérateurs de particules, la technologie invente des instruments pour travailler aisément en laboratoire à l'échelle moléculaire et à l'échelle atomique. Elle avance aussi dans l'immensité cosmique de l'univers, poussant les observations de plus en plus loin de la Terre, à l'aide d'instruments tels ceux transportés par le télescope Hubble et contrôlés et exploités depuis notre planète. Dans toutes ces explorations qui amplifient et approfondissent nos connaissances scientifiques, l'apport des TIC est essentiel.

Dans un futur proche, on peut parier sur une avancée technologique spectaculaire en tout ce qui concerne directement l'homme, sa santé et son environnement. On peut s'attendre à un intérêt croissant pour la recherche au niveau moléculaire en biologie, médecine et pharmacologie. Il y aura également beaucoup à faire dans les sciences de l'environnement, à commencer par la lutte contre la pollution de l'atmosphère (combustion propre, énergies renouvelables, maisons et transports écologiques, épargne énergétique) et la pollution de l'eau ainsi que de son utilisation efficace. Concernant les communications, l'homme aura très bientôt à sa disposition des réseaux capables de transmettre des milliers de milliards de bits par seconde et c'est ainsi, grâce au progrès de la téléphonie mobile et des transports à grande vitesse, qu'il renforcera son sentiment d'indépendance, son individualité et son ubiquité.

### *L'ère numérique*

De la photographie à la TV, de la musique à la littérature, des documents de bureau à la déclaration d'impôts, tout est numérisé. Au nom de l'efficacité, de la rapidité et de l'universalité, le monde devient numérique pour s'adapter à l'ordinateur et à Internet.

Regardons par exemple du côté de la médecine et de la santé publique. La numérisation a d'abord envahi des territoires à la frontière du progrès médical allant de la génomique à l'imagerie et à la robotique, pour ensuite s'attaquer à la médecine de base et à ses principaux services. Ceci a pour but de transformer la médecine en une « vraie science » car, avec les moyens informatiques mis à la disposition des praticiens, nous pourrions surmonter les problèmes liés à l'immense diversité des individus de notre espèce : en étant capables de stocker les données historiques de chaque patient et d'analyser l'évolution de ses pathologies, son médecin sera à même de lui prescrire des soins ciblés et personnalisés. L'approche informatique pourra ainsi améliorer la qualité et la fiabilité des services médicaux et réduire la fréquence des erreurs humaines. Il faudra du temps, car tout changement crée des résistances et exige des restructurations. Les rapports entre médecins et patients changeront, ainsi que ceux entre services hospitaliers et assurances. Le résultat d'une approche plus rationnelle pourrait amener à un meilleur contrôle des dépenses et donc à une baisse du coût de la santé.

Par ailleurs, l'être humain souffre d'un excès d'information. On parle de déluge de données produit par toutes sortes de moyens qui s'ajoutent à la masse d'informations diffusées par les médias et les réseaux sociaux. La solution est de filtrer automatiquement les informations inutiles ou non sollicitées, afin d'obtenir des données claires et essentielles. Il faut réduire le volume de papier imprimé et de données électroniques qui nous submergent. Mise à part la poubelle, l'ordinateur est le seul outil qui peut nous aider.

Les moyens modernes de communication nous permettent d'amener avec nous en déplacement les données et les documents utiles pour travailler, se connecter au réseau, lire et répondre à des messages électroniques, exécuter des calculs à distance ou faire des recherches dans des bases de données. La distance entre continents n'est plus un obstacle au travail de collaboration. Internet et le web ont changé la façon d'étudier et de travailler. La Terre est devenue bien petite grâce à eux !

Un autre phénomène est la prolifération des téléphones mobiles qui, en offrant la possibilité aux utilisateurs de communiquer entre eux via la messagerie et les réseaux sociaux, de se connecter à Internet, de regarder la TV, de prendre des photos et de les envoyer, font donc de la concurrence aux ordinateurs portables. La dimension très petite de ces appareils est certainement un de leurs meilleurs atouts. La progression de ces étonnants petits outils continue avec l'avancée technologique. L'ubiquité qu'ils offrent aux utilisateurs, couplée à la géolocalisation, ouvre la voie à de nouveaux domaines d'applications.

### *Les défis du changement continu*

La séparation entre recherche, développement et innovation est moins marquée que par le passé. Même la distinction entre recherche fondamentale et appliquée tend à s'effacer. Le changement continu impose aux individus et aux entreprises une adaptation et une éducation permanente. Le changement ne doit pas être subi, mais géré. Il nous faut vivre ancrés dans le présent, la tête tournée vers le futur et à chaque pas en avant, préparer le suivant. Mais gérer le changement n'est pas facile, ni pour les personnes, ni pour les entreprises et encore moins pour ceux qui nous gouvernent : tous se trouvent à devoir gérer les difficultés du présent tandis qu'il faudrait préparer le futur. L'ordinateur joue un rôle important dans le changement ainsi que dans sa gestion. Les professions et les places de travail pour informaticiens se sont multipliées, entraînées par le progrès technologique. Des millions de personnes travaillent maintenant avec un ordinateur ou dans les différentes branches de l'informatique. Et dans un futur proche, nous ferons de plus en plus appel à des spécialistes de cette branche, comme ceux en bio-informatique ou en applications médicales, afin d'affronter les nouveaux défis de la société.

