

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب  
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Commandes Electriques  
Thème

*Etude de système de contrôle et de commande  
pour un additionneur numérique*

**Présenté par :**

- 1) Melle HAMZA Amina
- 2) Mr GHARBI Nadir

Soutenue, le 27 / 06 / 2024

**Devant les jurys composés de :**

Dr. ADJOU DJ REDOUANE	MAB	U.B.B	Président
Dr .YOUNES MOHAMED	Prof	U.B.B	Encadrant
Dr. BERRACHED DJELLOUL	MCB	U.B.B	Examineur

**Promotion : 2023-2024**

# TABLE DE MATIERES

LISTE DES FIGURES .....	i
INTRODUCTION GENERALE.....	ii

## Introduction générale:

### Chapitre 1 : Physique de semi-conducteur et portes logiques

1- Introduction.....	1
2- électronique de semi-conducteu.....	1
2-1 Physique des semi-conducteurs .....	1
2-2 Conception de circuits intégrés .....	1
2-3 Fabrication de puces.....	2
2-4 Gestion thermique.....	2
3- les interrupteurs électroniques .....	2
3.1 Transistor bipolaire .....	3
3.2 Transistor à effet de champ .....	4
4- Les portes logiques.....	5
4.1 Les portes logiques de base .....	5
4.2 Les portes logiques secondaires.....	5
5- Matérialisation des portes logiques à partir des mosfet de type P et type N .....	6
6- Circuit intégrés aux portes logiques.....	11
7- Conclusion.....	13

### Chapitre 2 : Support séquentiel d'un additionneur à plusieurs bits

1- Introduction.....	14
2- Calculateur numérique .....	14
3- Circuit additionneur numérique.....	15
3-1 Circuit semi-additionneur .....	15
3-2 Circuit additionneur complet... ..	16
3-3 Circuit additionneur en cascade.....	16
4- Codeur et décodeur.....	17
4-1 Codeur .....	17
4-2 décodeur.....	18
5- Les registres.....	19
5-1 Registre à décalage.....	20
5-1-1 Registre à décalage série .....	20
5-1-2 Registres à décalage parallèle.....	20
5-2 Types de Registre à décalage .....	20
a- Registre a entrée série et sortie série (SISO).....	21
b- Registre a entrée série et sortie parallèle (SIPO) .....	21

c- Registre a entrée parallèle et sortie série (PISO).....	21
d- Registre a entrée parallèle et sortie parallèle (PIPO) .....	22
6- Compteur numérique.....	22
6-1 Compteur synchrone .....	22
6-2 Compteur Asynchrone... ..	23
7- Conclusion... ..	23

### Chapitre 3 : MICROPROCESSEUR - UNITÉ DE COMMANDE

1	Introduction.....	24
2	Historique des microprocesseurs .....	24
3	Constitution d'un microprocesseur .....	26
3-1	Horloge.....	26
3-2	Registre.....	27
3-2-1	mémoire très rapides .....	27
3-2-2	taille mot mémoire .....	27
3-2-3	Accumulateur (ACC)... ..	27
3-2-4	le pointeur de pile .....	27
3-2-5	registre d'instruction... ..	27
3-2-6	registre d'état (PSW) .....	27
3-2-7	Registre tampon (BUFFER) .....	27
3-3	Mémoire cache.....	27
utilité de la mémoire chache .....	28	
cache algorithme .....	28	
niveaux de mémoire caches .....	28	
3-4	Bus .....	28
adresse de bus.....	29	
donnée de bus .....	29	
contrôle de bus .....	29	
3-5	Unités fonctionnelles .....	29
3.5-1	Unité d'instruction... ..	30
3.5-2	Séquenceur.....	30
compteur ordinal .....	30	
Registre d'instruction .....	30	
Pipeline .....	31	
3.5-3	Unité d'exécution .....	31
unité arithmétique et logique .....	31	
unité de virgule flottante .....	32	
le registre d'état.....	32	
registre accumulateur .....	32	
3.6	Exemple d'exécution d'un programme sur un microprocesseur.....	32
3.7	Exemple d'un séquenceur relatif à une opération addition de deux nombres d'un seul chiffre.....	35
3.8	Conclusion... ..	37

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Une partie de la table des éléments .....	2
Figure 2 : symbole de porte not .....	5
Figure 3 : symbole de porte and.....	5
Figure 4 : symbole de porte OR.....	5
Figure 5 : symbole de porte XOR .....	6
Figure 6 : symbole de porte NAND.....	6
Figure 7 : symbole de porte NOR .....	6
Figure 8 : structure de transistors CMOS.....	7
Figure 9 : Doplage N du selicium .....	7
Figure 10 : Doplage P du selicium.....	8
Figure 11 : DIODE... ..	8
Figure 12 : Nmos transistor.....	8
Figure 13 : Pmos transistor .....	9
Figure 14 : structure électrique d'un inverseur CMOS .....	9
Figure 15 : symbole d'un inverseur CMOS .....	9
Figure 16 : fonctionnement de l'inverseur l'entrée 0.....	10
Figure 17 : fonctionnement de l'inverseur l'entrée.....	10
Figure 18 : porte NAND en cmos statique.....	11
Figure 19 : porte NOR en cmos statique.....	12
Figure 20 : porte XOR en CMOS .....	12
Figure 21 : Logigramme et l'équation de sortie de semi additionneur.....	15
Figure 22 : logigramme d'un additionneur complet.....	16
Figure 23 : logigramme codeur de 8 entrées et 3 sorties.....	17
Figure 24 : un exemple de décodeur 3 à 8.....	19
Figure 25 :registre SISO .....	21
Figure 26 :registre SIPO .....	21
Figure 27 : registre PISO .....	22
Figure 28 : registre PIPO .....	22

Figure 29 : schéma d'un compteur asynchrone...	23
Figure 30 : Historique Processeurs INTEL.....	25
Figure 31 : Historique Processeurs AMD.....	26
Figure32 : Mémoire cache primaire et secondaire.....	28
Figure 33 : Les différents bus.....	29
Figure 34 : exemple d'addition pour le décodage de l'instruction.....	30
Figure 35 : schéma d'une ALU.....	31
Figure 36 :l'architecture d'un système à microprocesseur.....	33

# REMERCIEMENTS

D'abord, nous remercions ALLAH, le tout puissant, qui nous a aidés et guidé durant toutes ces longues années d'études pour atteindre ce niveau .Ensuite, nous exprimons notre gratitude à toute personne nous a aidées de près ou de loin à réaliser ce travail.

En particulier, nous voulons présenter nos remerciements à notre encadreur Pr. **Younes** et également lui témoigner notre gratitude pour sa patience et son soutien qui nous ont été précieux afin de mener notre travail à bord.

Nous tenons à exprimer notre gratitude aussi aux membres de jury, qui nous ont honorés en acceptant de juger ce modeste travail.

## Dédicaces

Je dédie ce modeste travail:

A ma mère.

A mon père.

Aucun hommage ne peut être à la hauteur de l'amour

Et de l'affection dont ils ne cessent de nous combler

Qu'ils trouvent dans ce travail un modeste témoignage

De mon profond amour.

Que bien leurs procures bonnes santé et longue vie.

A mes sœurs.

A mes frères.

A tous mes amis.

AMINA , NADIR

# Introduction générale :

---

L'avènement de l'électronique a révolutionné la manière dont nous traitons l'information et interagissons avec le monde qui nous entoure. Au cœur de cette révolution se trouvent les semi-conducteurs et les portes logiques, qui ont ouvert la voie à une multitude d'applications, allant des simples circuits de commutation aux microprocesseurs sophistiqués.

Ce mémoire explore en profondeur les fondements de l'électronique moderne à travers trois chapitres principaux. Dans le premier chapitre, nous plongeons dans le monde des semi-conducteurs et des interrupteurs électroniques, en examinant en détail les principes de fonctionnement des transistors bipolaires et à effet de champ. Nous explorons également les bases des portes logiques et leur matérialisation à partir de transistors MOSFET de type P et N, ainsi que l'intégration de ces portes dans des circuits intégrés.

Le deuxième chapitre se concentre sur les supports séquentiels d'un additionneur à plusieurs bits, un élément fondamental des calculs numériques. Nous détaillons les circuits additionneurs numériques, des semi-additionneurs aux additionneurs complets, en passant par les circuits en cascade. Nous explorons également les concepts de codeurs, décodeurs, registres à décalage et compteurs numériques, qui sont essentiels pour le traitement et la manipulation des données dans les systèmes numériques.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous plongeons dans l'univers des microprocesseurs. Cette machine est reconnue depuis bien plusieurs décennies. En effet, en 1971, **Ted Hoff** et **Federico Faggin** chez Intel en collaboration avec **Masatoshi Shima** chez **Busicom**, conçoivent le premier microprocesseur, caractérisé surtout par leurs unités de commande et de contrôle. Nous explorons l'évolution historique des microprocesseurs, leur constitution et leur fonctionnement. En illustrant un exemple de calcul ordinaire l'exécution de son programme sur un microprocesseur. Aussi dans le même contexte, nous donnons un circuit d'addition de deux chiffres décimaux mettant en évidence l'idée d'additionner via registres, inventée depuis 1971.

<https://www.calculquebec.ca/vitrine/histoire/>

Ce mémoire vise à fournir une compréhension générale des concepts clés de l'électronique, en mettant l'accent sur leur application pratique dans le domaine de l'informatique et des systèmes numériques. En explorant ces concepts fondamentaux, nous espérons offrir aux lecteurs une bonne base à s'invertir plus sur ce sujet.

# CHAPITRE 1

## PHYSIQUE DES SEMI-CONDUCTEURS ET PORTES LOGIQUES

### **I -1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous explorerons les fondements de la physique des semi-conducteurs et des portes logiques. Nous débuterons par une introduction générale, puis plongerons dans les bases de l'électronique des semi-conducteurs, en mettant en lumière les principaux concepts et dispositifs. Ensuite, nous examinerons les interrupteurs électroniques, notamment les transistors bipolaires et les transistors à effet de champ, qui jouent un rôle central dans la manipulation des signaux électriques. Nous aborderons également les portes logiques, éléments essentiels dans la conception des circuits numériques, et étudierons comment ces portes sont matérialisées à partir des MOSFET de type P et type N. Enfin, nous explorerons les circuits intégrés des portes logiques, soulignant leur importance dans la réalisation de systèmes électroniques complexes [4].

### **I-2.Électronique de semi-conducteur**

L'électronique des semi-conducteurs est une branche fondamentale de l'ingénierie électronique qui repose sur l'utilisation de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium et le germanium. Ces matériaux sont dotés de propriétés électriques intermédiaires entre celles des conducteurs et des isolants, ce qui leur permet de contrôler le flux d'électrons à travers eux. L'électronique à semi-conducteurs est omniprésente dans notre vie quotidienne, des circuits intégrés présents dans nos smartphones et ordinateurs aux systèmes de contrôle embarqués dans les véhicules et aux panneaux solaires utilisés pour la production d'énergie renouvelable. [1]

Les dispositifs à semi-conducteurs les plus courants sont les diodes et les transistors. Les diodes permettent de contrôler le sens du courant électrique en ne laissant passer le courant que dans une seule direction, tandis que les transistors agissent comme des interrupteurs ou des amplificateurs de signaux. Les transistors sont l'élément de base des circuits logiques numériques et analogiques, et leur miniaturisation constante a conduit à une augmentation exponentielle de la puissance de calcul des appareils électroniques.

