

Architecture des machines et des systèmes informatiques

Alain Cazes

Ancien maître de conférences en informatique
au Conservatoire national des Arts et Métiers

Joëlle Delacroix

Maître de conférences en informatique
au Conservatoire national des Arts et Métiers

6^e édition

DUNOD

Illustration de couverture : Fotolia

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	 DANGER LE PHOTOCOPIAGE TUE LE LIVRE	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, 2003, 2005, 2008, 2011, 2015, 2018

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-078008-2

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

CHAPITRE 1 • STRUCTURE GÉNÉRALE ET FONCTIONNEMENT D'UN ORDINATEUR	1
1.1 Introduction	1
1.2 Structure et fonctionnement d'un ordinateur	3
1.2.1 Structure générale d'un ordinateur	3
1.2.2 La mémoire centrale	4
1.2.3 Le bus de communication	8
1.2.4 Le processeur central ou microprocesseur	10
1.3 Fonctionnement : relation microprocesseur / mémoire centrale	13
1.4 Un exemple	15
1.4.1 Le problème	15
1.4.2 L'ordinateur	15
1.4.3 Le langage machine	15
1.5 Les unités d'échanges	16
1.6 Conclusion	17

PARTIE 1 • PRODUCTION DE PROGRAMMES

CHAPITRE 2 • DU PROBLÈME AU PROGRAMME MACHINE	23
2.1 Du problème au programme	23
2.1.1 Rappel du rôle d'un ordinateur	23
2.1.2 Problème, algorithme, programme et instructions	25
2.2 Les différents niveaux de langage de l'ordinateur	26
2.2.1 Langage machine	27

2.2.2	Langage d'assemblage	28
2.2.3	Langage de haut niveau ou évolué	29
2.3	Introduction à la chaîne de production de programmes	30
2.4	Un exemple	31
2.5	Conclusion	33
 CHAPITRE 3 • LA CHAÎNE DE PRODUCTION DE PROGRAMMES		 35
3.1	La compilation	36
3.1.1	Grammaire et structure d'un langage de haut niveau	36
3.1.2	Analyse lexicale	38
3.1.3	Analyse syntaxique	40
3.1.4	Analyse sémantique	42
3.1.5	Génération du code final	44
3.2	L'édition des liens	46
3.2.1	Rôle de l'éditeur de liens	46
3.2.2	Fonctionnement de l'éditeur de liens	47
3.3	Le chargement	60
3.3.1	Rôle du chargeur	60
3.3.2	Chargement et édition des liens dynamique	61
3.4	Le préprocesseur	62
3.4.1	La directive <code>#include</code>	62
3.4.2	La directive <code>#define</code>	63
3.4.3	La compilation conditionnelle	63
3.4.4	Un exemple	63
3.5	L'utilitaire Make	64
3.5.1	Format du fichier Makefile	65
3.5.2	Fonctionnement de l'utilitaire Make	66
3.6	Compilateur, interpréteur et machine virtuelle	66
3.7	Conclusion	68
3.8	Qu'avez-vous retenu ?	68
 CHAPITRE 4 • LE LANGAGE MACHINE ET LA REPRÉSENTATION DES INFORMATIONS		 71
4.1	La représentation des informations	71
4.1.1	Numération binaire, octale et hexadécimale	72
4.1.2	Représentation des nombres signés	75
4.1.3	Représentation des nombres flottants	79
4.1.4	Représentation des caractères	82
4.2	Les instructions machine	85

4.2.1	Les différents types d'instructions	85
4.2.2	Les différents types d'opérandes	86
4.2.3	Un exemple	87
4.3	Les instructions du langage d'assemblage	90
4.3.1	Format d'une instruction du langage d'assemblage	90
4.3.2	Fonctionnement de l'assembleur	92
4.4	Exemples de programmes en langage d'assemblage	94
4.4.1	Spécification d'un langage d'assemblage	94
4.4.2	Quelques exemples	99
4.5	Conclusion	102
4.6	Qu'avez-vous retenu ?	102
 CHAPITRE 5 • LES CIRCUITS LOGIQUES		 105
5.1	Les circuits logiques	105
5.1.1	Définition	105
5.1.2	Les circuits combinatoires	106
5.1.3	Les circuits séquentiels	114
5.1.4	Technologie des circuits logiques	116
5.2	Le futur...	122
 CHAPITRE 6 • EXERCICES CORRIGÉS		 125
Production de programmes		125
6.1	Compilation	125
6.2	Édition des liens	127
6.3	Utilitaire Make	128
6.4	Compilation	128
6.5	Préprocesseur	129
Représentation des informations		130
6.6	Conversions	130
6.7	Représentation des nombres signés	130
6.8	Représentation des nombres flottants	131
6.9	Synthèse	131
Langage machine		131
6.10	Manipulation des modes d'adressage	131
6.11	Programme assembleur	132
6.12	Manipulation de la pile	132
6.13	Programme assembleur	133
6.14	Programme assembleur	133
6.15	Langage d'assemblage	134
 SOLUTIONS		 136

PARTIE 2 • STRUCTURE DE L'ORDINATEUR

CHAPITRE 7 • LA FONCTION D'EXÉCUTION	149
7.1 Introduction	149
7.2 Aspects externes	152
7.2.1 Le microprocesseur	152
7.2.2 Les bus	154
7.3 Aspects internes	156
7.3.1 Exécution d'une instruction machine	157
7.3.2 Microcommandes et micro-instructions	165
7.4 Les interruptions : modification du flux d'exécution d'un programme machine	174
7.4.1 Principe des interruptions	174
7.4.2 Un exemple	178
7.5 Amélioration des performances	182
7.5.1 Parallélisme des instructions	183
7.5.2 Parallélisme des processeurs	188
7.6 Conclusion	189
7.7 Qu'avez-vous retenu ?	190
CHAPITRE 8 • LA FONCTION DE MÉMORISATION	193
8.1 Généralités	193
8.2 Mémoires de travail	196
8.2.1 Les mémoires vives	196
8.2.2 Les mémoires mortes	206
8.2.3 Les registres	206
8.3 Mémoires de stockage : le disque magnétique	208
8.3.1 Caractéristiques générales	208
8.3.2 Organisation générale	208
8.3.3 Le disque SSD (<i>Solid-State Drive</i>)	211
8.4 Amélioration des performances	211
8.4.1 Les mémoires caches	211
8.4.2 Mémoire virtuelle	222
8.5 Compléments : approches CISC/RISC	225
8.5.1 Les performances d'un processeur	226
8.5.2 La traduction des programmes	227
8.5.3 Approche CISC	227
8.5.4 Approche RISC	228
8.5.5 Pour conclure sur les RISC et les CISC	229