La science et le développement pilotent le changement. Dans tous les pays industrialisés ou émergents, les gouvernements, les académies ou les associations professionnelles disposent de groupes d'experts qui, pour orienter les entreprises dans leurs décisions, suivent l'évolution des technologies et périodiquement publient des prévisions sur leurs perspectives à moyenne ou à longue échéance.

Il nous faudra étudier et augmenter nos compétences dans les sciences et les techniques modernes pour suivre la marche du progrès tel qu'il est vécu dans les pays les plus

avancés. Les TIC sont considérées comme habilitant le progrès dans les sciences et dans la recherche appliquée à l'industrie. Elles seront appelées à soutenir le développement de l'économie et de la société plus que toute autre technologie. Pour donner une idée des transformations qui viendront bouleverser nos connaissances, voici quelques exemples tirés des frontières actuelles de l'informatique et de ses applications dans des domaines tels que la bio-informatique, l'énergie, l'environnement et la société de l'information.

### *Bio-informatique*

L'EMBL (Laboratoire européen de biologie moléculaire) avait en 1993 déjà, reconnu l'importance de la bio-informatique et ouvert une branche, l'EBI, Institut européen de bio-informatique, à Cambridge, ayant pour but d'annoter et conserver des données d'importance biologique telles que des séquences de génomes d'espèces vivantes et des mesures 3D de protéines, et de mettre à dispositions des chercheurs toutes sortes de données et de logiciels bio-informatiques. L'Union européenne a reconnu cette discipline comme stratégique et a lancé le projet Elixir pour réaliser un réseau de compétences et d'infrastructures bio-informatiques recouvrant toute l'Europe. Caractérisée par des groupes pluridisciplinaires de chercheurs, la bio-informatique, discipline à la frontière entre les TIC et la biologie moléculaire, peut encourager les entrepreneurs à investir dans un secteur économique en grande expansion, en facilitant l'accès à la recherche biomédicale. À la base de cette initiative, il y a la conscience que l'accès aux technologies bio-informatiques puisse améliorer la qualité de la vie en faisant avancer les méthodes de prévention, le diagnostic et les soins aux malades.

L'approche de cette recherche passe par l'étude des différents niveaux d'organisation biologique allant des molécules aux organismes vivants. La recherche dans la « nouvelle biologie », science basée sur l'information et la communication, s'articule sur un nombre croissant de nouvelles disciplines, toutes fortement dépendantes des technologies informatiques, telles par exemple :

- Génomique, génétique des populations et génotypes : ce domaine de recherche vise les variations géniques d'une population isolée (Islande, villages de Sardaigne) et cherche à découvrir leurs liens avec des pathologies ayant une présence significative dans un territoire limité et génétiquement isolé. En Sardaigne, des chercheurs travaillent à l'analyse de variations géniques spécifiques et au séquençage de l'ADN de quelques milliers de personnes. L'opportunité existe d'exploiter ces données génomiques grâce à la mise à disposition de séquenceurs puissants de dernière génération connectés à un ordinateur très performant. Cela permet d'étudier les corrélations entre des gènes et certaines pathologies et de prévoir l'effet des variantes géniques sur l'état de santé de la population locale.
- Génomique fonctionnelle : le génome contient les instructions codées pour fabriquer les protéines, les enzymes, les hormones, les anticorps et tous les produits fonctionnels des organismes. Chaque produit est exprimé, construit en quantité et en temps différents selon les besoins, dans chaque cellule et tissus intéressés par sa production. On peut analyser les données des expressions géniques obtenues en laboratoire et étudier à l'aide de méthodes bio-informatiques les corrélations entre

niveaux et modalités d'expression. On cherche à identifier de cette manière les associations entre des profils d'expression génique et des réponses spécifiques à des causes externes telles que par exemple les thérapies, ouvrant ainsi la voie à la médecine personnalisée.

- **Biologie des systèmes** : il s'agit d'une discipline qui part de la modélisation mathématique, de la simulation numérique et des technologies biomédicales, pour comprendre et prévoir le fonctionnement des systèmes biologiques au niveau moléculaire. Par exemple, on peut étudier un système biologique comme le système circulatoire du sang, les différents niveaux fonctionnels des organes jusqu'à leurs molécules. À l'aide d'importantes ressources de calcul, on arrive à simuler l'activité électrique du myocarde afin d'étudier in-silico les causes des fibrillations cardiaques ou étudier les effets collatéraux de produits pharmaceutiques pendant leur phase de tests cliniques. Ces travaux sont une contribution au développement d'un système intégré de simulation des organes et de la physiologie du corps humain.