L'électronique de semi-conducteurs repose sur des concepts et des techniques avancées de physique des semi-conducteurs, de conception de circuits intégrés, de fabrication de puces et de gestion thermique. Les progrès dans ce domaine sont alimentés par la recherche continue dans les laboratoires universitaires et industriels à travers le monde, ainsi que par des collaborations interdisciplinaires entre les ingénieurs électroniciens, les physiciens et les chimistes. [1-2]

#### **I-2.1Physique des semi-conducteurs :**

La physique des semi-conducteurs est une branche de la physique qui étudie le comportement des matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium et le germanium, du point de vue de leurs propriétés électriques et optiques. Cela inclut l'étude des bandes d'énergie, des porteurs de charge (électrons et trous), des jonctions PN, des semi-conducteurs intrinsèques et extrinsèques, ainsi que des phénomènes de transport électronique tels que la diffusion et la dérive. [2]

#### **Conception de circuits intégrés :**

La conception de circuits intégrés (CI) implique la création de schémas électroniques qui

intègrent un grand nombre de composants électroniques sur une seule puce de silicium. Cela comprend la conception de circuits numériques et analogiques, ainsi que la simulation et la vérification de leur fonctionnement à l'aide de logiciels spécialisés. La conception de CI tient compte de nombreux paramètres, notamment la taille, la consommation d'énergie, la vitesse de fonctionnement et la fiabilité.[3-5]

<b>B</b> 3 5 Bore	<b>C</b> 4 6 Carbone	<b>N</b> 5 7 Azote
<b>Al</b> 3 13 Aluminium	<b>Si</b> 4 14 Silicium	<b>P</b> 5 15 Phosphore
<b>Ga</b> 3 31 Gallium	<b>Ge</b> 4 32 Germanium	<b>As</b> 5 33 Arsenic

Figure 1 : Une partie de la table des éléments [5]

### Fabrication de puces :

La fabrication de puces, également connue sous le nom de fabrication de semi-conducteurs, est un processus complexe qui implique la fabrication de dispositifs électroniques en série sur une plaque de semi-conducteur, généralement du silicium. Ce processus comprend des étapes telles que la lithographie, le dépôt de couches minces, la diffusion ionique, la gravure et le dépôt de métal. Chaque étape est critique pour la fabrication de transistors et d'autres composants électroniques à l'échelle nanométrique.[3-4]

### Gestion thermique :

La gestion thermique est essentielle dans l'électronique des semi-conducteurs en raison de la sensibilité des dispositifs électroniques à la chaleur. Les dispositifs électroniques génèrent de la chaleur pendant leur fonctionnement, et une mauvaise dissipation de cette chaleur peut entraîner des performances réduites, voire des défaillances. La gestion thermique implique la conception de dissipateurs thermiques efficaces, de systèmes de refroidissement par ventilation ou liquide, ainsi que la sélection de matériaux à faible conductivité thermique pour les boîtiers et les substrats.[2]

Les progrès dans ces domaines sont le fruit d'une recherche continue menée dans les laboratoires universitaires et industriels du monde entier. Les ingénieurs électroniciens, les physiciens et les chimistes collaborent étroitement pour développer de nouvelles technologies, améliorer les performances des dispositifs existants et résoudre les défis technologiques rencontrés dans l'industrie de l'électronique des semi-conducteurs.[2]

### I-3.Les interrupteurs électroniques

Un interrupteur constitue un dispositif fondamental dans les systèmes électriques, agissant comme un organe de commande essentiel pour la gestion de circuits électriques. Sa fonction principale consiste à établir ou interrompre la continuité du courant électrique circulant vers un appareil ou un équipement spécifique, tel qu'un point lumineux. En termes techniques, il agit comme un élément de contrôle permettant de réguler l'alimentation en électricité selon les besoins.[6-8]

L'opération de l'interrupteur est généralement associée à celle d'un variateur, permettant ainsi de moduler le flux de courant électrique traversant le circuit. Cela offre la possibilité de régler l'intensité

lumineuse ou la puissance de l'appareil connecté, fournissant ainsi une flexibilité dans l'utilisation de l'électricité.[7]

Il est crucial de noter que l'utilisation d'un interrupteur doit être accompagnée d'une considération sérieuse en matière de sécurité électrique. Ainsi, il est typiquement jumelé à un dispositif de protection tel qu'un disjoncteur divisionnaire ou des fusibles. Ces composants assurent la sécurité du circuit en détectant et en réagissant aux situations de surcharge ou de court-circuit potentielles, en interrompant rapidement le flux de courant pour prévenir tout dommage ou risque d'incendie.[8-9]

En résumé, l'interrupteur joue un rôle central dans la régulation de l'électricité, permettant un contrôle précis de la distribution du courant électrique tout en garantissant la sécurité des installations et des utilisateurs.

### **I-3.1 transistors bipolaires :**

Un transistor bipolaire est l'un des types de transistors les plus couramment utilisés en électronique. Il est composé de trois régions de semi-conducteurs : une région émettrice, une région de base et une région collectrice. Ces régions sont généralement fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium ou le germanium.[11-12]

Voici un aperçu des transistors bipolaires, en couvrant leur structure de base, leurs types, leur fonctionnement, leurs applications et leurs avantages :

#### **Structure de base :**

Les transistors bipolaires sont composés de trois régions de semi-conducteurs : la région émettrice (E), la région de base (B) et la région collectrice (C). Ces régions peuvent être soit du type NPN (Négatif Positif-Négatif) soit du type PNP (Positif-Négatif-Positif). Dans un transistor NPN, la région émettrice est de type Négatif, la région de base est de type Positif, et la région collectrice est de type Négatif. Pour un transistor PNP, c'est l'inverse. Les transistors bipolaires sont généralement encapsulés dans un boîtier pour les protéger des dommages physiques et environnementaux.[11.12]

#### **Type :**

Les transistors bipolaires sont classés en deux types principaux : les transistors NPN et les transistors PNP. La différence réside dans le type de dopage des régions semi-conductrices. Dans un transistor NPN, les régions émettrice et collectrice sont dopées négativement, tandis que la région de base est dopée positivement. Dans un transistor PNP, c'est l'inverse : les régions émettrice et collectrice sont dopées positivement, tandis que la région de base est dopée négativement.[11]

#### **Fonctionnement :**

Le fonctionnement d'un transistor bipolaire repose sur le contrôle du courant entre la région émettrice et la région collectrice par le courant appliqué à la région de base. Lorsque le transistor est en mode actif, un petit courant de base contrôle un courant beaucoup plus grand entre l'émetteur et le collecteur. Cela permet au transistor bipolaire d'être utilisé comme un amplificateur de courant ou comme un commutateur électronique.[10]

#### **Applications :**

Les transistors bipolaires sont largement utilisés dans de nombreuses applications électroniques, notamment dans les amplificateurs audio, les circuits logiques, les circuits de puissance, les radios, les téléviseurs, les équipements de communication, etc.

**Avantage : [ 10]**

Amplification de courant : Les transistors bipolaires peuvent amplifier des signaux de courant faibles en des signaux de courant plus forts.

Faible impédance d'entrée : Ils ont une faible impédance d'entrée, ce qui signifie qu'ils peuvent être facilement utilisés dans des circuits où une charge faible est requise.

Rapidité de commutation : Les transistors bipolaires peuvent commuter rapidement entre les états actif et bloqué, ce qui les rend adaptés aux applications nécessitant une commutation rapide.

Compatibilité : Ils sont compatibles avec une large gamme de tensions et de courants, ce qui les rend polyvalents pour de nombreuses applications électroniques.

Cependant, ils peuvent présenter des inconvénients tels qu'une consommation d'énergie plus élevée et une sensibilité accrue à la température par rapport aux transistors à effet de champ (FET). [10]

**I-3.2 Transistor à effet de champ :**

Les transistors à effet de champ (FET) sont des dispositifs électroniques à semi-conducteurs qui utilisent un champ électrique pour contrôler le courant qui circule à travers un canal conducteur. Voici quelques caractéristiques clés des transistors à effet de champ : [13]

**Structure de base :**

Les transistors à effet de champ sont généralement constitués de trois régions : la source, le drain et la grille. Le courant circule entre la source et le drain à travers un canal semi-conducteur, et la grille contrôle ce courant en modifiant la conductivité du canal. [14]

**Types**

Il existe plusieurs types de transistors à effet de champ, parmi lesquels les plus courants sont les transistors à effet de champ à grille métal-oxyde-semiconducteur (MOSFET) et les transistors à effet de champ à grille métal-semiconducteur (MESFET). Les MOSFET sont souvent utilisés dans les applications numériques et analogiques, tandis que les MESFET sont couramment utilisés dans les applications à haute fréquence. [14]

**Fonctionnement :**

Dans un MOSFET, le courant entre le drain et la source est contrôlé par la tension appliquée à la grille. Lorsqu'une tension est appliquée à la grille, elle crée un champ électrique qui modifie la conductivité du canal entre le drain et la source, contrôlant ainsi le courant qui circule à travers le transistor. Dans un MESFET, le fonctionnement est similaire, mais le matériau de la grille est directement en contact avec le canal semi-conducteur, ce qui permet des performances à haute fréquence. [2]

**Applications :**

Les transistors à effet de champ sont largement utilisés dans de nombreuses applications électroniques, y compris les circuits intégrés, les amplificateurs, les circuits de commutation, les capteurs, les convertisseurs de puissance et les circuits hauts fréquence. [2]

**Avantage :**

Les FET offrent plusieurs avantages par rapport aux autres types de transistors, notamment une faible consommation d'énergie, une haute impédance d'entrée, une grande vitesse de commutation, une stabilité thermique et une compatibilité avec les technologies de fabrication de semi-conducteurs modernes. [14]

## I-4. Portes logique :

### I-4.1 Les portes logiques de base :

#### Porte NOT (NON) :

Il a 1 entrée, 1 sortie [15]

Fonction: Inverse l'entrée

Tableau 1 : des entrées et sortie

A	$\bar{A}$
0	1
1	0

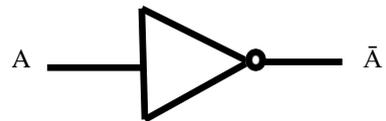


Figure 2 : symbole de porte not

#### Porte AND (ET) :

2 entrées, 1 sortie

Le produit logique de 2 variables  $A.B$  vaut 1 si et seulement si A et B valent 1.

Tableau 2 : des entrées et sortie

A	B	$A.B$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

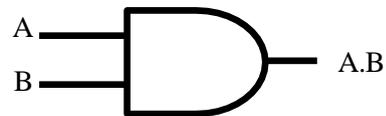


Figure 3 : symbole de porte and

#### Porte OR (OU) :

2 entrées, 1 sortie

L'addition logique de 2 variables se note  $A+B$  vaut 0 si et seulement si A et B valent 0. [15]

Tableau 3 : des entrées et sortie

A	B	$A+B$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1



Figure 4 : symbole de porte OR

### I-4.2 Les portes logiques secondaires

#### Porte XOR (OU exclusif) :

2 entrées, 1 sortie

Produit une sortie vraie (1) si une et seulement une des entrées est vraie (1) [15]

Tableau 4: des entrées et sortie

A	B	A+B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

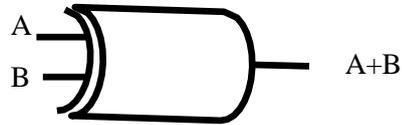


Figure 5 : symbole de porte XOR

**Porte NAND (NON-ET) :**

2 entrées, 1 sortie

L'inverse de l'opération ET

Tableau 5 : des entrées et sortie

A	B	$\bar{A}.B$
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



Figure 6 : symbole de porte NAND

**Porte NOR (NON-OU) :**

2 entrées, 1 sortie

L'inverse de l'opération OU

Tableau 6 : des entrées et sortie

A	B	$\bar{A+B}$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

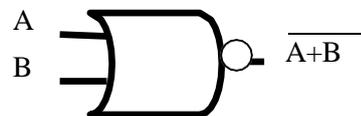


Figure 7 : symbole de porte NOR

**I-5. Matérialisation des portes logiques à partir des mosfet de type P et type N**

**Transistors CMOS : structure générale**

Un transistor MOS (Métal-Oxyde-Semi-conducteur) se compose de trois terminaux :

- Une source
- Un drain
- Une grille de contrôle

Dans des conditions normales, la source et le drain sont électriquement isolés, Le courant peut circuler entre la source et le drain lorsque des charges électriques sont attirées dans le canal sous l'influence d'une tension électrique appliquée à la grille de contrôle.

Il existe deux types complémentaires de transistors

MOS : NMOS et PMOS, d'où l'acronyme CMOS. [16]

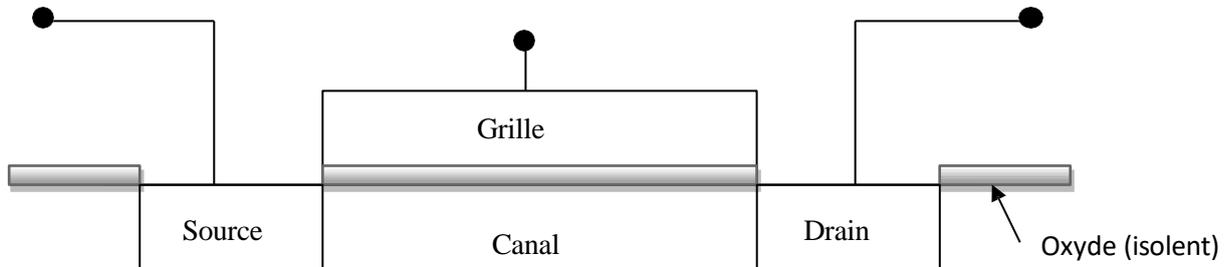


Figure 8 : structure de transistors CMOS

Dans un cristal pur de silicium, les atomes établissent quatre liaisons covalentes avec leurs voisins, complétant ainsi leur dernière couche électronique en partageant des électrons. Lorsqu'on dope le silicium en y introduisant des impuretés, deux types de dopage sont distingués en fonction des éléments ajoutés. Le dopage de type n, utilisant des éléments tels que le phosphore, l'arsenic ou l'antimoine, crée des semi-conducteurs où l'atome dopant possède un électron supplémentaire, rendant cet électron relativement libre [17]

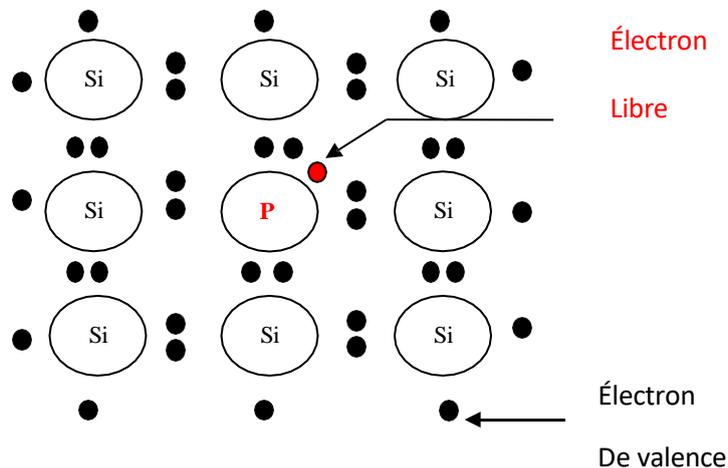


Figure 9 : Dopages n du silicium

Lorsqu'il est dopé avec des éléments à 3 électrons covalents tels que le bore, l'aluminium et le gallium, nous l'appelons un semi-conducteur de type p (positif). Un atome avec 3 électrons covalents ne peut former que 3 liaisons covalentes. D'une manière ou d'une autre, des trous électroniques existent [17]

