

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

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



Informatique
Joëlle Delacroix *et al.*
480 pages
Dunod, 2017

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^e édition

DUNOD

Illustration de couverture : © scanrail – 123RF

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, 1991, 1993, 1998, 2005, 2013, 2018

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

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^o et 3^o 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 ^e siècle	12
1.4 XX ^e 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 ^e 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 <i>UNICODE - ISO/IEC 10646</i>	43
3.3 Données numériques	51
3.3.1 <i>Entiers positifs ou nuls</i>	52
3.3.2 <i>Entiers négatifs</i>	54
3.3.3 <i>Nombres réels</i>	57
3.3.4 <i>Décimaux codés en binaire</i>	61
Exercices	63

Chapitre 4 – Encodage de l’information	69
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
Chapitre 5 – Circuits logiques	93
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
Chapitre 6 – Composants électroniques	131
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
Chapitre 7 – Mémoires		157
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
Chapitre 8 – Unité centrale de traitement		195
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

Chapitre 9 – Superordinateurs et microprocesseurs	213
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
Chapitre 10 – Entrées / sorties	251
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
Chapitre 11	– Réseaux	299
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
Chapitre 12	– Systèmes d'exploitation	343
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
Chapitre 13 – Langages de programmation		401
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
Chapitre 14 – Génie logiciel		447
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
Chapitre 15 – Structures de données		483
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
Chapitre 16 – Multimédia		509
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
Chapitre 17 – Internet		539
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
	Conclusion	571
	Documents photographiques	573
	Ouvrages recommandés	579
	Glossaire	581
	Index	595

Avant-propos de la 6^e édition

L'informatique a été l'une des disciplines marquantes du XX^e siècle et elle est au premier plan de tout développement scientifique, technologique et sociétal du XXI^e 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 réhibitoire 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^e siècle sont à l'origine de la révolution industrielle et du développement économique basé sur l'innovation technologique. La première moitié du XX^e 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^e 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^e 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 cm². 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 économique-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^e 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^e siècle exceptionnel et nous nous attendons à ce que le XXI^e 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!

Chapitre 1

Histoire de l'ordinateur

I.1 Introduction

L'homme a toujours eu besoin de compter. Au cours de la Préhistoire, il ne savait calculer qu'à l'aide de cailloux (latin : *calculi*) ou de ses mains, qui furent sans doute les premières calculatrices de poche. On trouve des traces de symboles et de chiffres dans certaines civilisations de l'Antiquité, quelques millénaires avant notre ère. Chinois, Égyptiens, Sumériens, Babyloniens, Grecs ou Romains, tous avaient des symboles numériques et des méthodes pour compter et calculer.

Ces systèmes de numération s'inspiraient naturellement du nombre de doigts ; c'est ainsi que les Romains, par exemple, établirent des symboles spéciaux pour indiquer 5 et 10 unités (V et X). Dans certaines civilisations pieds-nus utilisant les mains et les pieds pour compter, le nombre 20 était parfois choisi comme base de numération. Dans certaines régions asiatiques, on comptait en se servant des articulations des doigts ou des phalanges, d'où des numérations en base 12, 14, 15, 24, 30, 60, etc.

Les doigts ont servi à nos ancêtres pour compter et pour effectuer toutes sortes d'opérations arithmétiques. On retrouve des traditions de calcul digital chez les anciens Égyptiens, les Grecs et les Romains, mais aussi chez les Chinois, les Aztèques du Mexique précolombien, les Indiens, les Persans, les Arabes, etc.

Curieusement, on utilise, en langue anglaise, le terme de calcul digital dans la nouvelle science informatique, le mot *digit* ayant le sens de chiffre. En français, on parlera plutôt de calcul numérique pour éviter un contresens. Dans les ordinateurs, on utilise des **bits** (le terme bit est la contraction de l'expression anglaise *binary digit*), l'écriture binaire des nombres ne comportant que les deux chiffres 0 et 1.

La plus naturelle et la plus répandue des numérations était celle qui comptait en base 10 et elle nous est parvenue à travers les siècles avec ses symboles introduits par les Indiens, modifiés et complétés par les Arabes. Notre système décimal actuel est le résultat de cette évolution et des moyens mis en œuvre pour lui donner des formes adaptées à l'expression écrite et orale et aux méthodes de calcul.