8.6	Compléments : approches multicœurs	230
8.7	Conclusion	232
8.8	Qu'avez-vous retenu ?	233
 CHAPITRE 9 • LA FONCTION DE COMMUNICATION		 235
9.1	Introduction	235
9.2	Les bus	240
9.2.1	Les bus ISA (ou PC-AT), MCA et EISA	241
9.2.2	Le bus PCI (<i>Peripheral Component Interconnect</i>)	242
9.2.3	Le bus AGP (<i>Accelerated Graphics Port</i>)	246
9.2.4	Deux exemples	247
9.3	Les interfaces d'accès aux périphériques	248
9.3.1	Les unités d'échanges	249
9.3.2	Les bus d'extension	262
9.4	Les différents modèles de gestion des entrées-sorties	266
9.4.1	La liaison programmée	267
9.4.2	Entrées-sorties pilotées par les interruptions	269
9.4.3	Gestion des entrées-sorties asynchrones	271
9.5	Conclusion	274
 CHAPITRE 10 • EXERCICES CORRIGÉS		 275
La fonction d'exécution		275
10.1	Révision	275
10.2	Microcommandes	275
10.3	CISC/RISC	276
La fonction de mémorisation		277
10.4	Cache à correspondance directe	277
10.5	Calcul de la taille réelle d'un cache	277
10.6	Cache associatif et remplacement de lignes	277
10.7	Cache à correspondance directe	278
10.8	Cache à correspondance directe	278
La fonction de communication		279
10.9	Questions de cours	279
10.10	Entrées-sorties programmées et entrées-sorties par interruption	279
10.11	Performances des opérations d'entrées-sorties	279
10.12	Gestion des interruptions	280

Synthèse	281
10.13 Exercice de synthèse n° 1	281
10.14 Exercice de synthèse n° 2	283

SOLUTIONS	285
------------------	-----

PARTIE 3 • LES SYSTÈMES D'EXPLOITATION

CHAPITRE 11 • INTRODUCTION AUX SYSTÈMES D'EXPLOITATION MULTIPROGRAMMÉS	299
---	-----

11.1 Rôle et définition d'un système d'exploitation multiprogrammé	299
11.1.1 Un premier rôle : assurer le partage de la machine physique	301
11.1.2 Un second rôle : rendre conviviale la machine physique	301
11.1.3 Définition du système d'exploitation multiprogrammé	302
11.2 Structure d'un système d'exploitation multiprogrammé	303
11.2.1 Composants d'un système d'exploitation	303
11.2.2 La norme POSIX pour les systèmes ouverts	305
11.3 Principaux types de systèmes d'exploitations multiprogrammés	305
11.3.1 Les systèmes à traitements par lots	306
11.3.2 Les systèmes interactifs	308
11.3.3 Les systèmes temps réel	309
11.3.4 Les systèmes mobiles	310
11.3.5 Virtualisation de systèmes	311
11.4 Notions de base	311
11.4.1 Modes d'exécutions et commutations de contexte	311
11.4.2 Gestion des interruptions matérielles et logicielles	313
11.4.3 Langage de commande	317
11.5 Génération et chargement d'un système d'exploitation	320
11.5.1 Génération d'un système d'exploitation	320
11.5.2 Chargement d'un système d'exploitation	321
11.6 Conclusion	321
11.7 Qu'avez-vous retenu ?	322

CHAPITRE 12 • GESTION DE L'EXÉCUTION DES PROGRAMMES : LE PROCESSUS	325
---	-----

12.1 Notion de processus	325
12.1.1 Définitions	325
12.1.2 États d'un processus	326
12.1.3 Bloc de contrôle du processus	327
12.1.4 Opérations sur les processus	328
12.1.5 Un exemple de processus : les processus Unix	329
12.1.6 Programmation de processus?: l'exemple de LINUX	332
12.1.7 Langage de commandes Processus : l'exemple de Linux	337

12.2 Ordonnancement sur l'unité centrale	340
12.2.1 Ordonnancement préemptif et non préemptif	340
12.2.2 Entités systèmes responsable de l'ordonnancement	342
12.2.3 Politiques d'ordonnancement	342
12.2.4 Exemples	347
12.3 Synchronisation et communication entre processus	349
12.3.1 L'exclusion mutuelle	351
12.3.2 Le schéma de l'allocation de ressources	354
12.3.3 Le schéma lecteurs-rédacteurs	360
12.3.4 Le schéma producteur-consommateur	362
12.4 Complément : notion de processus léger ou thread	363
12.4.1 Notion de thread	363
12.4.2 Exemple sous Linux	364
12.4.3 Exemple sous Windows	366
12.5 Conclusion	367
12.6 Qu'avez-vous retenu ?	368
 CHAPITRE 13 • GESTION DE LA MÉMOIRE CENTRALE	 371
13.1 Mémoire physique et mémoire logique	371
13.2 Allocation de la mémoire physique	373
13.2.1 Allocation contiguë de la mémoire physique	373
13.2.2 Allocation non contiguë de la mémoire physique	379
13.3 Mémoire virtuelle	392
13.3.1 Principe de la mémoire virtuelle	392
13.3.2 Le défaut de page	395
13.3.3 Le remplacement de pages	397
13.3.4 Performance	400
13.3.5 Exemples	401
13.3.6 Notion d'écroulement	404
13.4 Swapping des processus	405
13.5 Conclusion	406
13.6 Qu'avez-vous retenu ?	407
 CHAPITRE 14 • SYSTÈME DE GESTION DE FICHIERS	 409
14.1 Le fichier logique	409
14.1.1 Définition	409
14.1.2 Les modes d'accès	410
14.1.3 Exemples	412
14.2 Le fichier physique	415

14.2.1	Structure du disque dur	415
14.2.2	Méthodes d'allocation de la mémoire secondaire	416
14.3	Correspondance fichier logique-fichier physique	427
14.3.1	Notion de répertoire	427
14.3.2	Réalisation des opérations	435
14.4	Protection	443
14.4.1	Protection contre les accès inappropriés	444
14.4.2	Protection contre les dégâts physiques	446
14.5	Conclusion	451
14.6	Qu'avez-vous retenu ?	453
CHAPITRE 15 • INTRODUCTION AUX RÉSEAUX		455
15.1	Définition	455
15.2	Les réseaux filaires	457
15.2.1	Architecture des réseaux filaires	457
15.2.2	Circulation des informations	465
15.2.3	Exemple de réseau filaire	468
15.3	Les réseaux sans fil	471
15.3.1	Architecture des réseaux sans fil	472
15.3.2	Circulation des informations	474
15.3.3	Exemples de réseaux sans fil	479
15.4	L'interconnexion de réseaux : Internet	481
15.4.1	Architecture de l'Internet	481
15.4.2	Circulation de l'information	482
15.5	Conclusion	485
15.6	Qu'avez-vous retenu ?	485
CHAPITRE 16 • INTRODUCTION À LA SÉCURITÉ DES SYSTÈMES INFORMATIQUES		487
16.1	Authentification	488
16.2	Intrusions et logiciels malveillants	489
16.2.1	Les logiciels malveillants	489
16.2.2	Dispositifs de protection	490
16.3	Disponibilité et pérennité	494
16.4	Conclusion	496
16.5	Qu'avez-vous retenu ?	498
CHAPITRE 17 • EXERCICES CORRIGÉS		501
Ordonnancement de processus		501