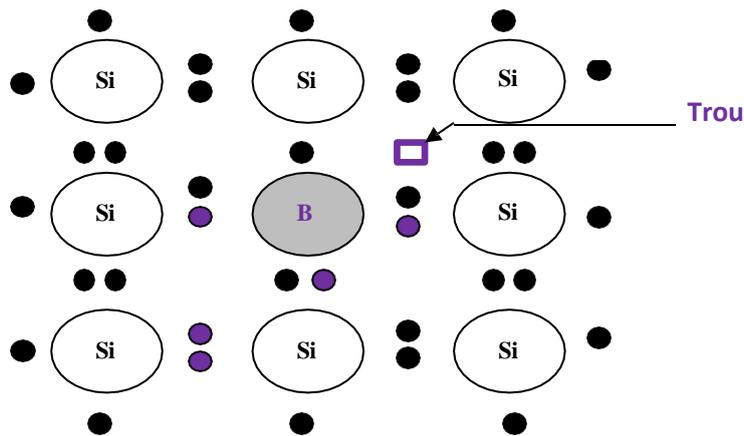


Figure 10 : Dopages p du silicium

### Diode

Diode Une jonction entre un semi-conducteur n et p forme une diode, où la partie n'est la cathode et la partie p est l'anode. Le courant ne peut circuler que dans un sens, indiqué par le symbole en forme d'entonnoir. Les électrons du semi-conducteur n comblent les trous du semi-conducteur p, créant un champ électrique. Lorsqu'une tension positive est appliquée à la cathode et négative à l'anode, la diode est non conductrice. Mais si la polarité est inversée, la diode devient conductrice [18]



FIGURE 11 : diode

### NMOS

C'est un commutateur reliant la source et le drain si la tension grille-source est supérieure à  $V_{th}$  (environ 1V).

Dispositif activé par tension grille-source positive

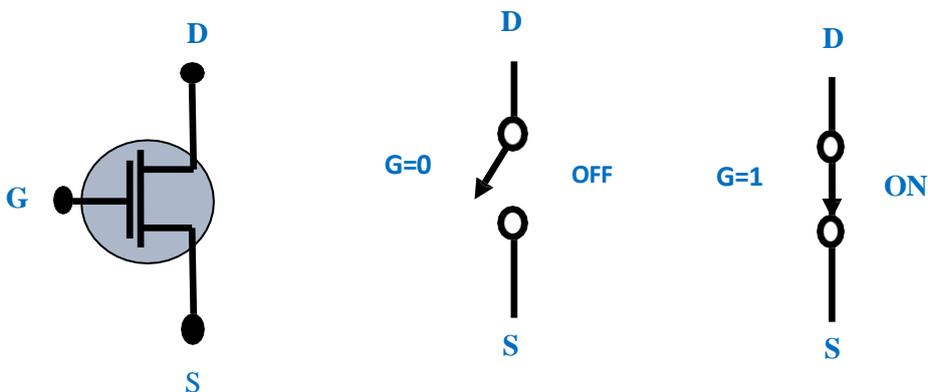


Figure 12 : Nmos transistor

## PMOS

C'est un commutateur qui connecte la source et le drain, si la tension grille-source est inférieure à  $V_{th}$  (environ -1V)

Une tension grille-source négative active l'appareil... et il n'y a pas de courant dans la grille [19]

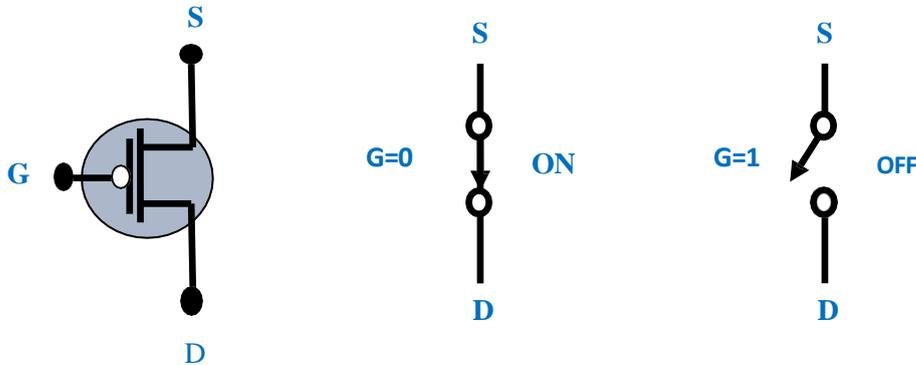


Figure 13 : Pmos transistor

## L'inverseur CMOS

La fonction d'inversion (ou non) est l'une des briques fondamentales de l'électronique numérique. Il s'agit de convertir un niveau logique en son niveau opposé (de haut en bas ou de bas en haut). Son symbole et sa structure électrique sont illustrés à la Figure, En technologie CMOS, un inverseur est constitué de deux transistors MOSFET (NMOS et PMOS) de polarité opposée. [20]

Les inverseurs CMOS contiennent :

- un transistor PMOS connecté à l'alimentation ;
- Transistor NMOS connecté à la masse.
- Signal d'entrée appliqué au la grille transistor.
- Le signal de sortie est connecté au drain du transistor.
- Lorsque  $A = '1'$ , le transistor NMOS est passant et la sortie F est connectée à la masse en '0'.
- Lorsque  $A = '0'$ , le transistor PMOS est passant et la sortie F est connectée à l'alimentation et est à "1" [21]

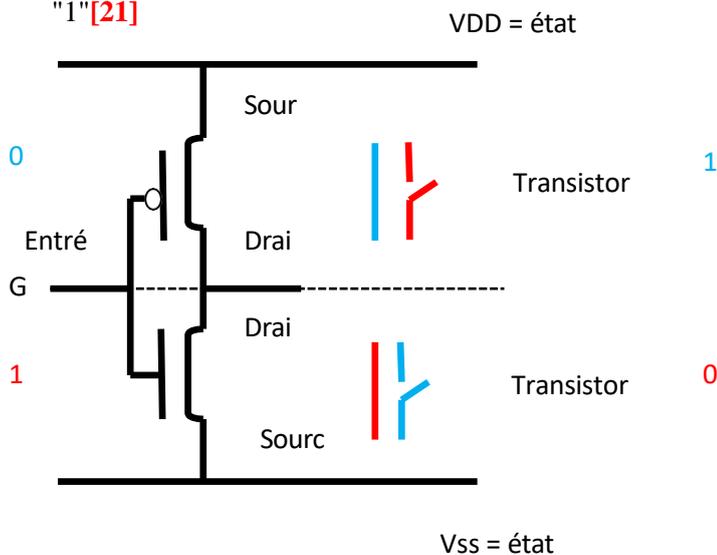


Figure 14 : structure électrique d'un inverseur CMOS

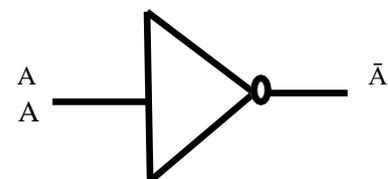


figure 15 : symbole d'un inverseur

Lorsque l'on fait varier le potentiel d'entrée  $V_{in}$  du montage de 0V à la tension d'alimentation notée  $V_{dd}$ , sa tension de sortie  $V_{out}$  varie de  $V_{dd}$  à 0V. On constate que lorsque  $V_{in}$  est proche de 0V ou de  $V_{dd}$ , un seul transistor conduit et l'autre est bloqué

Lorsque l'entrée est à 0

. Le transistor NMOS est bloqué (interrupteur ouvert)

$V_{in} = V_{ss}$  ;  $I_{ds} = 0$

. Le transistor PMOS est passant (interrupteur fermé se comporte comme une résistance)

$V_{in} = V_{ss}$  ;  $V_{gs} = V_{dd}$  ;  $I_{ds} \neq 0$

La sortie est reliée à la tension d'alimentation par l'intermédiaire du transistor PMOS, et isolée de la tension de référence par le transistor NMOS [22]

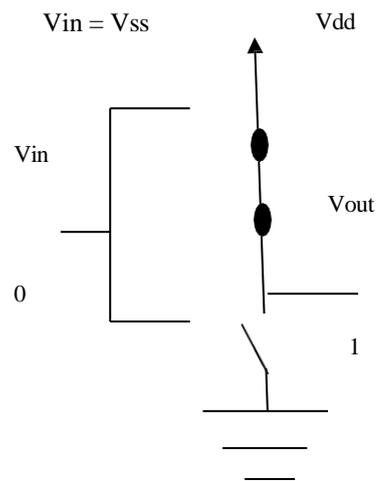


Figure 16 : fonctionnement de l'inverseur l'entrée 0

Lorsque l'entrée est à 1

. Le transistor NMOS est passant (interrupteur fermé se comporte comme une résistance)

$V_{in} = V_{ss}$  ;  $I_{ds} \neq 0$

Le transistor PMOS est bloqué (se comporte comme un interrupteur ouvert)

$V_{in} = V_{dd}$  ;  $V_{gs} > V_t$  ;  $I_{ds} = 0$

La sortie est reliée à la tension de référence par l'intermédiaire du transistor NMOS, et isolée de la tension d'alimentation par le transistor PMOS [22]

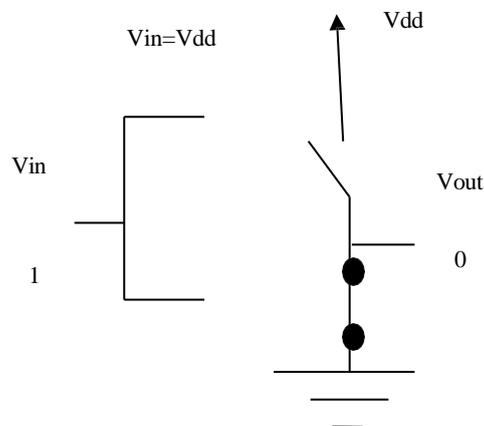


Figure 17 : fonctionnement de l'inverseur l'entré

## I-6.Circuit intégrés aux portes logiques

### Porte NAND en CMOS :

Utilisation de transistors NMOS en série et de transistors PMOS en parallèle pour maintenir la sortie basse lorsque tous les transistors NMOS sont activés, et permettre la sortie haute si l'un d'eux est désactivé, assurant que la sortie est basse seulement lorsque toutes les entrées sont hautes [23]

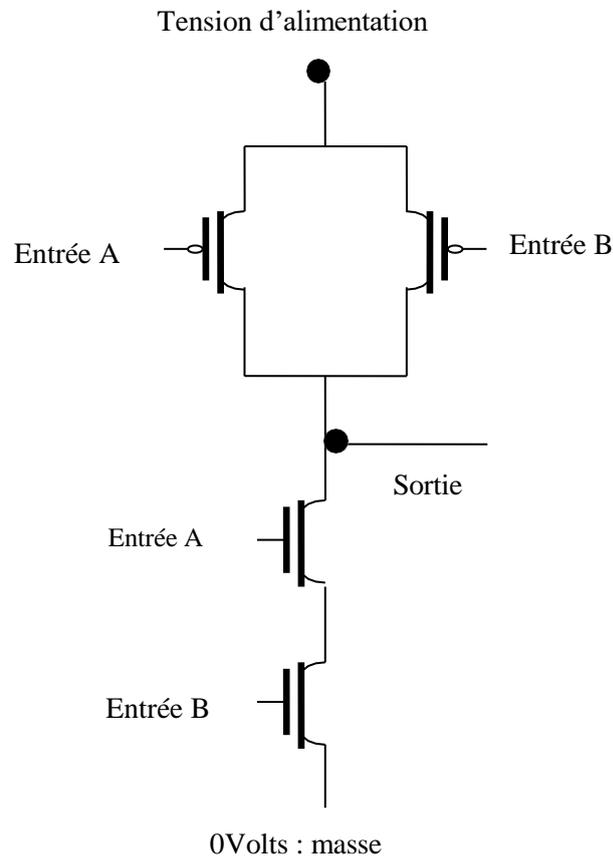


FIGURE 18 : porte NAND en cmos statique

### Porte NOR en CMOS :

Utilisation de transistors NMOS en parallèle et de transistors PMOS en série pour permettre à la sortie de monter à un niveau logique haut lorsque tous les transistors NMOS en amont sont désactivés, maintien de la sortie à un niveau logique bas si l'un des transistors PMOS en aval est activé, assurant que la sortie est haute uniquement lorsque toutes les entrées sont basses [23]