Si le système décimal est celui de l'immense majorité des hommes, il ne faut pas oublier que d'autres sont toujours utilisés, tel le système sexagésimal (base 60) pour exprimer les mesures du temps, tout comme celles des arcs et des angles. L'origine du système

sexagésimal remonte aux Sumériens. Au cours de l'histoire, on trouve aussi souvent le nombre 12 à la base de nombreux systèmes de comptage et de mesure, par exemple dans la division du jour en heures.

Parallèlement à cette évolution des signes, chiffres, calculs mentaux et manuels, on assistait au développement d'outils, de systèmes, de machines pour simplifier et accélérer les calculs nécessaires, par exemple pour garder la trace des transactions commerciales ou des cycles astraux et pour faire face aux besoins croissants des paysans, de l'armée et d'une société en pleine évolution.

1.2 Développement historique et conceptuel

Il y a 2 000 ans, les civilisations méditerranéennes utilisaient l'abaque pour leurs calculs. Bien avant l'ère chrétienne, les Chinois comptaient à l'aide de bouliers et dans certains pays (Russie, Chine, Japon, etc.) on en trouve encore plusieurs sortes couramment utilisées dans les commerces, les banques, etc. Mais il fallut attendre le XVII^e siècle, époque de grandes effervescences intellectuelles, pour voir apparaître des systèmes de calcul plus rapides et plus automatiques. Les débuts furent lents et difficiles.

La numération romaine, utilisée en Europe pendant le premier millénaire de notre ère, n'était pas une numération positionnelle; c'est-à-dire que la position des chiffres dans la représentation d'un nombre n'était pas associée à des poids implicites (unités, dizaines, centaines, etc.) permettant une écriture des nombres plus compacte (MDCCCLXXIII = 1873) et une grande simplification des calculs. Les Romains ne connaissaient pas le zéro! L'étonnante idée du zéro vint à l'esprit des Indiens et des Arabes quelques siècles après Jésus-Christ. Le chiffre zéro fit son apparition en Europe dans un manuscrit célèbre sur les chiffres indiens, écrit par le mathématicien Al-Khwarizmi vers l'an 820 après J.-C. (les savants de Babylone connaissaient apparemment une numération en base 60, positionnelle, avec le chiffre zéro, déjà au III^e siècle avant J.-C.). Les chiffres arabes sont adoptés en Europe au cours du XI^e siècle, mais il faut attendre le milieu du XVI^e siècle pour voir des ouvrages traitant de méthodes arithmétiques.

Au Moyen Âge, la culture était l'affaire des moines et la diffusion de l'arithmétique était limitée à quelques privilégiés ayant accès aux rares traités de l'époque. Les besoins en calcul augmentant sans cesse, des sociétés secrètes se chargeaient de résoudre les problèmes de comptabilité des commerçants. À l'aube du XVII^e siècle, des savants commencèrent à s'intéresser aux systèmes d'aide au calcul.

En 1614, le mathématicien écossais **John Neper** présente sa théorie des logarithmes. Les tables de Neper, qui transformaient des multiplications compliquées en de simples additions, donnèrent naissance à la règle à calcul, un outil pratique et efficace créé en 1620. Neper inventa aussi un système non logarithmique (pour simplifier les multiplications) basé sur le simple déplacement de tiges (Bâtons ou Os de Neper). En 1623, **Wilhelm Schickard** construit à Tuebingen en Allemagne, la première machine à

calculer en appliquant le principe du déplacement de tiges développé par Neper. Sa machine se perd au cours de la guerre de Trente Ans ; de ce fait, on ne sait pas exactement si, et éventuellement de quelle manière elle fonctionnait. Les quelques dessins qui nous sont parvenus semblent prouver que Schickard avait utilisé des roues chiffrées et s'était attaqué au problème de la retenue. Bien que le principe des roues dentées et autres engrenages fût connu depuis des siècles (astrolabes, horloges des églises, etc.), les techniques de construction étaient primitives et la fiabilité résultante assez modeste. Schickard se plaint d'ailleurs de ses problèmes de mécanique dans ses lettres à Kepler, où l'on trouve de précieuses indications sur la conception de sa machine. À partir de ses dessins, une réplique de la machine, améliorée pour être fonctionnelle, fut construite en 1971.