17.1	Algorithmes d'ordonnancement	501
17.2	Ordonnancement par priorité préemptif et non préemptif	501
17.3	Chronogramme d'exécutions	502
17.4	Ordonnancement sous Unix	502
17.5	Ordonnancement sous Linux	503
Synchronisation de processus		504
17.6	Producteur(s)-Consommateurs(s)	504
17.7	Allocations de ressources et interblocage	505
17.8	Allocation de ressources et états des processus	506
17.9	Allocation de ressources	506
17.10	Interblocage	507
17.11	Exclusion mutuelle	507
17.12	Processus léger	508
Gestion de la mémoire centrale		509
17.13	Gestion de la mémoire par partitions variables	509
17.14	Remplacement de pages	509
17.15	Mémoire paginée et segmentée	509
17.16	Mémoire virtuelle et ordonnancement de processus	510
17.17	Pagination à la demande	511
Système de gestion de fichiers		512
17.18	Modes d'accès	512
17.19	Organisation de fichiers	512
17.20	Noms de fichiers et droits d'accès	512
17.21	Algorithmes de services des requêtes disque	513
17.22	Fichiers Unix	513
17.23	Système de gestion de fichiers FAT	513
17.24	Système de gestion Unix	514
17.25	Allocation par zones	514
17.26	Synthèse	515
SOLUTIONS		517
INDEX		539

Chapitre 1

Structure générale et fonctionnement d'un ordinateur

Dans cette partie introductive nous rappelons quelques éléments fondamentaux concernant la programmation et l'algorithmique afin de présenter le vocabulaire utilisé. Il ne s'agit en aucune manière de se substituer à un cours d'algorithmique mais uniquement de replacer du vocabulaire du point de vue de la structure générale d'un ordinateur, l'objectif étant de mettre en évidence les différentes phases qui interviennent dans la résolution d'un problème avec un ordinateur. Après cette partie introductive nous présentons les principaux modules constituant l'architecture d'un ordinateur type. Nous faisons un tour d'horizon des fonctionnalités de chacun de ces modules et de leurs relations fonctionnelles. Il s'agit ici uniquement de présenter de manière globale le fonctionnement de l'ordinateur.

1.1 INTRODUCTION

Le rôle de l'informatique est de résoudre des problèmes à l'aide d'un ordinateur. Un problème s'exprime sous la forme d'un énoncé qui spécifie les fonctions que l'on souhaite réaliser. Par exemple définir toutes les fonctions d'un traitement de texte. Pour résoudre un problème les informaticiens utilisent la notion d'*algorithme*.

Pour illustrer cette notion, prenons l'exemple du problème suivant : *confectionner* une omelette avec 6 œufs.

Trouver une solution à ce problème repose sur l'existence d'un *processeur* sachant exécuter une *instruction* (*confectionner*). En général un adulte saura exécuter l'instruction confectionner, c'est-à-dire connaîtra le sens du mot, et sera capable de faire toutes les actions nécessaires permettant de résoudre le problème. On dira alors que l'adulte est un *bon processeur* au sens où il saura *exécuter* l'instruction *confectionner* portant sur la *donnée* œufs. Par contre un enfant pourra ne pas connaître le mot confectionner : il ne saura pas faire les opérations nécessaires et ne pourra donc pas résoudre le problème posé (faire une omelette). L'enfant connaît d'autres instructions, sait exécuter d'autres actions que confectionner, et pour qu'il puisse résoudre le problème il faudra l'exprimer autrement, sur la base des actions, *instructions*, qu'il est *capable* d'exécuter. Pour que l'enfant puisse résoudre le problème on pourra l'exprimer sous la forme d'une séquence d'instructions appartenant au *langage* de l'enfant. Par exemple on pourra exprimer le problème, la solution, sous la forme de la séquence des instructions suivantes :

1. *casser 6 œufs* dans un bol;
2. *battre* les œufs avec un fouet;
3. *saler, poivrer*;
4. *placer* la *poêle* sur le gaz;
5. *allumer* le gaz;
6. *cuisiner* les œufs;
7. *éteindre* le gaz.

Dans cet exemple, le processeur enfant sait exécuter des instructions (casser, battre, saler, poivrer, allumer, cuisiner...). De plus il connaît les objets à manipuler (œufs, gaz, poêle...). On dit alors que le processeur enfant est un bon processeur pour exécuter l'algorithme représenté par la séquence précédente puisque l'enfant est capable d'exécuter cette séquence d'instructions. Cette séquence d'instructions exécutables par le processeur enfant est une solution du problème posé pour ce processeur.

Un algorithme peut donc se définir comme une séquence d'instructions exécutables par un processeur déterminé. Cette séquence d'instructions, cet algorithme, est une solution au problème posé.

De ce petit exemple nous pouvons tirer quelques conclusions :

- un algorithme est une solution à un problème posé;
- un algorithme est une séquence d'instructions exécutables par un processeur;
- un algorithme est un programme exécutable par un processeur déterminé;
- un algorithme n'a de sens que pour un processeur déterminé.

Les instructions expriment les actions que peut exécuter un processeur, elles sont codées à partir d'un alphabet (dans notre cas l'alphabet habituel). Les instructions manipulent des données (œufs, sel, poivre, gaz, poêle...). Un processeur (ou machine virtuelle) est une entité capable d'exécuter des instructions portant sur des données. L'ensemble des instructions que le processeur (la machine virtuelle) peut manipuler, constitue son langage de programmation. Ainsi le langage de programmation du processeur définit complètement ce processeur. Il y a équivalence totale entre la

machine virtuelle et son langage de programmation. Aussi, *connaître le langage de programmation d'une machine virtuelle équivaut à connaître les capacités d'exécution de cette machine.*

En résumé résoudre un problème *avec une machine virtuelle* consiste à construire *une séquence d'instructions pour cette machine* (à partir de son langage de programmation) telle que l'exécution de *cette séquence* soit une solution à *ce* problème. En informatique la machine cible, celle avec laquelle nous devons résoudre les problèmes, est l'ordinateur. Nous devons donc connaître les caractéristiques de cette machine, tout particulièrement son langage de programmation (les instructions qu'elle est capable d'exécuter), l'alphabet permettant de coder les instructions ainsi que les données et les outils permettant d'exécuter ces instructions.

Les instructions d'un ordinateur sont *les instructions machines*, elles constituent le langage de programmation de l'ordinateur : *le langage machine*. Résoudre un problème avec un ordinateur consiste donc à exprimer ce problème sous la forme d'une séquence d'instructions machines que nous devons soumettre aux outils permettant l'exécution de cette séquence. Cette séquence d'instructions machine exécutables par l'ordinateur s'appelle *le programme machine*.

1.2 STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT D'UN ORDINATEUR

Après ce bref rappel sur la manière algorithmique de résoudre un problème nous allons nous intéresser à la résolution d'un problème avec comme machine cible un ordinateur. Pour cela nous donnons tout d'abord une présentation de la structure matérielle d'un ordinateur, de son fonctionnement, pour ainsi en déduire comment on peut à l'aide d'un ordinateur, résoudre un problème. L'ordinateur cible nous servant de support descriptif est un ordinateur de type Von Neumann qui caractérise bien la quasi-totalité des ordinateurs actuels. Il est composé des éléments suivants :

- une *mémoire centrale* pour le stockage des informations (programme et données);
- un *microprocesseur* ou processeur central pour le traitement des informations logées dans la mémoire centrale;
- des *unités de contrôle* des périphériques et des périphériques;
- un *bus de communication* entre ces différents modules.