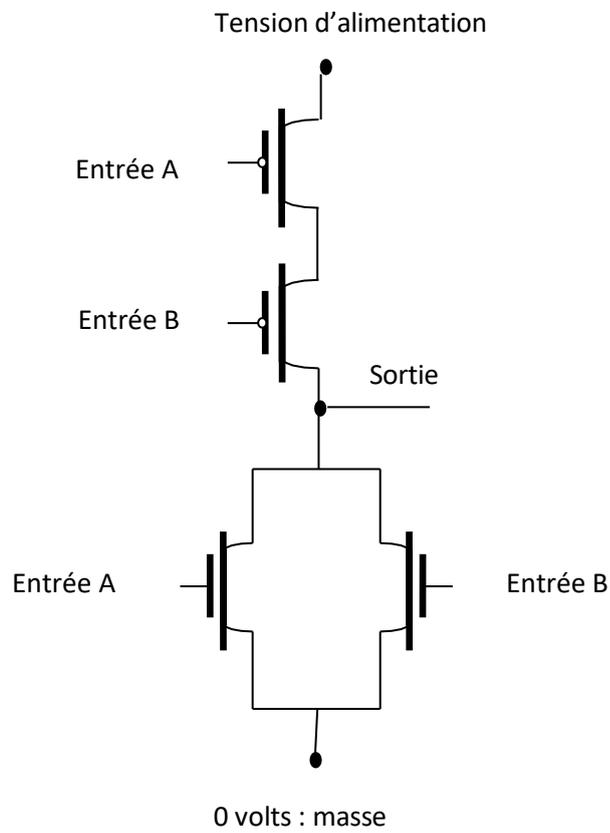


FIGURE 19: porte NOR en cmos statique

**Porte XOR en CMOS :**  $a+b = (a \wedge \bar{b}) (\bar{a} \wedge b)$

VAUT 0 SI  $a=b$

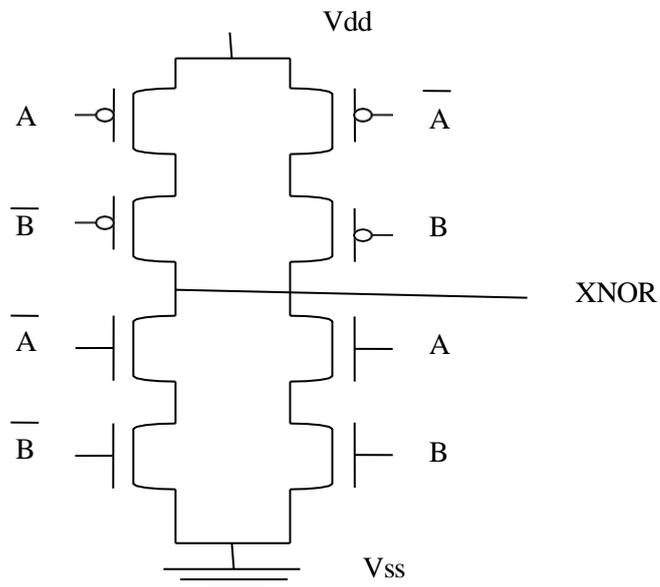


Figure 20 : porte XOR en CMOS

## **I-7. Conclusion :**

La physique des semi-conducteurs constitue le fondement de l'électronique moderne, permettant la conception et la fabrication de dispositifs électroniques sophistiqués. Les interrupteurs électroniques, tels que les transistors bipolaires et les transistors à effet de champ, jouent un rôle crucial dans le contrôle et la manipulation du courant électrique. Ces composants sont la base des portes logiques, qui sont des éléments essentiels dans les circuits numériques et les systèmes informatiques.

En utilisant des MOSFET de type P et de type N, les portes logiques peuvent être matérialisées, offrant une grande flexibilité dans la conception de circuits numériques complexes. Ces portes logiques peuvent être intégrées dans des circuits intégrés, permettant la miniaturisation et l'intégration de plusieurs fonctions dans un seul dispositif. Les circuits intégrés aux portes logiques sont omniprésents dans les technologies modernes, des ordinateurs aux smartphones en passant par les appareils électroniques grand public.

On conclut, la physique des semi-conducteurs, les interrupteurs électroniques et les portes logiques sont des éléments fondamentaux de l'électronique moderne, ouvrant la voie à une multitude d'applications dans tous les domaines de la technologie et de la société

# CHAPITRE II

## SUPPORT SEQUENTIEL

### D'UN ADDITIONNEUR A PLUSIEURS BITS

#### II-1.Introduction

Un semi-additionneur ou un additionneur complet est un circuit numérique qui effectue une addition numérique. Dans les ordinateurs et autres types de processeurs, les additionneurs sont principalement utilisés dans les unités arithmétiques et logiques (ALU). Ils sont également utilisés dans d'autres parties du processeur pour calculer les adresses, les index de table et les opérateurs d'incrément et de décrémentation en mémoire, ainsi que pour des opérations similaires liées à la conception du processeur. [24]

Par exemple, il existe de nombreux types d'additionneurs, et bien que les additionneurs puissent être construits pour de nombreuses représentations de nombres, telles que le codage décimal binaire ou supérieur à 3, les additionneurs les plus courants fonctionnent avec des nombres binaires. Dans le cas de l'utilisation du complément à deux ou du complément à un pour représenter des nombres négatifs, il est trivial de modifier un additionneur en additionneur-soustracteur. D'autres représentations de nombres signés nécessitent plus de logique autour des additionneurs de base. [25]

Les additionneurs multi-bits fonctionnent de manière séquentielle, traitant les bits d'entrée un par un, du bit de poids faible (LSB) au bit de poids fort (MSB). A chaque étape, les bits correspondants des deux nombres à additionner sont considérés. L'addition se fait à l'aide d'un demi-additionneur ou d'un additionneur complet, en tenant compte des retenues des étapes précédentes. [26]

#### II-2.Calculateur numérique

Un calculateur numérique est un système informatique dont la fonction est d'effectuer certaines opérations de calcul sur des chaînes de nombres de taille limitée mais non négligeable. paninformatique explicatif [27]

Un calculateur numérique est une machine informatique composée de quatre types principaux de composants numériques connectés de manière appropriée : périphériques d'entrée, périphériques de sortie, unités de stockage et unités de traitement. Les calculatrices ont une plus grande puissance de calcul que les mécanismes informatiques plus simples tels que les portes logiques ou les unités logiques arithmétiques, mais les calculatrices ordinaires ont une puissance de calcul limitée par rapport aux ordinateurs [27]

Un calculateur numérique est un système ou un ensemble de blocs constitués de composants et de circuits numériques qui fonctionnent ensemble pour exécuter un programme bien défini. Cette dernière est constituée d'instructions codées et stockées en mémoire ainsi que de données sur lesquelles le programme s'exécute. Lorsqu'un calculateur reçoit une commande pour exécuter un programme, il

suit et obéit à certaines commandes jusqu'à la fin du programme. D'un autre côté, un calculateur numérique n'est rien d'autre qu'une machine ultra-rapide qui traite des données, résout des problèmes et prend des décisions sous la direction d'un programme. Un calculateur numérique peut être un automate programmable industriel, un micro-ordinateur ou tout autre système basé sur un ou plusieurs microprocesseurs. [28]

### II-3.Circuit additionneur numérique

Un additionneur est un circuit logique permettant de réaliser une addition. On dénombre deux types d'additionneurs : parallèle (circuit combinatoire) et série (circuit séquentiel). Dans la classe des additionneurs parallèles, nous décrirons ici ceux à propagation de retenue et ceux à retenue anticipée. [29]

#### II-3.1Circuit semi additionneur

Le demi-additionneur effectue la somme de deux bits. S est la somme et R le report (carry). Le demi-Additionneur ne tient pas compte d'une retenue antérieure.

Tableau7 : tableau de vérité de semi additionneur

A	B	R	S
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

$$R = A.B$$

$$S = \bar{A}.B + A.\bar{B} = A \oplus B$$

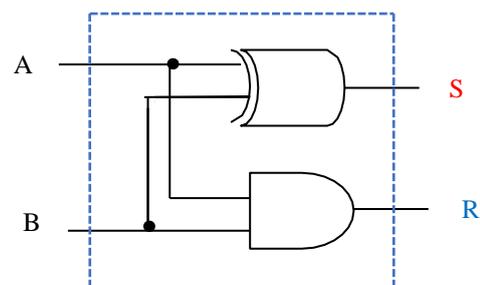


Figure 21 : Logigramme et l'équation de sortie de semi additionneur

Cependant, ce schéma n'est pas suffisant pour réaliser la somme des quantités de plusieurs bits. Nous pouvons clairement voir que l'addition arithmétique sur 1 bit est similaire au XOR. [30]

#### II-3.2Circuit additionneur complet

Un additionneur complet réalise l'addition de deux bits  $b_0$  et  $b_1$ , plus le report  $C_i$ , en produisant le bit de résultat  $S_i$  et le bit de report  $C_{i+1}$

b0	b1	R0	R1	S1
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

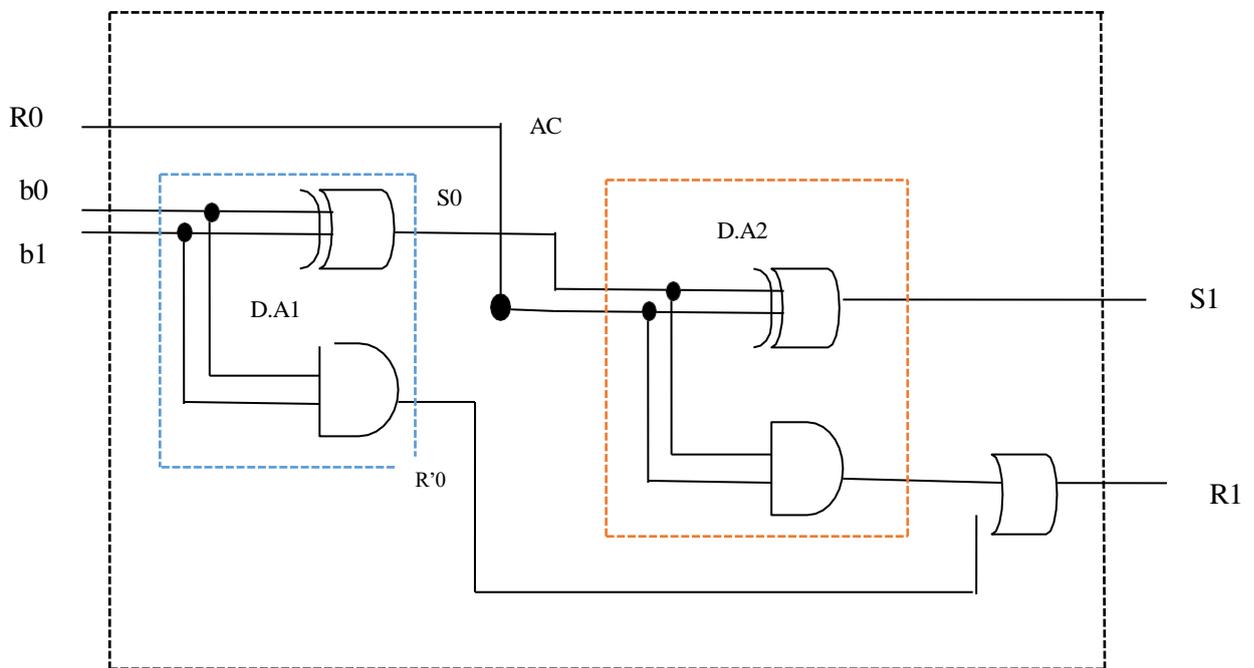


Figure 22 : logigramme d'un additionneur complet

A l'aide d'un additionneur complet, il est possible de réaliser itérativement un additionneur à n bits [31]

### II-3.3 Circuit additionneur en cascade

Un circuit additionneur en cascade est une configuration de circuit logique dans laquelle plusieurs additionneurs sont interconnectés pour effectuer l'addition de nombres plus grands que ce que chaque additionneur individuel peut gérer. [32]

## II-4. Codeur et décodeur

### II-4.1 Codeur

Il s'agit d'un circuit comportant  $2n$  entrées et  $n$  sorties, utilisé pour coder un nombre décimal en binaire ou en BCD. Ce nombre  $n$ 'est appliqué à l'entrée de l'encodeur (une seule entrée active à la fois). Lorsqu'une des lignes d'entrée est activée, l'encodeur produit en sortie un mot de  $n$  bits correspondant au codage de l'information identifiée par la ligne activée. Par exemple, un encodeur 8 vers 3 possède 8 entrées et 3 lignes de sortie pour les adresses. [33]

Tableau 9 : table de vérité de codeur

Entrée	S	S	S
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1

La Figure 23 représente un encodeur avec huit entrées et trois sorties. Il est aussi appelé un encodeur octal-binaire, car il génère des codes binaires en sortie en fonction des conditions d'entrée. La table de vérité correspondante est fournie ci-dessous.

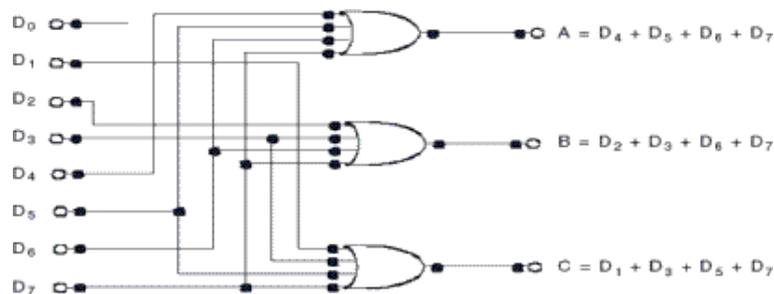


Figure 23 : logigramme codeur de 8 entrées et 3 sorties [33]

Tableau 10 : tableau de vérité codeur de 8 entrées et 3 sorties

Input								Output		
D <sub>0</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>7</sub>	A	B	C
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1

Le codeur représenté sur la figure 23 fonctionne sur le principe selon lequel une seule ligne d'entrée est activée à la fois dans l'état logique 1, sinon le fonctionnement du circuit serait incohérent. Il est

important de noter que bien qu'il existe 256 combinaisons possibles de 8 entrées ( $2^8 = 256$ ), seules 8 combinaisons d'entrées sont réellement utilisées et les autres ne sont pas prises en compte.