### *Énergie et environnement*

Les chercheurs dans des domaines tels que la géophysique pour la prospection et l'exploitation pétrolière, la combustion propre, l'énergie solaire thermodynamique et l'hydrométéorologie, font des recherches qui leur demandent des compétences en physique, chimie, mathématique et informatique. Ils sont à même de mettre en œuvre des solutions innovatrices dans les secteurs stratégiques de l'énergie et de l'environnement, ainsi que de créer de nouveaux produits et services industriels basés sur des solides contenus scientifiques et techniques, en s'appuyant sur la modélisation physico-mathématique, le calcul parallèle et sur des systèmes informatiques de grande puissance.

Les grandes industries pétrolières et autres sources d'énergie lancent des projets qui demandent des développements importants de logiciels. Les programmes de reconstruction sismique pour la prospection de pétrole sont en production continue sur d'énormes ordinateurs. Les modèles mathématiques et les calculs nécessaires pour étudier les méthodes de combustion propre sont des grands utilisateurs des superordinateurs au même titre que les calculs de physique nucléaire, météorologie ou dynamique des fluides. L'environnement est l'un des grands défis de l'humanité. Ce secteur a besoin d'applications conçues pour le support à la décision des institutions publiques chargées de la surveillance et de la sauvegarde du territoire et des ressources hydriques. On travaille à l'intégration de modèles complexes à l'aide des technologies TIC permettant l'accès aux bases de connaissances et aux ressources distribuées.

### *Société de l'information*

Il s'agit d'une réalité en pleine croissance qui couvre un territoire très vaste. La globalisation digitale et ses défis poussent le développement des TIC, dont les domaines d'actualité suivants :

- la maison intelligente, qui émerge de l'union entre la domotique, l'Internet, l'interaction gestuelle et qui doit être plus économe en énergie et moins polluante ;
- la télévision du futur 3D, avec canaux personnalisés, nouvelles formes d'exploitation des contenus vidéo générés par les utilisateurs, etc. ;

- le tourisme de demain, qui couvrira tourisme, culture, spectacles, produits typiques et valorisation du territoire. Il sera supporté par les dispositifs mobiles, le GPS, etc.

### *L'informatique demain*

Nous avons vécu un XX<sup>e</sup> siècle exceptionnel et nous nous attendons à ce que le XXI<sup>e</sup> soit tout aussi riche en découvertes et inventions capables de nous étonner. Si le siècle passé a été surtout le siècle de la physique et de la chimie, le nouveau sera celui de l'informatique, de la biologie et des sciences de la vie, qui, au niveau moléculaire, sont toutes concernées par l'information. Le rapprochement entre l'informatique et les télécommunications, l'ordinateur et les médias, les réseaux à très haut débits et les ordinateurs organisés en grilles [*grids*] ou en nuages [*clouds*], l'Internet et le web sémantique, les microprocesseurs puissants et disséminés partout, les nouvelles applications dans les secteurs des médias, du tourisme, de la médecine et de la santé, va apporter des changements profonds dans notre vie quotidienne et dans notre société. Parmi les défis qui attendent les TIC, il y a la tâche de compléter la connexion au réseau de tous les pays de notre planète par des inforoutes donnant accès aux informations et connaissances indispensables aux citoyens de la société de l'information.

Pour aller dans cette direction, il faut raisonner en termes de systèmes d'information et non plus en termes de logiciels ou de machines. Un système d'information est un système dont la finalité est de stocker, transmettre, exploiter des informations spécifiques à un organisme. Il comporte des composantes informatiques comme des bases de données ou des outils de recherche et d'accès; par exemple, un système d'information hospitalier permet de gérer les patients et leurs données administratives et médicales, ainsi que le personnel hospitalier et toutes ses fonctions.

L'informatique est appelée à jouer un rôle essentiel dans l'un des plus grands défis scientifiques de notre époque : la découverte des mécanismes cellulaires et des réactions biochimiques qui sont à la base de la vie et de la santé. Les technologies informatiques sont en train de fournir une contribution déterminante aux recherches de base en biologie, génétique moléculaire, médecine et pharmacologie.

Des disciplines nouvelles surgissent et se multiplient. Les recherches qu'elles stimulent sont réalisées à l'aide de puissantes grappes d'ordinateurs et de bases de données de grandes dimensions. Internet permet de collaborer à l'échelle terrestre. L'informatique sera partout en première ligne : algorithmes, logiciels, méthodes de calcul permettront aux scientifiques de modéliser et simuler le climat et l'environnement et aux architectes de construire des maisons intelligentes. De plus, un jour, peut-être, les TIC seront en mesure d'aider les économistes à faire des modèles fiables de l'économie et des simulations financières capables de prévenir des nouvelles crises.

La compétitivité des entreprises va dépendre de leur maîtrise de la science et des nouvelles technologies de l'information. La formation dans les écoles et les universités devra en tenir compte. La bonne nouvelle est que les jeunes aiment les défis physiques et intellectuels et se passionnent pour les techniques informatiques. Enfin, l'innovation n'est pas seulement technologie, mais aussi créativité. Alors place aux jeunes, aux esprits jeunes et aux esprits toujours jeunes!