1.2.1 Structure générale d'un ordinateur

La figure 1.1 présente l'organisation générale d'un ordinateur. On y trouve deux parties principales :

- le processeur comprenant les modules mémoire centrale, processeur central (micro-processeur), les unités d'échange et le bus de communication entre ces différents modules;

- les périphériques avec lesquels dialogue le processeur au travers des unités d'échange (ou contrôleurs). On distingue en général :
 - les périphériques d'entrée tels que le clavier ou la souris;
 - les périphériques de sortie tels que les imprimantes et les écrans de visualisation;
 - les périphériques d'entrée et de sortie tels que les disques magnétiques ou les modems pour accéder aux réseaux de communication.

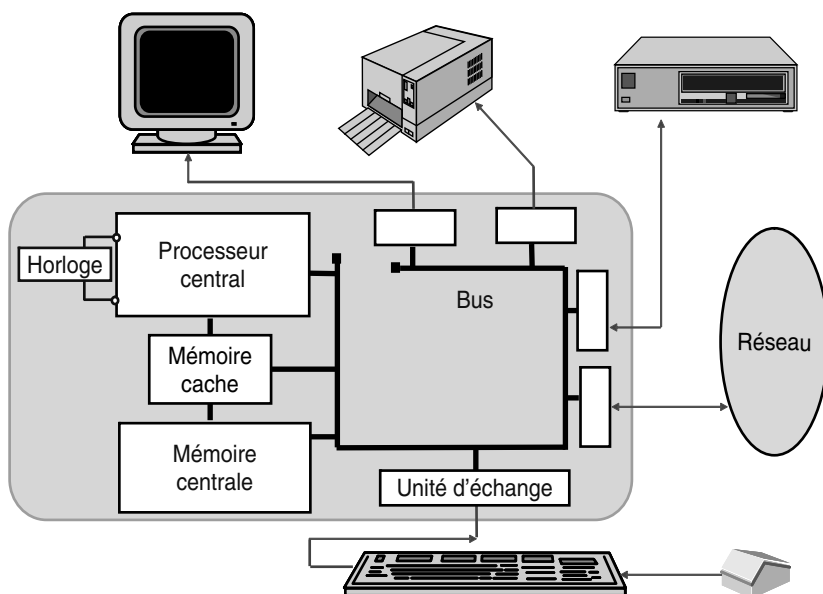


Figure 1.1 Structure matérielle générale.

Globalement le processeur permet l'exécution d'un programme. Chaque processeur dispose d'un langage de programmation (les instructions machine) spécifique. Ainsi résoudre un problème avec un processeur consiste à exprimer ce problème comme une suite de ses instructions machine. La solution à un problème est donc spécifique de chaque processeur. Le programme machine et les données qui sont manipulées par les instructions machine sont placés dans la mémoire centrale.

Examinons à présent plus en détail la composition et les fonctions de chacun des modules composant le processeur.

1.2.2 La mémoire centrale

La mémoire centrale assure la fonction de stockage de l'information qui peut être manipulée par le microprocesseur (processeur central), c'est-à-dire le programme machine accompagné de ses données. En effet, le microprocesseur n'est capable d'exécuter une instruction que si elle est placée dans la mémoire centrale.

Cette mémoire est constituée de circuits élémentaires nommés bits (*binary digit*). Il s'agit de circuits électroniques qui présentent deux états stables codés sous la forme d'un 0 ou d'un 1. De par sa structure la mémoire centrale permet donc de coder les informations sur la base d'un alphabet binaire et toute information stockée en mémoire centrale est représentée sous la forme d'une suite de digits binaires. La figure 1.2 présente l'organisation générale d'une mémoire centrale.

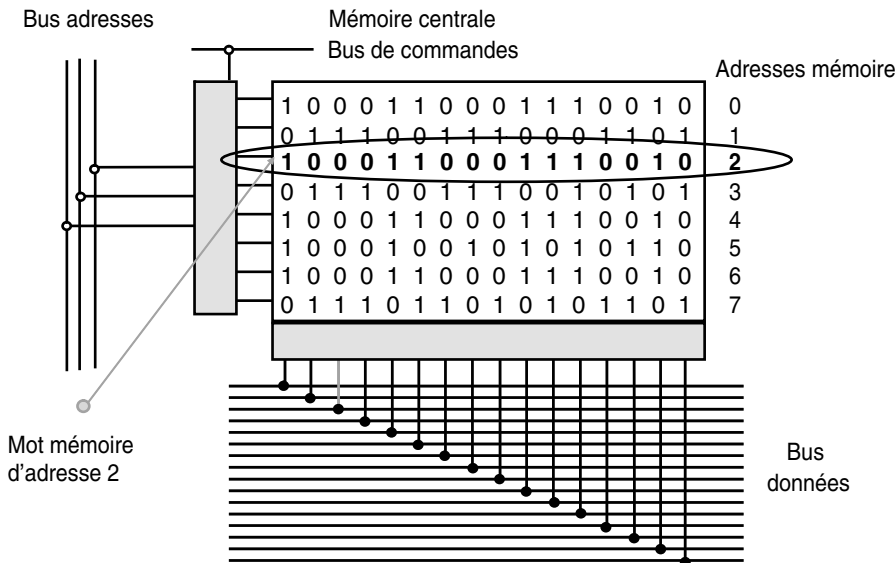


Figure 1.2 La mémoire centrale.

Pour stocker l'information la mémoire est découpée en cellules mémoires : les *mots mémoires*. Chaque mot est constitué par un certain nombre de bits qui définissent sa taille. On peut ainsi trouver des mots de 1 bit, 4 bits (*quartet*) ou encore 8 bits (*octet* ou *byte*), 16 bits voire 32 ou 64 bits. Chaque mot est repéré dans la mémoire par une *adresse*, un numéro qui identifie le mot mémoire. Ainsi un mot est un contenant accessible par son adresse et la suite de digits binaires composant le mot représente le contenu ou valeur de l'information.

La mémoire centrale est un module de stockage de l'information dont la valeur est codée sur des mots. L'information est accessible par mot. La capacité de stockage de la mémoire est définie comme étant le nombre de mots constituant celle-ci. Dans l'exemple de la figure 1.2, notre mémoire a une capacité de 8 mots de 16 bits chacun. On exprime également cette capacité en nombre d'octets ou de bits. Notre mémoire a donc une capacité de 16 octets ou de 128 bits. L'information que l'on trouve en mémoire centrale est donc codée sur un alphabet binaire. La figure 1.3 rappelle le nombre de combinaisons que l'on peut réaliser à partir d'une suite d'éléments binaires. Coder l'information en mémoire centrale c'est donc associer à chaque suite de bits un sens particulier.