Il est important de noter que l'entrée D0 n'est connectée à aucune porte du circuit. Ainsi, dans ce cas, toutes les sorties binaires A, B et C seront forcées à 0. De plus, si toutes les variables d'entrée D0 à D7 sont également 0, toutes les sorties seront également 0. Cette caractéristique représente la principale particularité de ce circuit. Pour tenir compte de cet écart, une autre sortie peut être introduite pour indiquer que toutes les entrées ne sont pas à 0 logique. . [33]

Cependant, ce type de codeur n'est pas disponible dans un boîtier de circuit intégré car il est difficile à mettre en œuvre avec des portes OU et nécessite une utilisation limitée des portes. Le type de codeur disponible dans les boîtiers de circuits intégrés est appelé codeur prioritaire. Ces codeurs donnent la priorité à l'entrée pour garantir que seule l'entrée ayant la priorité la plus élevée est codée. Par exemple, si les entrées D2 et D4 sont toutes deux à 1 logique, la sortie sera déterminée par D4 uniquement, c'est-à-dire que la sortie sera 100[34]

## II-4.2Décodeur

Décodeur :

- Il comporte n entrées et  $2^n$  sorties.
- Chaque sortie représente un minterme d'une fonction à n variables.
- La sortie correspondant au minterme spécifié par les entrées est activée (soit à un niveau bas, soit à un niveau haut selon le type de décodeur), tandis que toutes les autres sorties sont désactivées. [35]

Tableau 11 : table de vérité Décodeur 1 à 2 avec entrée enable

EN	SEL	S1	S0
0	0	0	0
0	1	0	0
1	0	0	1
1	1	1	0

Dans les systèmes numériques, les informations discrètes sont représentées par des codes binaires. Un code binaire de n bits peut coder jusqu'à  $2^n$  éléments d'information différents. Un décodeur est un circuit combinatoire qui convertit n bits d'informations binaires dans une ligne d'entrée en jusqu'à  $2^n$  lignes de sortie uniques. Généralement, un décodeur est appelé décodeur de lignes n à m, où n est le nombre de lignes d'entrée et m ( $= 2^n$ ) est le nombre de lignes de sortie. [ 35]

Les décodeurs ont de nombreuses applications dans les systèmes numériques, telles que le démultiplexage de données, l'affichage numérique, la conversion numérique analogique, l'adressage mémoire, etc. La figure 1 montre un exemple de décodeur 3 à 8.

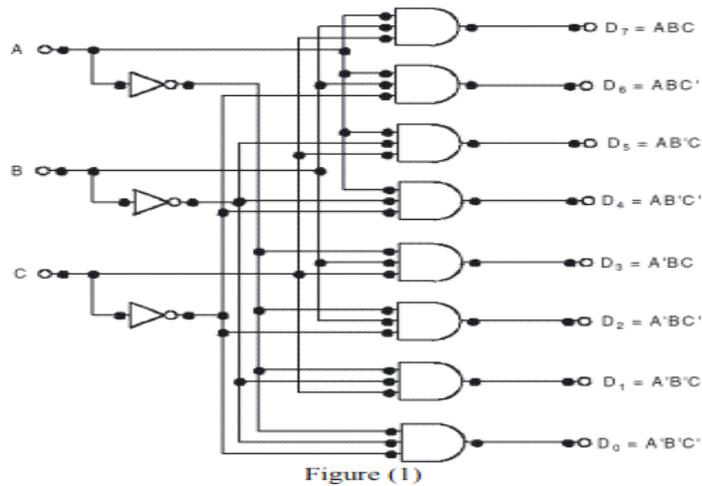


Figure 24 : un exemple de décodeur 3 à 8 [36]

Tableau 12 : tableau de vérité

Input			Output							
A	B	C	D <sub>0</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>6</sub>	D <sub>7</sub>
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1

Le décodeur 3 vers 8 est constitué de trois variables d'entrée et de huit lignes de sortie. Chaque ligne de sortie représente l'un des mintermes générés à partir des trois variables d'entrée. Le circuit combinatoire interne est réalisé à l'aide de portes NON (INVERSEUR) et de portes ET (AND). Le fonctionnement du circuit décodeur peut être expliqué plus en détail en se basant sur la relation entrée-sortie présentée dans le tableau ci-dessus. Il est important de noter que les sorties sont mutuellement exclusives, ce qui signifie qu'une seule sortie peut être à l'état logique 1 à la fois. [36]

## II-5. Les registres

### Définition :

Les registres sont les composants fondamentaux des mémoires construites à partir de semi-conducteurs. Un registre peut être envisagé comme un groupe de cellules de mémoire élémentaires, chacune capable de stocker un bit. Les données peuvent être entrées dans un registre soit de manière sérielle (une après l'autre), soit de manière parallèle (toutes en même temps). De même, les données peuvent être présentées en sortie soit de manière sérielle, soit de manière parallèle. Ainsi, il existe quatre

modes de fonctionnement différents pour les registres : parallèle-série, parallèle-parallèle, série-parallèle et série-série.

Un registre est caractérisé par :

- *Sa capacité de mémorisation (nombre de bits)*
- *Son mode d'écriture (série ou parallèle)*
- *Son mode de lecture (série ou parallèle) [37,38]*

### **II-5.1 Registres à décalage**

- Un registre à décalage est un circuit électronique utilisé pour stocker et déplacer des données binaires de manière séquentielle ou parallèle. Il est constitué d'une série de bascules (ou flip-flops) connectées de manière à permettre le déplacement des données à l'intérieur du registre. Les registres à décalage sont largement utilisés dans les applications numériques telles que le stockage temporaire de données, le décalage de bits, la conversion de données série-parallèle ou parallèle-série, et dans diverses opérations logiques et arithmétiques.) [37-39]

#### **II-5.1.1 Registre à décalage série :**

- Dans un registre à décalage série, les données sont déplacées séquentiellement, un bit à la fois, à travers le registre. Ce type de registre est souvent utilisé pour des applications nécessitant une transmission de données série, comme les communications série entre dispositifs électroniques. [39]
- Le fonctionnement d'un registre à décalage série peut être illustré par un exemple simple : imaginez un enregistrement de bits dans une file d'attente. Chaque bit est déplacé vers la sortie du registre, avec le bit suivant prenant sa place à chaque étape. [39]

#### **II-5.1.2 Registre à décalage parallèle :**

- Contrairement au registre à décalage série, un registre à décalage parallèle déplace simultanément tous les bits stockés dans le registre. [40]
- Ce type de registre est souvent utilisé pour des opérations qui nécessitent le traitement simultané de plusieurs bits, comme le stockage temporaire de données dans un processeur ou le transfert de données entre des composants électroniques. [40]

### **II-5.2 Types de Registre à décalage :**

On distingue 4 types de registre à décalage :

- Registre à entrée série et sortie série (SISO)
- Registre à entrée série et sortie parallèle (SIPO)
- Registre à entrée parallèle et sortie série (PISO)
- Registre à entrée parallèle et sortie parallèle (PIPO)

**a- Registre a entrée série et sortie série (SISO) :**

Dans un registre SISO (Série in Série Out), à chaque impulsion d'horloge, l'écriture n'est possible que dans une bascule (lorsqu'il n'y a pas de connexion entre deux bascules, l'écriture se fait dans celle dont l'entrée n'est pas reliée à une autre bascule), tandis que la lecture est permise dans une autre bascule (lorsqu'il n'y a pas de connexion entre deux bascules, la lecture se fait dans celle dont la sortie n'est pas reliée à une autre bascule). [41-44]

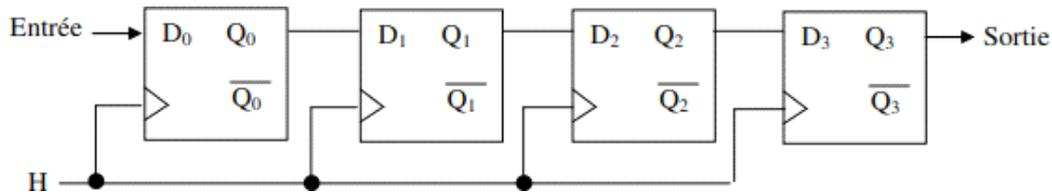


Figure 25 : registre SISO [63]

**b- Registre a entrée série et sortie parallèle (SIPO) :**

Dans un registre SIPO (Série in Parallèle Out), à chaque pulsation d'horloge, l'écriture est possible uniquement dans une bascule (lorsqu'il n'y a pas de connexion entre deux bascules, l'écriture se fait dans celle dont l'entrée n'est pas reliée à une autre bascule). Cependant, la lecture des valeurs est autorisée pour toutes les bascules. [41-44]

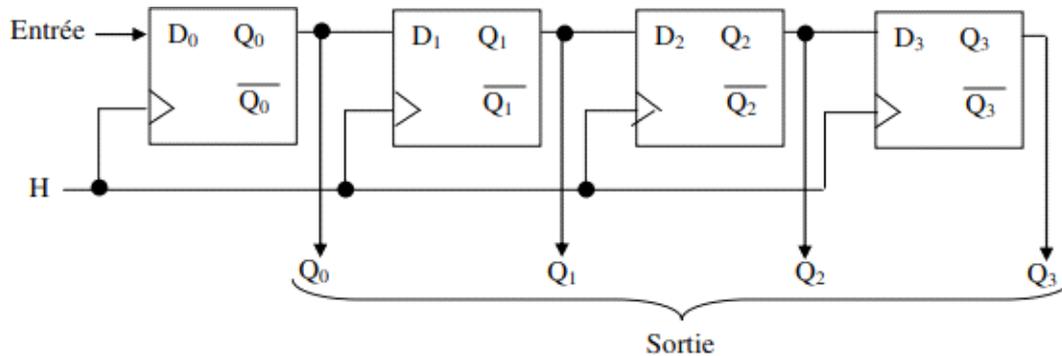


Figure 26 : registre SIPO [63]

**c- Registre a entrée parallèle et sortie série (PISO) :**

Dans un registre PISO (Parallèle in Série Out), à chaque pulsation d'horloge, il est possible d'assigner une valeur à toutes les bascules simultanément. Cependant, la lecture est restreinte à une seule bascule (lorsqu'il n'y a pas de connexion entre deux bascules, la lecture se fait dans celle dont la sortie n'est pas reliée à une autre bascule). [41-44]

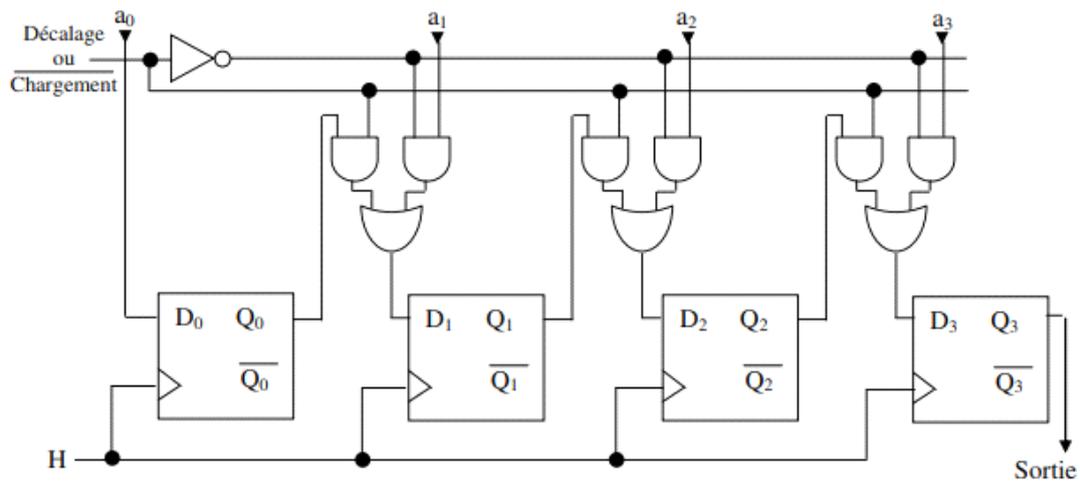


Figure 27 : registre PISO [63]

**d- Registre a entrée parallèle et sortie parallèle (PIPO) :**

Dans un registre PIPO (Parallèle en Parallèle Out), à chaque impulsion d'horloge, il est possible d'assigner une valeur à toutes les bascules simultanément, et toutes les valeurs peuvent être lues également. [41-44]