En 1642, à Paris, **Pascal** présente une machine qui peut additionner et même soustraire des nombres de six chiffres. En dix ans, il en construit plus de cinquante versions dont certaines peuvent calculer avec huit chiffres. Des exemplaires sont conservés à Paris. Son système est basé sur une série de roues dentées figurant les colonnes décimales. Le problème de la retenue est résolu de la manière suivante : chaque roue peut dépasser le chiffre 9 en effectuant une rotation complète et en décalant d'un cran la roue immédiatement supérieure. Pascal a réalisé sa première machine, la Pascaline, alors qu'il n'avait que 19 ans.

La machine de Pascal pouvait en principe exécuter des opérations plus complexes, telle la multiplication, par des méthodes compliquées d'additions répétitives. Mais il faudra attendre 1673 pour voir apparaître une calculatrice capable d'exécuter automatiquement les quatre opérations arithmétiques. Ce sera l'œuvre d'un génie allemand, **Leibniz**, qui ajoutera aux mécanismes de la Pascaline un chariot mobile et une manivelle permettant d'accélérer et d'automatiser l'exécution des additions et des soustractions répétitives exigées par les multiplications et les divisions. Les principes des machines de Pascal et de Leibniz seront adoptés dans la conception des machines à calculer pendant près de trois siècles !

Leibniz, qui avec Newton est à l'origine du calcul différentiel et intégral, inventa aussi le système binaire sous sa forme moderne (des numérations base 2 existaient déjà en Chine dans l'Antiquité) avec ses deux chiffres 0 et 1, et souligna la puissance et la simplicité de l'arithmétique binaire, qui sera finalement adoptée par la plupart des ordinateurs contemporains. Des exemples de numérations utilisées au cours de l'histoire sont résumés dans la table 1.1.

On peut à juste titre considérer le XVII^e siècle comme un tournant dans le développement de la connaissance scientifique. Des géants tels **Galilée**, **Newton** et **Leibniz** sont à l'origine d'une véritable révolution intellectuelle qui propulsa l'Europe au premier plan dans le développement des mathématiques et dans leur application aux sciences naturelles, dépassant ainsi les Arabes, les Indiens et les Chinois. C'est au XVII^e siècle qu'on a conceptualisé les bases de la science moderne et c'est là qu'on trouve les racines de ce grand développement d'idées qui conduira à l'ordinateur.

Table 1.1 : Différents systèmes de comptage

BASE 1	: comptage avec les doigts, cailloux, entailles
BASE 2	: système binaire : logique symbolique, ordinateurs
BASE 5	: système quinaire : Aztèques
BASE 7	: notes musicales, jours de la semaine
BASE 8	: système octal : premiers ordinateurs
BASE 10	: système décimal : adopté par l'Homme
BASE 12	: gamme des notes et demi-tons ; monnaie et mesures anglaises ; mois ; heures (2 fois 12)
BASE 16	: système hexadécimal : ordinateurs
BASE 20	: comptage sur les doigts des mains et des pieds ; Mayas
BASE 24	: heures du jour
BASE 60	: degrés, minutes et secondes ; angles ; savants de Babylone

1.3 Progrès au XIX^e siècle

En 1728, le mécanicien français **Falcon** construit une commande pour métier à tisser à l'aide d'une planchette en bois munie de trous. C'est la première machine capable d'exécuter un programme externe. En 1805, **Joseph Jacquard** perfectionne le système de Falcon en remplaçant les planches en bois par des cartons troués articulés (les premières cartes perforées), qu'on peut encore voir de nos jours dans certains orgues de manège. Le système à bande de programmation de Jacquard permet de produire les dessins les plus compliqués en grande quantité et de qualité toujours égale. Il s'agit du premier pas de la révolution industrielle, mais aussi d'une étape très importante vers l'exécution automatique des calculs les plus complexes.

Au milieu du XIX^e siècle, on s'approche conceptuellement et matériellement de l'ordinateur grâce aux idées et au travail exceptionnel d'un mathématicien anglais : **Charles Babbage**, considéré comme le grand-père de l'ordinateur pour avoir fait le rapprochement entre les machines à calculer et les systèmes de commande automatique de Jacquard.