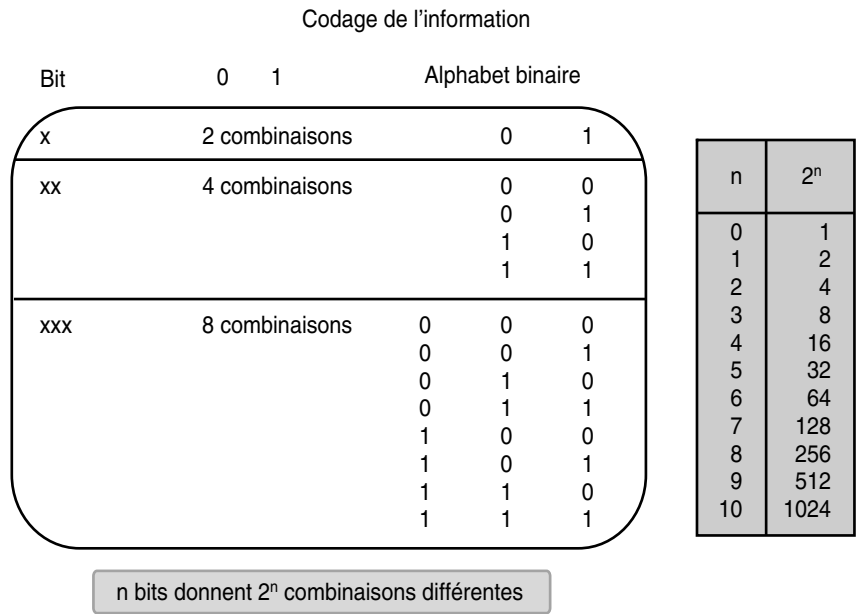


Figure 1.3 Codage binaire.

La figure 1.4 présente succinctement les différentes informations que l’on trouve dans la mémoire centrale : instructions machines et données manipulées par les instructions.

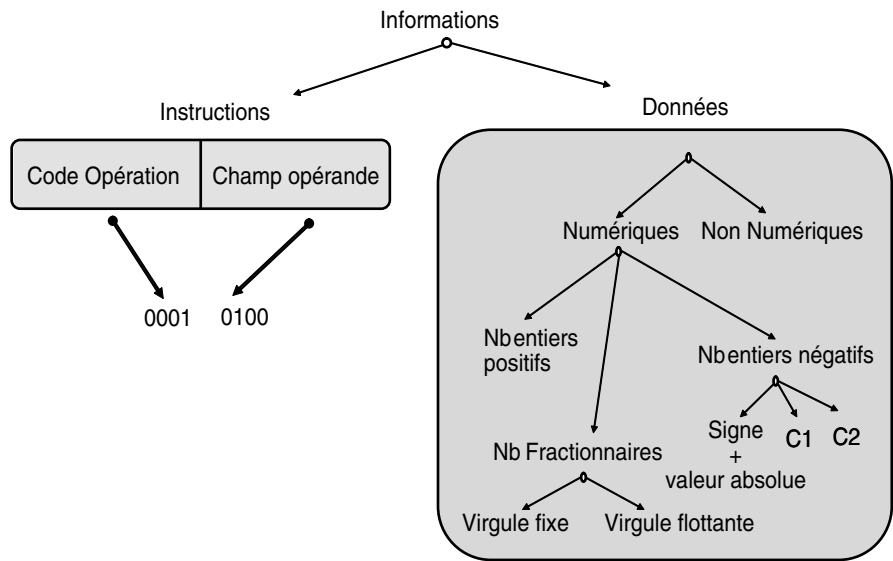


Figure 1.4 Les différentes informations présentes en mémoire centrale.

Les instructions et les données sont codées sur des mots mémoires : elles peuvent occuper un ou plusieurs mots mémoires selon la nature de l'ordinateur. Les instructions machines sont propres à chaque microprocesseur mais sont toujours construites de la même manière : un code opération qui définit l'opération à exécuter, le champ opérande qui définit la ou les données sur lesquelles portent l'opération :

- le *code opération* est codé sur un nombre de digits binaires qui caractérise un microprocesseur. Ce nombre de bits définit en fait le nombre d'opérations possibles avec cet ordinateur : un code opération sur 3 bits admet 8 combinaisons permettant la définition de 8 opérations différentes (instructions machine) possibles, sur 4 bits 16 instructions possibles etc. La taille du code opération est donc un facteur déterminant qui caractérise complètement le nombre d'instructions qu'est capable d'exécuter un processeur;
- le *champ opérande* est une suite de bits qui permet de caractériser l'adresse de la ou des donnée(s) que manipule(nt) l'instruction machine définie par le code opération. Il existe plusieurs types d'instructions machines qui peuvent manipuler une ou plusieurs données selon la « puissance » du langage machine du microprocesseur utilisé. Il existe également plusieurs manières de définir, à partir du champ opérande, l'adresse d'une donnée : cela repose sur le mécanisme d'adressage d'un microprocesseur qui définit les différentes manières de calculer une adresse de données. On parle également de *modes d'adressages* du microprocesseur.

Les données sont les objets que manipulent les instructions, elles sont codées sur un ou plusieurs mots machines et sont donc adressables (repérables) dans la mémoire centrale. L'adresse de la donnée est déterminée par le type d'adressage utilisé par l'instruction machine. Le codage d'une donnée en mémoire dépend de son type : la figure 1.4 donne les différents types de données que manipulent les instructions machines. Pour chaque type il existe des règles de codage. Par exemple pour coder les caractères alphanumériques on utilise un dictionnaire (table ASCII, table EBCDIC, codage Unicode) tandis que pour coder un nombre entier non signé on utilise une règle traditionnelle de codage d'un nombre sur un alphabet binaire.

Dans l'exemple de la figure 1.5, on suppose un nombre codé sur un octet (8 bits) dont la position de chaque bit est numérotée de 0 à 7, en partant du bit de poids

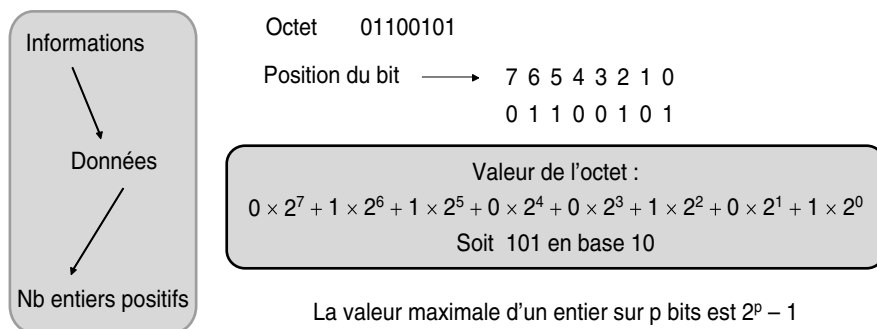


Figure 1.5 Un exemple de codage de l'information.

faible. La valeur de l'entier est alors la somme des produits de chaque bit par le nombre de symboles possibles dans la base d'expression du nombre (ici 2) élevé à la puissance du rang du bit. Cette règle est générale et permet de déterminer la valeur d'un entier codé sur n'importe quel alphabet. Dans le cas d'un alphabet binaire la valeur maximale que peut prendre un entier codé sur p bits est 2^p . Les principales normes de codages existantes à l'heure actuelle ainsi que la structure des instructions machine et les modes d'adressages courants sont détaillés au chapitre 4.

La mémoire centrale a pour objet le stockage des instructions et des données que peut manipuler le microprocesseur. Les opérations possibles sur la mémoire sont la lecture (acquisition par le microprocesseur) d'un mot et l'écriture (le microprocesseur place un nouveau contenu) dans un mot mémoire. Une opération de lecture d'un mot consiste à définir l'adresse du mot et à déclencher une commande de lecture qui amène le contenu du mot de la mémoire vers le microprocesseur. Une opération d'écriture consiste à définir l'adresse du mot dont on veut changer le contenu puis à déclencher une opération d'écriture qui transfère l'information du processeur vers le mot mémoire dont l'adresse est spécifiée.