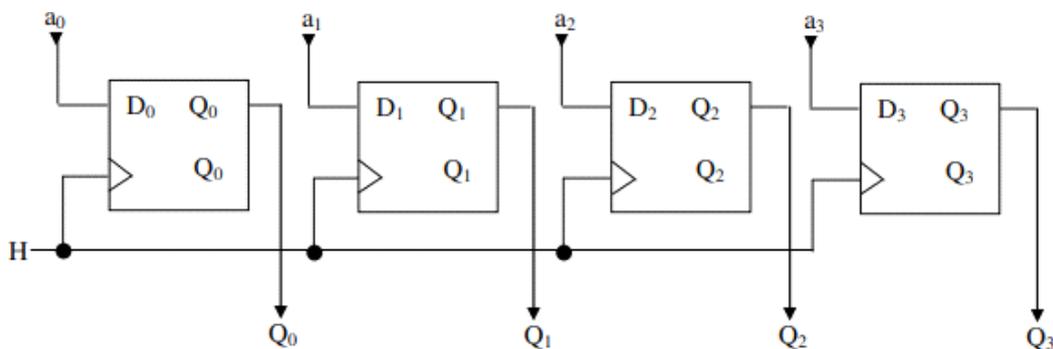


Figure 28 : registre PIPO [63]

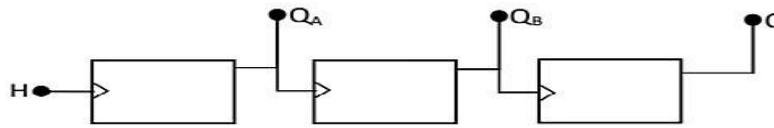
**II-6.Registre Compteur numérique**

**Définition :**

Un compteur numérique est un circuit électronique utilisé pour compter des événements, des impulsions ou des cycles de manière précise en utilisant une représentation binaire des nombres. Il peut être réalisé à l'aide de bascules (flip-flops) connectées de manière appropriée pour effectuer une séquence de comptage. [ 42]

**II-6.1 Compteur Asynchrone :**

Ce type de compteur utilise des bascules déclenchées par des transitions de signal d'horloge pour compter les événements. Chaque bascule représente un bit du compteur, et lorsque le compteur atteint sa valeur maximale, il revient à zéro. [42]



*Schéma d'un compteur Asynchrone*

*Figure 29 : schéma d'un compteur asynchrone*

## II-6.2 Compteur Synchrone :

Contrairement aux compteurs asynchrones, les compteurs synchrones utilisent une seule horloge pour déclencher toutes les bascules simultanément. Cela permet une synchronisation précise du comptage. [46]

## II-7 Conclusion

Dans ce chapitre sur le support séquentiel d'un additionneur à plusieurs bits, nous avons exploré les composants clés de l'architecture numérique, tels que le calculateur numérique, le circuit additionneur numérique, les codeurs et décodeurs, les registres à décalage et les compteurs numériques. Nous avons compris comment ces éléments interagissent pour effectuer des opérations arithmétiques et logiques essentielles. L'analyse approfondie des circuits semi-additionneur, additionneur complet et additionneur en cascade a dévoilé leurs nuances de fonctionnement et leurs diverses applications. De plus, nous avons mis en lumière le rôle crucial des registres à décalage dans le stockage et la manipulation de données, ainsi que l'utilité des compteurs numériques dans le suivi des événements. En maîtrisant ces concepts, les ingénieurs peuvent concevoir des systèmes numériques performants et fiables pour répondre à une variété de besoins dans différents domaines d'application.

# CHAPITRE III

## MICROPROCESSEUR-EXEMPLE D'UN SEQUENCEUR D'ADDITION DE DEUX CHIFFRES A DEUX BITS

### III.1 Introduction

Dans les chapitres : 1 et 2, nous avons expliqué à un certain niveau les éléments d'un calculateur pour avoir la possibilité d'expliquer le mécanisme de fonctionnement d'un microprocesseur. L'idée de mettre un chapitre sur le fonctionnement d'un microprocesseur c'est uniquement pour mettre en évidence l'utilité capitale d'une unité appelée unité de commande et de contrôle. À la fin de ce chapitre nous donnerons un exemple très simple d'unité de commande de contrôle relative à une addition de deux opérandes d'un seul chiffre décimal (4 bits) à travers les éléments suivants : codeur, registre et additionneur.

### III-2 Historique des microprocesseurs

Un MICROPROCESSEUR est un minuscule composant électronique principalement fabriqué en silicium, qui rassemble plusieurs transistors élémentaires interconnectés. En tant qu'unité centrale de traitement (CPU), il est chargé d'exécuter les instructions fournies par un programme.

#### Années 1970 :

L'Intel 4004, lancé en 1971, est considéré comme le premier microprocesseur commercialisé. Il avait une architecture 4 bits et était principalement utilisé dans des calculatrices et d'autres appareils électroniques spécialisés. [47-49]

En 1972, l'Intel 8008 a été introduit, suivi de l'Intel 8080 en 1974, qui a trouvé une utilisation plus répandue dans les premiers ordinateurs personnels et systèmes embarqués. [49]

#### Années 1980 :

L'Intel 8086, lancé en 1978, a été suivi de l'Intel 8088, utilisé dans le premier IBM PC en 1981. Ces processeurs ont jeté les bases de l'architecture x86, qui est toujours largement utilisée aujourd'hui.

L'introduction de l'Intel 80286 en 1982 a marqué le passage à l'architecture 16 bits, offrant des performances améliorées pour les PC et les stations de travail. [48-49]

#### Années 1990 :

L'Intel 80386, introduit en 1985, a été le premier processeur x86 à 32 bits, ouvrant la voie à des systèmes d'exploitation plus avancés comme Windows et Linux. [48]

Les années 1990 ont également vu l'émergence d'AMD en tant que concurrent majeur d'Intel avec le lancement de la série de processeurs AMD K5, K6 et K7. [47]

#### Années 2000 :

L'introduction de l'architecture x86-64 par AMD avec les processeurs AMD64 en 2003 a permis d'étendre la capacité d'adressage à 64 bits, offrant des performances accrues pour les applications

intensives en mémoire.

La concurrence entre Intel et AMD a conduit à des avancées constantes en termes de vitesse d'horloge, de nombre de cœurs et d'efficacité énergétique. [47-50]

### Années 2010 et au-delà :

L'évolution des microprocesseurs s'est orientée vers la réduction de la taille de gravure, permettant d'augmenter le nombre de transistors sur une puce et d'améliorer les performances tout en réduisant la consommation d'énergie. L'émergence des processeurs multi-cœurs et des architectures spécialisées, comme les GPU (Graphical Processing Units) pour les tâches de calcul intensif, a conduit à des systèmes informatiques de plus en plus polyvalents et performants.

Cette évolution continue des microprocesseurs a été alimentée par les besoins croissants en puissance de calcul dans divers domaines, notamment les ordinateurs personnels, les serveurs, les appareils mobiles, l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique et les supercalculateurs.

Date	Nom	Nombre de transistors	Finesse de gravure (nm)	Fréquence de l'horloge	Largeur des données	MIPS
1971	Intel 4004	2 300	10 000	740 kHz	4 bits/4 bits bus	0,08
1974	Intel 8080	6 000	6 000	2 MHz	8 bits/8 bits bus	0,64
1979	Intel 8088	29 000	3 000	5 MHz	16 bits/8 bits bus	0,33
1982	Intel 80286	134 000	1 500	6 à 16 MHz (20 MHz chez AMD)	16 bits/16 bits bus	1
1985	Intel 80386	275 000	1 500	16 à 40 MHz	32 bits/32 bits bus	5
1989	Intel 80486	1 200 000 (800nm)	1 000 à 800	16 à 100 MHz	32 bits/32 bits bus	20
1993	Pentium (Intel P5)	3 100 000	800 à 250	60 à 233 MHz	32 bits/64 bits bus	100
1997	Pentium II	7 500 000	350 à 250	233 à 450 MHz	32 bits/64 bits bus	300
1999	Pentium III	9 500 000	250 à 130	450 à 1 400 MHz	32 bits/64 bits bus	510
2000	Pentium 4	42 000 000	180 à 85	1,3 à 3,8 GHz	32 bits/64 bits bus	1 700
2004	Pentium 4 D (Prescott)	125 000 000	90 à 65	2,66 à 3,6 GHz	32 bits/64 bits bus	9 000
2006	Core 2 Duo (Conroe)	291 000 000	65	2,4 GHz (E6600)	64 bits/64 bits bus	22 000
2007	Core 2 Quad (Kentsfield)	2*291 000 000	65	3 GHz (Q6600)	64 bits/64 bits bus	2*22 000 (?)
2008	Core 2 Duo (Wolfdale)	410 000 000	45	3,33 GHz (E6700)	64 bits/64 bits bus	~24 200
2008	Core 2 Quad (Yorkfield)	2*410 000 000	45	3,2 GHz (QX9770)	64 bits/64 bits bus	~2*24 200
2008	Intel Core i7 (Bloomfield)	731 000 000	45	3,33 GHz (Core i7 975X)	64 bits/64 bits bus	?
2009	Intel Core i5/i7 (Lynnfield)	774 000 000	45	3,06 GHz (i7 880)	64 bits/64 bits bus	76 383
2010	Intel Core i7 (Gulftown)	1 170 000 000	32	3,47 GHz (Core i7 990X)	64 bits/64 bits bus	147 600
2011	Intel Core i3/i5/i7 (Sandy Bridge)	1 180 000 000	32	3,5 GHz (Core i7 2700K)	64 bits/64 bits bus	
2011	Intel Core i7/Xeon (Sandy Bridge-E)	2 270 000 000	32	3,5 GHz (Core i7 3970X)	64 bits/64 bits bus	1 ou 2
2012	Intel Core i3/i5/i7 (Ivy Bridge)	1 400 000 000	22	3,5 GHz (Core i7 3770K)	64 bits/64 bits bus	
2013	Intel Core i3/i5/i7 (Haswell)	1 400 000 000	22	3,8 GHz (Core i7 4770K)	64 bits/64 bits bus	
2014	Intel Core i3/i5/i7 (Broadwell)	1 400 000 000	14	3,8 GHz (Core i7 5775R)	64 bits/64 bits bus	
2015	Intel Core i3/i5/i7 (Skylake)	1 750 000 000	14	4 GHz (Core i7 6700K)	64 bits/64 bits bus	
2016	Intel Core i3/i5/i7 (Kabylake)	?	14	4,2 GHz (Core i7 7700K)	64 bits/64 bits bus	
2017	Intel Core i3/i5/i7 (Coffe Lake)	?	14	3,7 GHz ~ 4,7 GHz (Core i7 8700K)	64 bits/64 bits bus	
2018	Intel Core i3/i5/i7 (?)	?	14		64 bits/64 bits bus	
2018	Intel Core i3/i5/i7/i9 (Ice Lake)	?	10			
2019	Intel Core i3/i5/i7/i9 (Tigerlake)	?	10			

Figure 30 : Historique Processeurs INTEL. [50]

Année	architecture	marque commerciale
1982		Am286
1991		Am386
1993		Am486
1995		Am5x86
1996		K5
1997	K6	K6
		K6-2
		K6-3
1999	K7	Athlon
		Athlon XP
2001	K8	Athlon 64, Athlon 64 X2
2001 2007	K10	Athlon X2, Phenom
		Athlon II, Phenom II A4, A6, A8
2011	Bulldozer	FX, A4, A6, A8
2017	Zen	Ryzen, Athlon, Epyc, Threadripper

Figure 31 : Historique Processeurs AMD. [50]

### III-3 Constitution d'un Microprocesseur

La constitution d'un microprocesseur est un processus complexe qui implique plusieurs composants essentiels travaillant de concert pour permettre le fonctionnement d'un système informatique. Voici une vue d'ensemble des éléments clés :

#### III-3-1 Horloge :

L'horloge fournit une synchronisation précise pour coordonner les opérations de la CPU et d'autres composants du système. Elle émet des signaux réguliers qui déterminent le rythme d'exécution des instructions.

L'horloge d'un microprocesseur est bien plus qu'un simple métronome électronique ; c'est l'essence même de la synchronisation et de la temporalité au sein du système. Imaginez-le comme le chef d'orchestre invisible, dictant le rythme précis auquel chaque opération doit être exécutée. Pour garantir cette régularité, les concepteurs se tournent souvent vers un minuscule morceau de quartz, dont les propriétés cristallines fournissent une référence temporelle extrêmement précise. Lorsqu'une tension est appliquée à ce cristal, il vibre à une fréquence constante et stable, produisant ainsi un signal d'horloge régulier. Ce signal est ensuite utilisé pour synchroniser les milliards de cycles d'opérations qui se déroulent chaque seconde à l'intérieur du microprocesseur. [51-52-53]

Un concept crucial associé à l'horloge est le cycle par instruction (CPI), qui mesure la moyenne des cycles d'horloge nécessaires pour exécuter une instruction donnée. Ce chiffre est fondamental pour évaluer l'efficacité d'un microprocesseur : plus le CPI est bas, plus le processeur est efficace, car il peut exécuter davantage d'instructions en moins de temps. Les concepteurs de microprocesseurs s'efforcent constamment de réduire le CPI en optimisant l'architecture et les circuits internes pour accélérer le traitement des instructions. [51-53]

Ainsi, l'horloge, avec son cristal de quartz et son concept de CPI, forme le tempo vital qui orchestre les opérations complexes et rapides à l'intérieur du microprocesseur, assurant un fonctionnement fluide et efficace du système informatique.

### **III-3-2 Registre [53-56]**

Les registres représentent une partie essentielle de l'architecture d'un microprocesseur, fournissant un stockage temporaire ultrarapide pour les données et les instructions en cours de traitement. Leur proximité physique avec l'unité de traitement central (CPU) garantit des temps d'accès extrêmement rapides, ce qui en fait des ressources cruciales pour l'exécution efficace des programmes.