De 1822 à 1832, Babbage est totalement absorbé par la conception d'une machine capable de calculer et d'imprimer des tables numériques selon la méthode des différences. Il construit un prototype, basé sur des roues dentées glissant sur des arbres actionnés par une manivelle. Avec l'aide de l'État et le soutien de la Royal Society, il entreprend la construction d'un modèle utilisable. Il se heurte alors à des problèmes techniques et son projet prend du retard. Après dix ans de travail acharné, les subventions sont suspendues et il doit abandonner sa machine à différences.

En 1833, Babbage se lance dans la réalisation d'une machine encore plus ambitieuse, la machine analytique. Elle était conçue pour faire des séquences d'opérations arithmétiques en fonction d'instructions données par l'utilisateur. Ce serait donc une

machine aux applications les plus variées : le premier calculateur programmable! On trouve dans sa machine analytique des idées très avancées pour l'époque, qui seront adoptées ou réinventées par les constructeurs d'ordinateurs une centaine d'années plus tard, comme la notion de processeur, de mémoire, de programme ou de techniques d'entrées/sorties par cartes perforées.

Babbage pouvait compter sur l'aide et le soutien d'un autre personnage de son temps, **Ada Augusta** comtesse de Lovelace (fille du célèbre poète anglais Lord Byron) qui laissa à la postérité des dessins et des descriptions de la machine analytique. Elle laissa aussi des programmes qui constituent une véritable première dans l'histoire de l'ordinateur. Malheureusement ces programmes ne seront jamais exécutés.

La machine de Babbage était probablement irréalisable avec les techniques et les outils de son temps. Elle devait fonctionner comme une locomotive à vapeur et était beaucoup trop complexe et ambitieuse. Elle ne sera jamais complétée. Babbage passa sa vie sur ce projet et y dépensa toute sa fortune. Il ne nous reste que des centaines de dessins et plans ainsi que quelques parties nous montrant quelles difficultés Babbage avait rencontrées dans la réalisation de son invention. Sa machine à différences devait connaître un meilleur sort. Reprise en main par un inventeur suédois, P.G. Scheutz, une version réduite sera réalisée avec l'aide de Babbage et présentée à Londres en 1854.

C'est précisément en 1854 qu'un mathématicien anglais, **George Boole**, publie un essai, intitulé *Une étude des lois de la pensée*, dans lequel il expose ses idées sur la formulation mathématique des propositions logiques. Reprenant les spéculations de Leibniz, Boole conçoit un système de logique symbolique, appelé algèbre booléenne qui révolutionnera la science de la logique. Un siècle plus tard, ses formules appliquées au système de numération binaire rendront possible l'ordinateur numérique électronique.

Avant la fin du XIX^e siècle, l'Américain **Hermann Hollerith** construit un calculateur de statistiques fonctionnant avec des cartes perforées pour accélérer le traitement des données du recensement américain de 1890. Inspiré par les travaux de Babbage et par les applications des cartons troués dans la commande des métiers à tisser, il perfectionne la carte perforée et un système de codage des informations qui porte son nom. La carte de Hollerith comprenait douze rangées de vingt positions à perforer pour figurer les données du recensement de la population des États-Unis (âge, profession, situation de famille, etc.).

Une fois perforées, les cartes étaient placées dans des lecteurs qui détectaient les trous. Ceci à l'aide d'aiguilles qui traversaient les trous et établissaient un circuit électrique en trempant dans des petits pots de mercure placés de l'autre côté de la carte. Le système de Hollerith était si rapide qu'un premier décompte fut établi en quelques semaines et une analyse statistique complète en deux ans et demi. La population était passée en dix ans de 50 à 63 millions d'individus, mais le recensement de 1890 avait été fait en trois fois moins de temps qu'en 1880! Hollerith fonda la *Tabulating Machines Company* pour produire ses systèmes à cartes perforées. Sa compagnie rencontra un succès de longue durée. En 1924, cinq ans avant la mort de son fondateur, elle devint l'*International Business Machines Corporation*, ou IBM.

Dans le même temps, les premières machines analogiques utilisées pour effectuer des calculs mathématiques sont inventées comme le calculateur de marées par Lord Kelvin en 1872. Sa machine utilise des roues avec des chevilles décentrées pour produire un mouvement sinusoïdal et une corde glissant sur des poulies pour additionner les différentes harmoniques.