Enfin d'autres éléments importants complètent la caractérisation d'une mémoire centrale :

- le temps d'accès à la mémoire qui mesure le temps nécessaire pour obtenir une information logée en mémoire;
- les technologies qui président à la construction de ces mémoires;
- le coût de réalisation de ces mémoires.

Nous reviendrons en détail sur l'ensemble de ces points dans le chapitre sur la mémorisation (chapitre 8).

1.2.3 Le bus de communication

Le *bus de communication* peut se représenter comme une nappe de fils transportant des signaux et permettant l'échange des informations entre les différents modules du processeur. Chaque fil transporte ou non un signal : il est présent ou absent. On représente par 1 un signal présent et par 0 un signal absent. Le nombre de fils du bus détermine sa largeur et définit ainsi le nombre d'informations différentes que peut véhiculer le bus. Ainsi un bus de 3 fils permet une combinaison de 8 signaux différents et donc représente 8 informations possibles différentes.

Le bus est construit comme un ensemble de trois bus :

- *le bus d'adresses* transporte des combinaisons de signaux qui sont interprétées comme des nombres entiers représentant l'adresse d'un mot mémoire. Par exemple, figure 1.6, le bus d'adresses a une largeur de 3 fils et est donc capable de coder des adresses allant de 0 à 7. Pour adresser un mot mémoire on fait appel à un circuit de sélection (décodeur) qui en entrée reçoit n signaux (3 dans notre exemple) et fournit 2^n signaux de sortie (8 dans notre exemple). Parmi les signaux de sortie un seul est positionné à 1 tous les autres valant 0. Dans notre exemple, les sorties sont numérotées de 0 à 7 et de haut en bas. Ainsi si la valeur d'entrée est 000, seule la

sortie 0 vaut 1 et toutes les autres valent 0. Pour adresser le mot mémoire 2 le microprocesseur place sur le bus d'adresses la chaîne 010 (qui a pour valeur 2 en base 10), la sortie 1 du décodeur vaut alors 1 et les autres valent 0. Ce circuit permet donc de sélectionner un mot mémoire dans la mémoire centrale. La largeur du bus d'adresses définit la *capacité d'adressage du microprocesseur* et il ne faut pas confondre capacité d'adressage et taille physique de la mémoire;

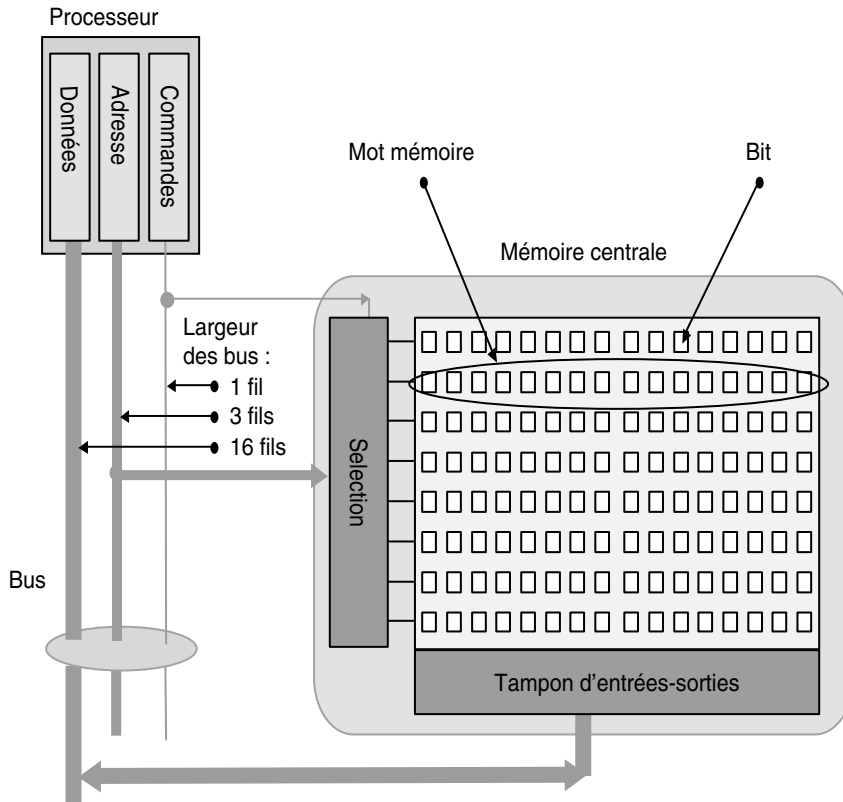


Figure 1.6 Bus de communication.

- le *bus de données* permet l'échange des informations (les contenus) entre les différents modules. Dans notre exemple le bus de données a une largeur de 16 fils et donc la taille des mots mémoires auxquels on peut accéder ou dont on peut modifier le contenu est de 16 bits;
- le *bus de commandes* : c'est par ce bus que le microprocesseur indique la nature des opérations qu'il veut effectuer. Dans notre exemple il a une largeur d'un fil et donc le microprocesseur ne peut passer que deux commandes (la lecture et l'écriture).

La figure 1.7 résume les différents points abordés concernant la mémoire et les bus permettant la communication avec la mémoire. Sur cette figure 1.7, le bus

d'adresses a une largeur de m bits, le bus de données une largeur de p bits ce qui détermine la capacité de stockage en bits de cette mémoire, soit 2^m mots de p bits. Le bus de commandes permet de déterminer le type d'opération (lecture ou écriture) que l'on souhaite réaliser.

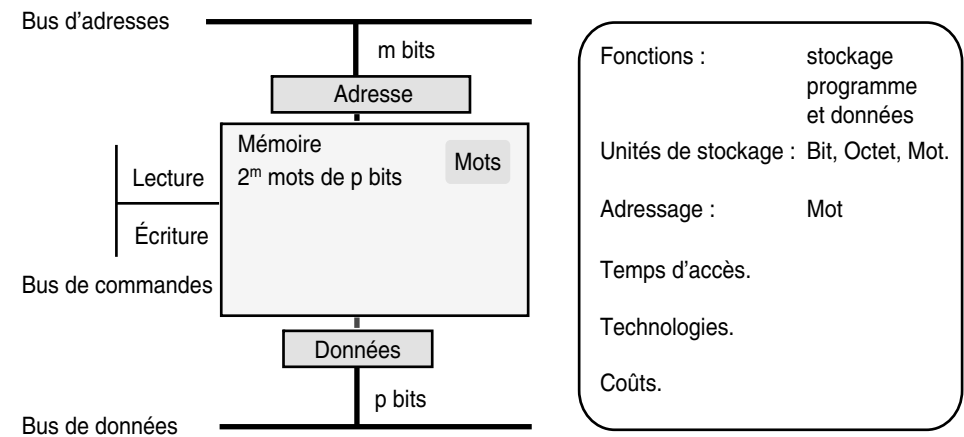


Figure 1.7 Bus de communication et mémoire centrale.

1.2.4 Le processeur central ou microprocesseur

Le *microprocesseur* (unité centrale) a pour objet d'exécuter les instructions machines placées en mémoire centrale. La figure 1.8 présente son architecture générale.