#### **Mémoire Très Rapide :**

Les registres sont souvent qualifiés de "mémoire très rapide" en raison de leur vitesse d'accès incroyablement élevée. Contrairement à la mémoire RAM, qui est plus lente mais offre une capacité de stockage plus importante, les registres sont conçus pour des opérations ultra-rapides nécessaires au traitement des données. .

#### **Taille du Mot Mémoire :**

La taille du mot mémoire d'un registre détermine la quantité de données qu'il peut stocker et manipuler simultanément. Les microprocesseurs modernes utilisent généralement des mots de différentes tailles, telles que 8 bits, 16 bits, 32 bits ou 64 bits, en fonction de l'architecture du processeur et des besoins de performance. .

#### **Accumulateur (ACC) :**

L'accumulateur est un registre spécial utilisé pour stocker les résultats intermédiaires des opérations arithmétiques et logiques effectuées par la CPU. Il joue un rôle central dans de nombreuses opérations, agissant comme un point de convergence pour les données manipulées par le processeur. .

#### **Pointeur de Pile :**

Le pointeur de pile est un registre utilisé pour suivre l'emplacement actuel dans la pile d'exécution du programme. Il est crucial pour gérer efficacement les appels de fonctions, les interruptions et les retours de sous-routines dans un programme.

#### **Registre d'Instruction :**

Le registre d'instruction contient l'instruction actuellement en cours d'exécution par la CPU. Il offre le code d'instruction à exécuter et désignant les adresses des opérandes à ramener

#### **Registre d'État (PSW) :**

Le registre d'état : Program Status Word (PSW), stocke des indicateurs de statut qui traduisent l'état actuel de la CPU et des opérations en cours. Ces indicateurs comprennent des drapeaux de condition sur le résultat de l'opération arithmétique et logique, ainsi que d'autres indicateurs de contrôle.

#### **Registre Tampon (BUFFER) :**

Le registre tampon, ou buffer, est zone temporaire de stockage utilisée pour le transfert de données entre différentes parties du processeur ou avec des périphériques externes.

### **III-3-3 Mémoire cache [59-61]**

La mémoire cache est un élément crucial de l'architecture d'un microprocesseur, conçue pour améliorer les performances en réduisant les temps d'accès à la mémoire principale. Voici des détails approfondis sur son utilité, les algorithmes utilisés et les différents niveaux de mémoire cache :

#### **Utilité de la Mémoire Cache :**

La mémoire cache agit comme un tampon ultra-rapide entre le processeur et la mémoire principale (RAM), stockant temporairement les données et les instructions les plus fréquemment

utilisées. En anticipant les besoins de la CPU, la mémoire cache permet d'accéder rapidement aux données sans avoir à attendre les lents accès à la RAM, ce qui améliore considérablement les performances globales du système.

### Algorithmes de Cache :

Plusieurs algorithmes sont utilisés pour gérer la mémoire cache et décider quelles données doivent être stockées en cache et lesquelles doivent être supprimées lorsque l'espace est limité. Parmi les principaux algorithmes :

Algorithme de Remplacement : Détermine quelle ligne de cache doit être remplacée lorsque la cache est pleine. Les algorithmes courants incluent la politique de remplacement LRU (Least Recently Used), LFU (Least Frequently Used) et FIFO (First-In-First-Out).

Algorithme de Pré-lecture (Prefetching) : Anticipe les données qui seront probablement nécessaires à l'avenir et les charge dans la cache avant qu'elles ne soient demandées par la CPU. Cela réduit les temps d'attente en anticipant les besoins de la CPU.

### Niveaux de Mémoire Cache :

La mémoire cache est généralement organisée en plusieurs niveaux, chacun avec des caractéristiques spécifiques :

Cache de Niveau 1 (L1) : C'est la cache la plus proche du processeur, souvent intégrée directement dans le cœur de la CPU. Elle est très rapide mais de petite taille, stockant les données et instructions les plus critiques pour le fonctionnement immédiat de la CPU.

Cache de Niveau 2 (L2) : Située entre la L1 et la mémoire principale, la L2 cache est plus grande mais légèrement plus lente que la L1. Elle agit comme un tampon supplémentaire pour stocker davantage de données souvent utilisées.

Cache de Niveau 3 (L3) : La L3 cache, présente sur certains processeurs, est la plus grande mais aussi la plus lente des caches. Elle est partagée entre les différents cœurs de la CPU et est utilisée pour stocker des données partagées entre ces cœurs.

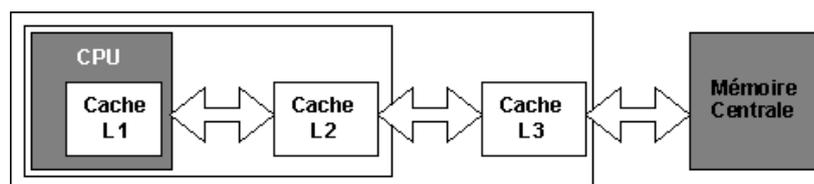


Figure 32 : Mémoire cache primaire et secondaire [59]

### III-3.4 Bus

Les bus sont des voies de communication qui permettent le transfert de données, d'adresses et de signaux de contrôle entre les différents composants d'un système informatique, tels que le processeur, la mémoire et les périphériques externes. Voici des détails approfondis sur les différents types de bus et leur relation avec la capacité de la RAM : [62, 63]

Bus d'Adresse : Le processeur utilise le bus d'adresse pour indiquer l'adresse du registre qu'il souhaite accéder dans la mémoire. Il définit le nombre maximum d'emplacements que peut désigner le processeur appelé capacité adressable du système. Par exemple, un bus d'adresse de 32 fils, pointe jusqu'à  $2^{32}$  (presque 4 milliards) emplacements de mémoire, ce qui est équivalent à une limite de 4 Go de mémoire RAM. [62, 63]

**Bus de Données :** Le bus de données transporte les données : processeur-mémoire ; mémoire processeur ; mémoire-périphériques...La taille du bus de données détermine la quantité de données pouvant être transférée. Par exemple, un bus de données de 64 bits peut transférer 8 octets (64 bits) à la fois. [62, 63]

**Bus de Contrôle :** Le bus de contrôle transporte des signaux de contrôle pour coordonner les opérations du système, tels que les demandes de lecture/écriture et les cycles d'horloge. Il véhicule également des signaux de synchronisation et des signaux d'interruption pour communiquer avec les périphériques et d'autres composants du système. [62, 63]

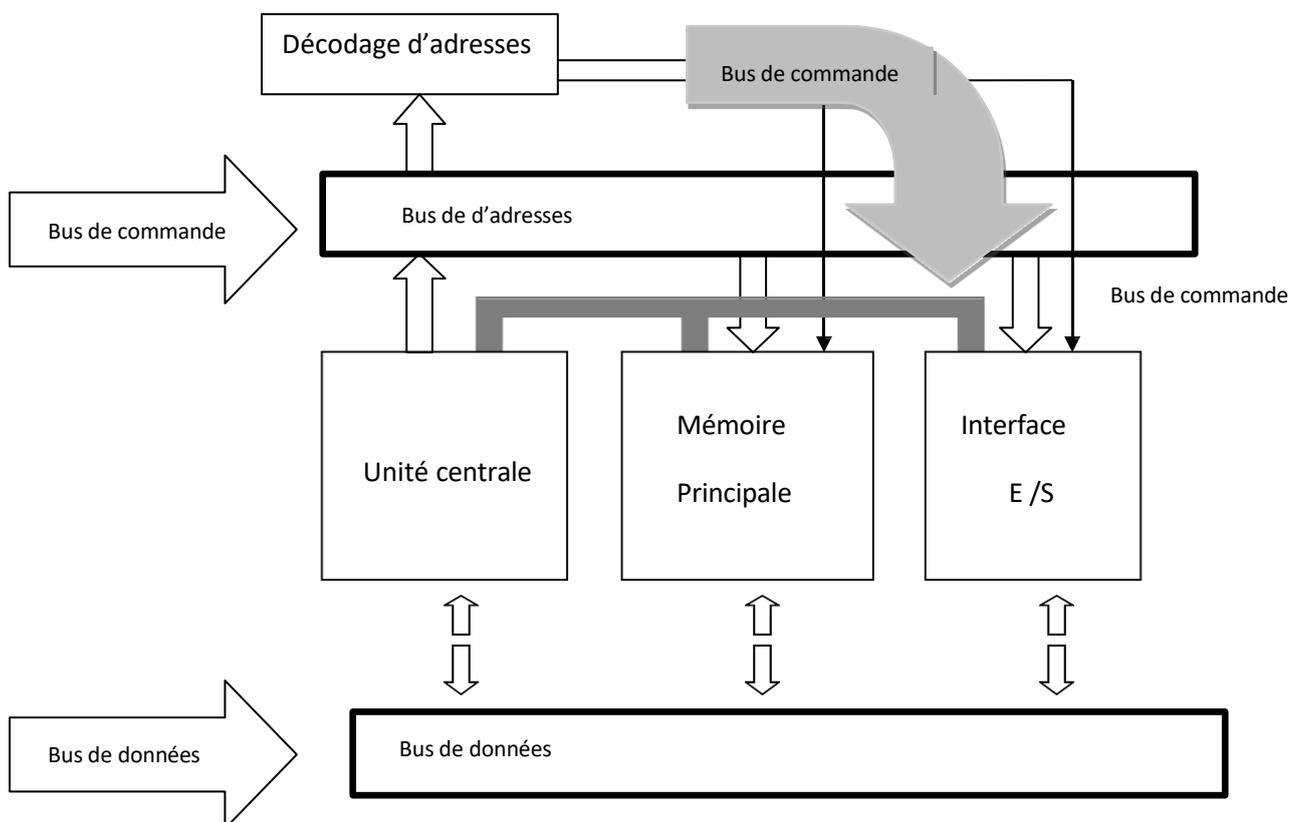


Figure 33 : Les différents bus

### III-3.5 Unités fonctionnelles

Les unités fonctionnelles d'un microprocesseur sont les composants internes chargés de l'exécution des instructions et du traitement des données. Ils incluent ALU pour les opérations mathématiques, MMU pour la gestion de la mémoire et des unités d'E/S pour les entrées/sorties. Ces unités fonctionnent ensemble pour assurer un fonctionnement efficace de l'ordinateur. [64]

#### III-3-5-1 Les unités d'instruction :

Composant d'un microprocesseur chargé de recevoir et de décoder les instructions de la mémoire, puis de les diriger vers l'unité appropriée pour exécution. Ces unités lisent les instructions de la mémoire, les analysent et les traduisent en exécution interne dans le processeur. Le fonctionnement est organisé par la centrale et le décodeur, garantissant ainsi la compréhension et la bonne exécution des instructions. [65]

### III-3-5-2 Le séquenceur :

Bloc logique de contrôle (ou séquenceur) : Il organise l'exécution des instructions au rythme d'horloge. Il génère tous les signaux de synchronisation internes ou externes (bus de contrôle) du microprocesseur sur la base de divers signaux de contrôle provenant du décodeur d'instructions ou du registre d'état. Il s'agit d'un automate filaire (obsolète) ou microprogrammé appelé microprocesseur. [66]

#### Exemple :

Pour les microprocesseurs au format d'instruction double adresse, l'instruction d'ajout de deux variables dans les mémoires A et B est représenté dans le registre d'instructions comme suit :

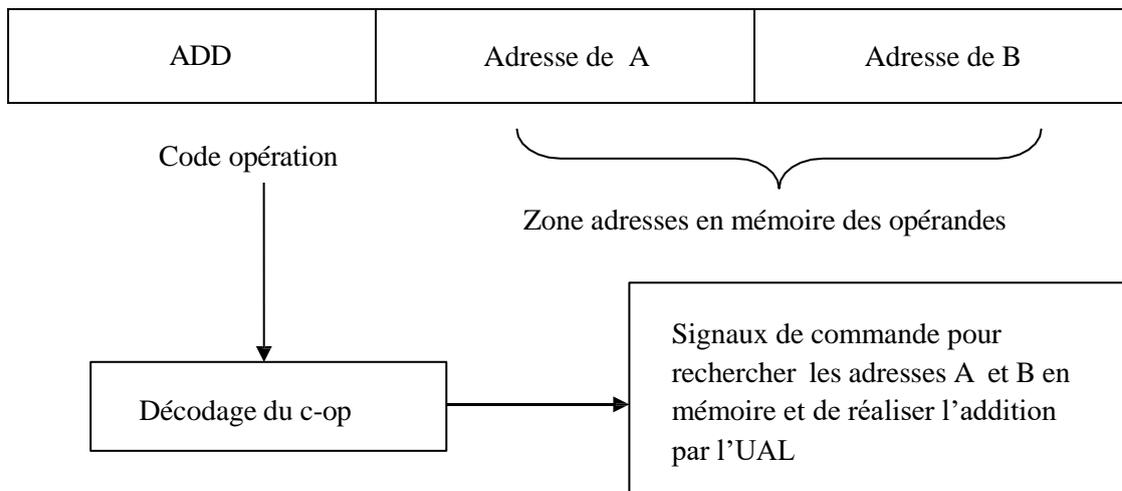


Figure 34 : exemple d'addition pour le décodage de l'instruction

#### Le compteur d'ordinal :

Compteur ordinal dans un processeur ou pointeur d'instruction (anglais : pointeur d'instruction IP ou compteur de programme PC) est le registre qui contient l'instruction en cours d'exécution ou l'adresse mémoire de l'instruction en cours d'exécution (cela dépend de "l'architecture"). [67]