I.4 XX^e siècle

Les machines à cartes perforées continuent à se développer pendant la première moitié du siècle. Durant cette période, on assiste aussi à la naissance d'une véritable industrie des calculatrices de table.

Les machines analogiques sont développées pour des applications de calcul scientifique : calculateur de tir, analyse harmonique, mécanique des fluides... Dès 1930, on voit apparaître des machines analogiques mixant pièces mécaniques et signaux électriques pour représenter les fonctions mathématiques. Parmi les pionniers du calcul analogique, il faut citer **Vannevar Bush** qui construisit au MIT un analyseur différentiel capable d'aider à la résolution d'équations différentielles complexes. Il s'agissait d'une machine énorme, assez rudimentaire et d'utilisation difficile. D'autres machines de ce type suivront et seront utilisées jusqu'aux années soixante.

Les années trente sont riches en développements et il faut souligner les contributions fondamentales de Shannon et Turing. Dans sa thèse publiée au MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) en 1938, **Claude Shannon**, reprenant les idées de Leibniz et de Boole, fit le rapprochement entre les nombres binaires, l'algèbre booléenne et les circuits électriques. Dix ans plus tard, il publiera une théorie mathématique de la communication qui expose ce que l'on appelle aujourd'hui la **théorie de l'information**. Shannon prouva que les chiffres binaires conviennent également pour les relations logiques et que tous les calculs logiques et arithmétiques peuvent être réalisés à l'aide des trois opérations logiques de base : ET, OU et NON. Ses brillantes conceptions influencèrent le développement des télécommunications ainsi que celui des ordinateurs.

Alan Turing, jeune théoricien de l'université de Cambridge, publie en 1936 son essai fondamental, *A propos des nombres calculables*, où il traite de problèmes théoriquement impossibles à résoudre. Il énonce le principe d'une machine universelle, purement imaginaire, la **Machine de Turing**, qui préfigure les caractéristiques de l'ordinateur moderne. Ses idées étaient directement applicables à la logique mathématique, mais Turing cherchait à établir une description rigoureuse de toute opération mentale. Il traitera aussi de l'art de programmer. L'évolution de sa pensée et l'entrée en guerre de son pays l'amèneront à s'occuper de la conception effective de machines contribuant au décryptage des communications allemandes.

Vers la fin des années trente, d'autres chercheurs parvinrent à la conclusion que la logique booléenne pouvait être employée efficacement dans la conception des

calculateurs. L'adoption du système binaire au lieu du décimal était aussi dans l'esprit de certains pionniers. **Konrad Zuse** à Berlin, **John Atanasoff** à l'université de l'État de Iowa et **George Stibitz** aux Laboratoires Bell, travaillant indépendamment, construisirent des prototypes de machines binaires. Dès 1936, Zuse fabrique avec des moyens très modestes des machines électromécaniques, qu'il appelle Z1 et Z2, fonctionnant selon le système binaire. En 1938, il propose la construction d'un calculateur électronique comportant 1 500 tubes à vide, mais le gouvernement allemand juge le projet irréalisable. Zuse construit alors un calculateur binaire universel avec 2 600 relais de téléphone, le Z3. Les programmes sont introduits au moyen d'un film vidéo perforé. Une multiplication dure environ 5 secondes. Le Z3 sera terminé en 1941 et, comme d'ailleurs son successeur le Z4, sera effectivement utilisé pour résoudre des problèmes de conception aéronautique et de missiles.

Parmi les derniers précurseurs de l'ordinateur il faut citer Mark 1, une énorme machine électromécanique construite entre 1939 et 1944 par IBM et l'université de Harvard, sous la direction de **Howard Aiken**. Ce calculateur, capable de multiplier deux nombres de 23 chiffres décimaux en 6 secondes et d'effectuer des additions ou soustractions en trois dixièmes de seconde, était conçu sur la base du système décimal. Avec ses milliers de roulements à billes et ses 760 000 pièces électromécaniques, le Mark 1 était une sorte de machine analytique du XX^e siècle; en fait, il se révéla obsolète avant même d'être terminé.