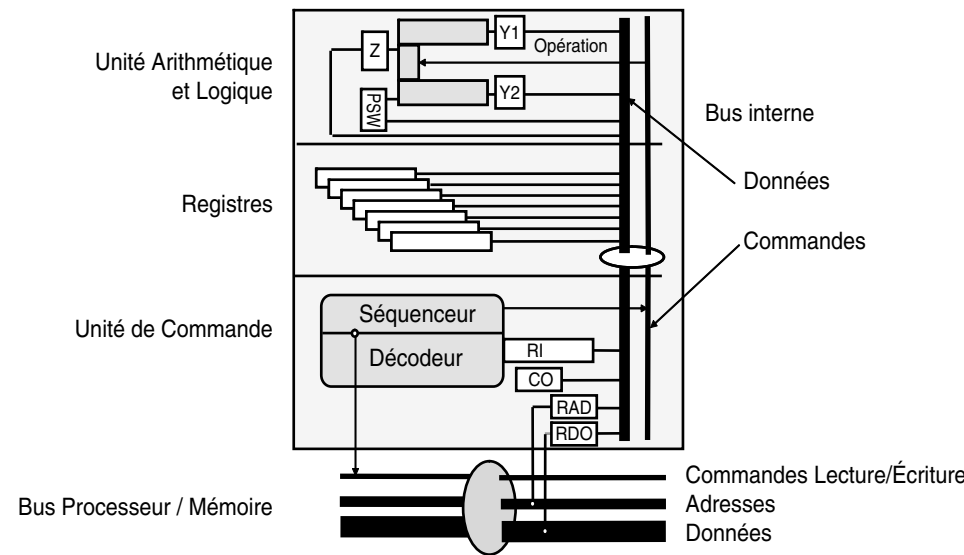


Figure 1.8 Le microprocesseur.

Il est constitué de quatre parties : l'unité arithmétique et logique (UAL), les registres, l'unité commande et le bus de communication interne permettant l'échange des données et des commandes entre les différentes parties du microprocesseur.

Les registres

Ce sont des zones de mémorisation de l'information internes au microprocesseur. Ils sont de faible capacité et de temps d'accès très faible. Leur nombre et leur taille sont variables en fonction du type de microprocesseur. Ils peuvent être de type adresse (ils contiennent alors une adresse de mot mémoire) ou données (ils contiennent alors le contenu d'un mot mémoire). Ils peuvent être spécifiques et avoir une fonction très précise (par exemple le registre pointeur de pile) ou généraux et servir essentiellement aux calculs intermédiaires, par exemple, de l'unité arithmétique et logique.

L'unité arithmétique et logique (UAL)

Ce module est chargé de l'exécution de tous les calculs que peut réaliser le microprocesseur. Cette unité est constituée de l'ensemble des circuits arithmétiques et logiques permettant au processeur d'effectuer les opérations élémentaires nécessaires à l'exécution des instructions machine. Elle inclut donc les circuits d'addition, de soustraction, de multiplication, de comparaison, etc. Dans ce module se trouvent également des registres dont l'objet est de contenir les données sur lesquelles vont porter les opérations à effectuer. Dans notre exemple, l'UAL possède deux registres d'entrée (E1 et E2) et un registre de sortie (S).

Pour faire une addition :

- la première donnée est placée dans E1 via le bus interne de données;
- la seconde donnée est placée dans E2 via le bus interne de données;
- la commande d'addition est délivrée au circuit d'addition via le bus interne de commandes;
- le résultat est placé dans le registre S.

Sur notre machine on note également un registre particulier, le PSW (*Program Status Word*), qui joue un rôle fondamental de contrôle de l'exécution d'un programme et qui à tout instant donne des informations importantes sur l'état de notre microprocesseur. Par exemple puisque nous travaillons sur des mots de longueur finie la valeur d'un entier codé sur un mot ne peut dépasser la valeur maximale représentable sur ce mot. Lorsque nous faisons l'addition de deux entiers le résultat peut avoir une valeur qui n'est pas représentable sur un mot mémoire : il y a alors *dépassement de capacité*. Ce dépassement de capacité doit être signalé et noté pour ne pas perturber le fonctionnement de l'ordinateur. Ce type d'information est stocké dans le PSW.

L'unité de commande

Elle exécute les instructions machines et pour cela utilise les registres et l'UAL du microprocesseur. On y trouve deux registres pour la manipulation des instructions (le compteur ordinal CO, le registre d'instruction RI), le décodeur, le séquenceur et deux registres (le registre d'adresses RAD et le registre de données RDO) permettant

la communication avec les autres modules via le bus. Enfin, via le bus de commandes, elle commande la lecture et/ou l'écriture dans la mémoire centrale.

➤ Le compteur ordinal CO

C'est un registre d'adresses. À chaque instant il contient l'adresse de la prochaine instruction à exécuter. Lors de l'exécution d'une instruction il est prévu, au cours de cette exécution, la modification du contenu du CO. Ainsi en fin d'exécution de l'instruction courante le compteur ordinal pointe sur la prochaine instruction à exécuter et le programme machine peut continuer à se dérouler.

➤ Le registre d'instruction RI

C'est un registre de données. Il contient l'instruction à exécuter.

➤ Le décodeur

Il s'agit d'un ensemble de circuits dont la fonction est d'identifier l'instruction à exécuter qui se trouve dans le registre RI, puis d'indiquer au séquenceur la nature de cette instruction afin que ce dernier puisse déterminer la séquence des actions à réaliser.

➤ Le séquenceur

Il s'agit d'un ensemble de circuits permettant l'exécution effective de l'instruction placée dans le registre RI. Le séquenceur exécute, rythmé par l'horloge du microprocesseur, une séquence de *microcommandes* (*micro-instructions*) réalisant le travail associé à cette instruction machine. Pour son fonctionnement le séquenceur utilise les registres et l'UAL. Ainsi l'exécution effective d'une instruction machine se traduit par l'exécution d'une séquence de micro-instructions exécutables par les circuits de base du microprocesseur. Nous reviendrons plus en détail sur cet aspect des choses dans le chapitre 7, consacré à l'exécution des instructions machines.

➤ Le registre RAD

C'est un registre d'adresses. Il est connecté au bus d'adresses et permet la sélection d'un mot mémoire via le circuit de sélection. L'adresse contenue dans le registre RAD est placée sur le bus d'adresses et devient la valeur d'entrée du circuit de sélection de la mémoire centrale qui va à partir de cette entrée sélectionner le mot mémoire correspondant.

➤ Le registre RDO

C'est un registre de données. Il permet l'échange d'informations (contenu d'un mot mémoire) entre la mémoire centrale et le processeur (registre).

Ainsi lorsque le processeur doit exécuter une instruction il :

- place le contenu du registre CO dans le registre RAD via le bus d'adresses et le circuit de sélection;
- déclenche une commande de lecture mémoire via le bus de commandes;
- reçoit dans le registre de données RDO, via le bus de données, l'instruction;

- place le contenu du registre de données RDO dans le registre instruction RI via le bus interne du microprocesseur.

Pour lire une donnée le processeur :

- place l'adresse de la donnée dans le registre d'adresses RAD;
- déclenche une commande de lecture mémoire;
- reçoit la donnée dans le registre de données RDO;
- place le contenu de RDO dans un des registres du microprocesseur (registres généraux ou registres d'entrée de l'UAL).