I.5 Naissance de l'ordinateur : 1945

Toutes les prototypes de la période 1935-1945 recevaient les instructions à l'aide de cartes, bandes ou films perforés et pouvaient faire des opérations arithmétiques en quelques secondes. Elles réalisaient les idées de Babbage un siècle après ses efforts. La Z3 avait été la première à fonctionner en 1941 avec trois ans d'avance sur les machines américaines de Stibitz et Aiken. On pouvait faire des calculs complexes dix fois plus vite qu'avec des calculatrices de table. Mais la gloire de ces machines électromécaniques sera de courte durée. L'ère de l'électronique allait commencer.

C'est en 1945 que **John Presper Eckert** et **John Mauchly** terminent à l'université de Pennsylvanie la construction de l'ENIAC (*Electronic Numerical Integrator And Computer*), machine universelle, programmable, numérique, basée sur le système décimal et entièrement électronique. Avec ses 18 000 tubes et ses 30 tonnes, l'ENIAC pouvait multiplier deux nombres de 10 chiffres en 3 millisecondes! C'était la fin des calculatrices électromécaniques dépassées par une technologie mille fois plus rapide.

L'ENIAC fonctionnait convenablement, traitant des millions de cartes perforées au cours de ses premiers essais. Mais l'inconvénient résidait dans la difficulté de modifier ses programmes. La mémoire interne était très petite et les programmes étaient câblés sur des fiches électriques interchangeables; il n'était pas possible de les enregistrer sur un support extérieur. Pour passer d'un calcul à l'autre, il fallait brancher et débrancher des centaines de câbles (il sera même modifié en 1948 pour intégrer son programme

dans une mémoire non-modifiable). Pour cette raison l'ENIAC, bien qu'étant le premier calculateur électronique, n'est pas toujours considéré comme le premier ordinateur, selon le sens donné aujourd'hui à ce terme.

Avant la fin de 1945, **John von Neumann**, un mathématicien d'origine hongroise, associé comme consultant au projet ENIAC, franchit le dernier obstacle et proposa la construction de l'EDVAC (*Electronic Discrete Variable Automatic Computer*), machine modèle de l'ordinateur tel qu'on le conçoit à présent. Il accomplit une abstraction géniale du système de commande de la machine, en proposant d'enregistrer le programme en mémoire. La machine gagne ainsi en souplesse et en vitesse. Instructions et données sont stockées dans la mémoire même de la machine. Le programme peut décider quels calculs exécuter, quel chemin choisir pour la suite des opérations, sur la base des résultats intermédiaires. Le déroulement du programme peut être commandé par des décisions logiques, ce qui permet des sauts et des branchements conditionnels dans le programme. L'ordinateur est né.

On peut ainsi résumer les caractéristiques de l'ordinateur selon von Neumann :

- une machine **universelle** contrôlée par **programme** ;
- les instructions du programme sont codées sous forme numérique (binaire) et **enregistrées en mémoire** ;
- le programme peut modifier ses propres instructions, qui sont normalement **exécutées en séquence** ;
- des instructions existent permettant les **ruptures de séquence**.

Dans une communication qui fera date, von Neumann décrit en 1945 les cinq composants essentiels de ce qui allait désormais être appelé l'**architecture de von Neumann** :

- l'**unité arithmétique et logique (UAL)** ;
- l'**unité de commande** ;
- la **mémoire centrale** ;
- l'**unité d'entrée** ;
- l'**unité de sortie**.

Von Neumann fait aussi remarquer qu'un tel système, pour être vraiment efficace et performant, doit fonctionner électroniquement et selon la numération binaire. Les principes de von Neumann guideront la conception des ordinateurs jusqu'à nos jours.

De 1945 à 1950, on construit des prototypes partout, aux États-Unis comme en Europe. Paradoxalement, ce ne sera pas von Neumann qui réalisera, le premier, une machine selon ses principes. L'EDVAC prend du retard à cause de querelles entre les protagonistes de cette grande réalisation, notamment Eckert, Mauchly, Goldstine et von Neumann. Querelles de conception mais aussi querelles de brevets et de paternité de l'invention. Les premiers ordinateurs obéissants aux principes dictés par von Neumann seront achevés par des scientifiques britanniques, avec deux ans d'avance sur l'EDVAC. **Kilburn, Williams et Tootill** construiront le **SSEM** à Manchester tandis que **Maurice Wilkes**, à Cambridge, réalisera l'**EDSAC** (*Electronic Delay Storage Automatic*