On dit que pour transférer une information d'un module à l'autre le microprocesseur établit un *chemin de données* permettant l'échange d'informations. Par exemple pour acquérir une instruction depuis la mémoire centrale, le chemin de données est du type : CO, RAD, commande de lecture puis RDO, RI.

1.3 FONCTIONNEMENT : RELATION MICROPROCESSEUR / MÉMOIRE CENTRALE

L'objet de cette partie est de présenter succinctement comment s'exécute un programme machine sur le matériel que nous venons de définir. Pour être exécutable une instruction doit nécessairement être présente en mémoire centrale. La mémoire centrale contient donc des instructions et des données. De plus toutes les informations en mémoire sont codées sur un alphabet binaire. Les informations sont alors, quelle que soit leur nature, des suites de 0 et de 1. Il faut donc pouvoir différencier instructions et données afin que le registre instruction RI contienne bien des instructions et non des données (et réciproquement). Dans le cas contraire le décodeur ne pourrait interpréter la nature du travail à faire (RI ne contenant pas une instruction mais une

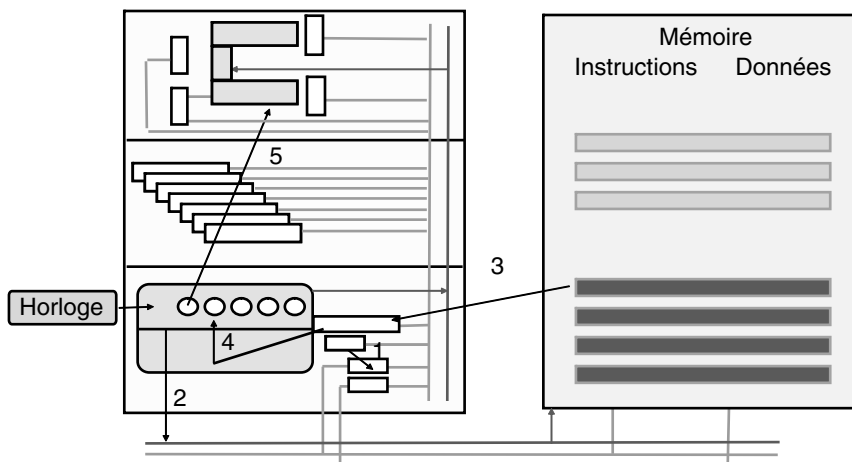


Figure 1.9 Exécution d'une instruction.

donnée). En général lors du placement du programme machine et des données dans la mémoire centrale les instructions et les données sont séparées et occupent des espaces mémoires différents (voir figure 1.9). À la fin du chargement du programme machine et des données en mémoire le compteur ordinal CO reçoit l'adresse de la première instruction du programme à exécuter.

L'exécution peut alors commencer. Le principe général d'exécution est illustré dans la figure 1.9.

Les différentes phases de l'exécution d'une instruction sont les suivantes :

1. le contenu du compteur ordinal CO est placé dans le registre d'adresses RAD : il y a sélection de l'instruction à exécuter;
2. une commande de lecture de la mémoire centrale est déclenchée via le bus de commandes;
3. l'instruction est transférée de la mémoire centrale vers le registre instruction RI via le bus de données et le registre de données RDO;
4. le décodeur analyse l'instruction placée dans le registre instruction RI, reconnaît cette instruction et indique au séquenceur la nature de l'instruction;
5. le séquenceur déclenche au rythme de l'horloge la séquence de micro-instructions nécessaires à la réalisation de l'instruction.

On peut résumer les étapes de l'exécution d'une instruction (chargement/décodage/exécution) par l'algorithme suivant :

```

début
charger l'instruction à exécuter depuis la mémoire dans le registre
➤ instruction;
modifier le compteur ordinal pour qu'il pointe sur la prochaine
➤ instruction à exécuter;
décoder l'instruction qui vient d'être chargée dans le registre
➤ d'instruction;
charger les données éventuelles dans les registres;
exécuter la séquence des micro-instructions permettant la réalisation
➤ de l'instruction;
fin
  
```

Les opérations charger/modifier réalisent le chargement de l'instruction dans le registre d'instruction RI. Cette phase est la *phase dite de FETCH*.

Enfin, l'exécution d'un programme machine peut être décrite par l'algorithme suivant :

```

début
exécuter la première instruction du programme
tant que ce n'est pas la dernière instruction
faire
    exécuter l'instruction;
fin faire
fin
  
```

1.4 UN EXEMPLE

Pour résumer ce que nous venons d’étudier, nous allons prendre un exemple de problème à résoudre avec un ordinateur. Nous définissons tout d’abord le problème et l’ordinateur cible c’est-à-dire son langage de programmation (langage machine). Puis nous construisons le programme machine exécutable par cet ordinateur. Enfin nous plaçons ce programme en mémoire centrale. Il peut alors être exécuté par le microprocesseur.

1.4.1 Le problème

Notre problème consiste à réaliser l’addition de X qui vaut 4 avec Y qui vaut 1 et à placer le résultat dans Z. Nous souhaitons donc, à l’aide de notre ordinateur, réaliser l’opération : $Z = X + Y$ avec $X = 4$ et $Y = 1$.

1.4.2 L’ordinateur

Cet ordinateur a la structure générale définie dans la figure 1.11. Les mots de la mémoire sont des octets (8 bits), tous les registres du microprocesseur ont une largeur de 8 bits, les instructions et les données entières sont codées sur un mot mémoire. Données : X est codé : 00000100₂; Y est codé : 00000001₂.

1.4.3 Le langage machine

Le code opération est codé sur 4 bits, le champ opérande sur 4 bits. Le champ opérande ne référence qu’une donnée. Ainsi pour faire l’addition de deux nombres un tel langage suppose que la première donnée est spécifiée dans l’instruction et la seconde occupe une adresse implicite. Dans de nombreuses machines cette adresse implicite est un registre appelé *registre Accumulateur* (noté A). L’addition porte alors sur la donnée spécifiée dans l’instruction et le contenu de A, le résultat étant placé dans A.

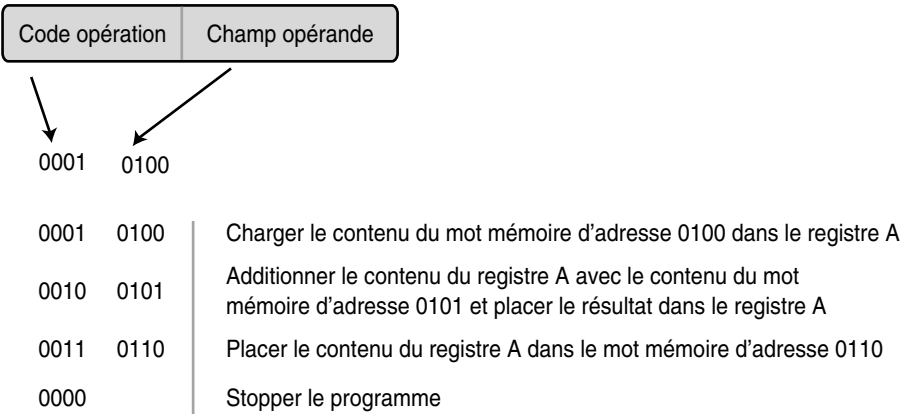


Figure 1.10 Le langage de la machine.