#### Le registre d'instruction RI :

Le registre d'instructions contient le premier octet de l'instruction en cours d'exécution et est chargé pendant le cycle d'extraction-exécution de base. L'information reçue via le bus de données est utilisée par le décodeur d'instructions conformément au cycle de recherche-exécution suivant : La donnée extraite de la mémoire est stockée dans le R.I. (c'est la phase d'extraction), puis ce contenu est interprété par le décodeur d'instructions qui agit sur la logique de contrôle (c'est la phase d'exécution). Cet octet indique au microprocesseur deux choses : une action (lecture, écriture, etc.) et un lieu d'action (registre, accumulateur, mémoire, etc.). Le résultat de cette interprétation se traduit par des niveaux logiques sur le bus de contrôle. [68]

#### Architecture Pipeline :

Le pipeline est une méthode visant à accélérer l'exécution des instructions dans un microprocesseur en appliquant le concept de travail à la chaîne. Contrairement à un microprocesseur

sans pipeline, où les instructions sont exécutées séquentiellement, le pipeline permet au microprocesseur de commencer une nouvelle instruction avant que la précédente ne soit entièrement terminée. Cela signifie que plusieurs instructions peuvent être en cours d'exécution simultanément au sein du microprocesseur, augmentant ainsi le débit, c'est-à-dire le nombre d'instructions exécutées par unité de temps. Bien que le temps d'exécution d'une seule instruction ne soit pas réduit, le débit global est multiplié par le nombre d'instructions exécutées simultanément. [69]

### III-3.5.3 Les unités d'exécution :

D'un microprocesseur sont responsables de traiter et d'exécuter les instructions d'un programme informatique. Elles varient selon l'architecture du processeur, mais comprennent généralement des unités arithmétiques et logiques (ALU) pour les opérations mathématiques et logiques, des unités de contrôle pour coordonner l'exécution des instructions, des unités de gestion de la mémoire pour accéder aux données, et d'autres unités spécialisées. Ensemble, ces unités permettent au processeur d'exécuter les instructions de manière séquentielle et efficace. [70]

#### Unité Arithmétique et Logique

C'est un circuit complexe qui assure les fonctions logiques (ET, OU, comparaison ...) ou arithmétiques (addition, division, soustraction, ...). Il permet donc de traiter et tester les données. Comme l'objectif est de développer un programme qui gère une application voulue, toute instruction qui modifie une donnée fait toujours appel à l'UAL. Comme indiqué sur la figure 01, l'entrée de l'UAL est connectée au bus interne par un ensemble de registres "temporaires" et aussi par un registre particulier appelé "accumulateur" ou plus particulièrement le registre de travail (Working Register, le Registre W). Alors que la sortie de l'UAL est connectée uniquement à l'entrée de l'accumulateur. Il est à noter que les deux entrées sont précédées par une mémoire tampon appelée registres tampons ou verrous. Ces registres, qui ne peuvent être manipulés par le programmeur et le sont totalement transparents, permettent de stocker des octets aux entrées de l'U.A.L. comme l'UAL est constitué d'une logique combinatoire, elle est dépourvue de moyens propres de stockage. [71]

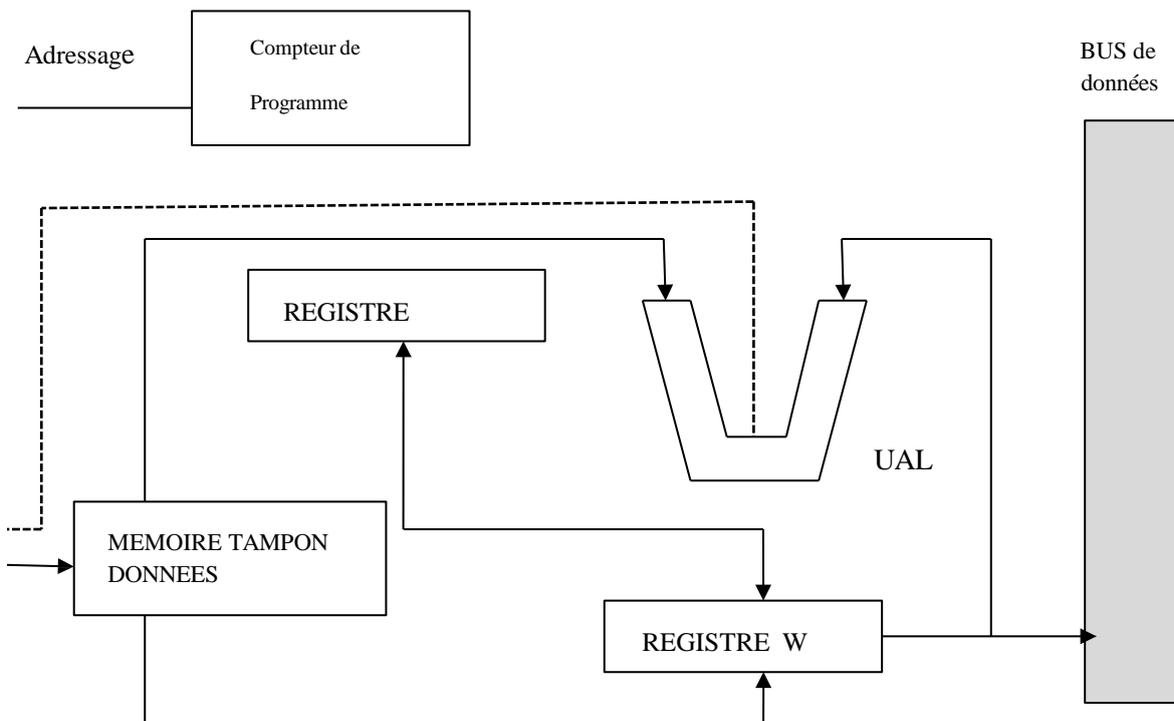


Figure 35 : schéma d'une ALU

### **Unité de virgule flottante :**

Indispensable pour gérer les nombres décimaux dans les systèmes informatiques. Il utilise des normes de codage telles que IEEE 754 pour représenter ces nombres en binaire. Ces unités sont intégrées dans des processeurs modernes pour effectuer efficacement des opérations arithmétiques. Leur précision et leurs performances varient selon les besoins. En bref, ils vous permettent de manipuler les nombres à virgule flottante avec précision et efficacité. [72]

### **Le registre d'état :**

Est généralement composé de 8 bits à considérer individuellement. Chacun de ces bits est un indicateur dont l'état dépend du résultat de la dernière opération effectuée par l'UAL. On les appelle indicateur d'état ou flag ou drapeaux. Dans un programme le résultat du test de leur état conditionne souvent le déroulement de la suite du programme. [73]

- Retenue (carry : C)
- Retenue intermédiaire (Auxiliary-Carry : AC)
- Signe (Sign : S)
- Débordement (overflow : OV ou V)
- Zéro (Z) parité (Parity : P)

### **Le registre accumulateur :**

Il s'agit d'un registre de travail très important dans UAL. Dans la plupart des opérations arithmétiques et logiques, l'accumulateur contient l'un des opérandes avant l'exécution et le résultat après l'exécution. Il peut également être utilisé comme registre tampon dans les opérations d'entrée/sortie. D'une manière générale, la taille de l'accumulateur est la même que la taille du mot mémoire. [74]

#### **III-3.6 Exemple d'exécution d'un programme sur un microprocesseur :**

Soit à programmer le calcul de la puissance électrique absorbée  $P=U.I$  :

##### **Programme :**

Lire(U) ; Lire(I) ;  $P=U*I$  ; Afficher (P) ;

Donner les étapes de l'exécution depuis le double clic sur l'exécutable du programme.

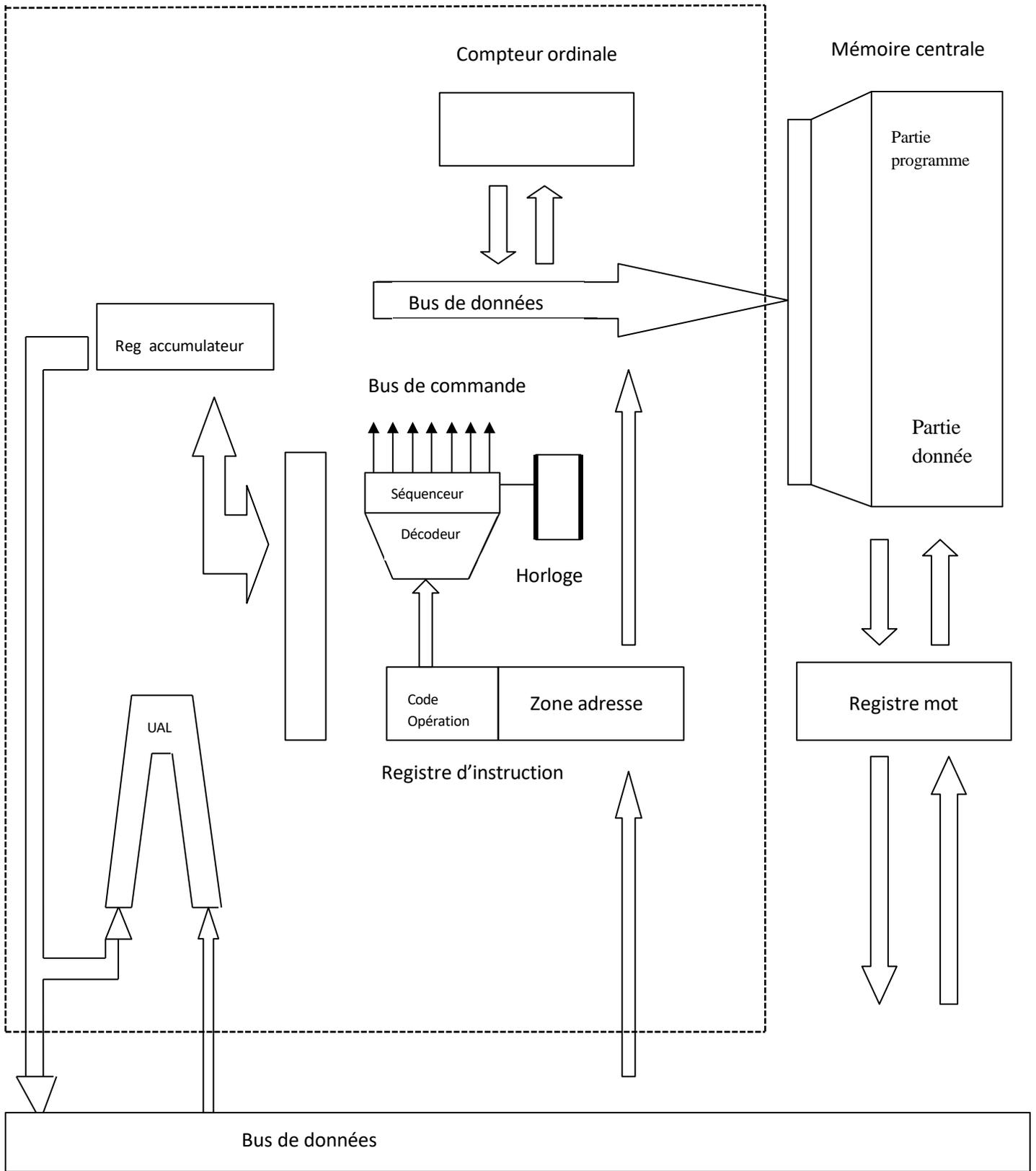


Figure 36 : l'architecture d'un système à microprocesseur [75]

Le compte ordinal contient l'adresse de la première instruction (lire U) : cette adresse passe dans le bus d'adresse pointant à travers le décodeur le registre mémoire contenant cette instruction et en mode lecture. Le contenu de ce registre (lire U) passe dans le registre tampon, et à travers le bus de données, il passe dans le registre instruction. À ce niveau le contenu va être décodé qui stipule de ramener un opérande depuis le clavier et l'introduire dans la mémoire au niveau de l'adresse U (Mémoire en étant mode écriture). Le système attend que l'utilisateur introduit une valeur et tape entrée, cette valeur passe directement dans le registre tampon puis passe dans le registre d'adresse U. [76-77]

Le compte ordinal s'auto incrémente pour passer à la 2<sup>ème</sup> instruction : lecture depuis le clavier la valeur de I.

Le compte ordinal s'auto incrémente sur l'adresse de la 3<sup>ème</sup> instruction  $P=U*I$ . Cette adresse passe par le bus d'adresse arrivant au décodeur, va être décodé pour désigner l'adresse en mode lecture dont le contenu ( $P=U*I$ ). Le contenu de ce registre passe dans le registre tampon puis le bus de données. Il passe dans le registre instruction. À ce niveau le contenu va être décodé dont le résultat de décodage : c'est une instruction à opération de multiplication et contient deux opérandes U et I et le résultat c'est P. Donc c'est une instruction qui exige l'exécution de quatre sous instructions : (1) ramener l'opérande U depuis son adresse U dans la mémoire RAM ; (2) ramener l'opérande I depuis son adresse I dans la mémoire RAM ; (3) Faire la multiplication des deux opérandes ; (4) affecter le résultat dans le registre mémoire à l'adresse P. C'est le séquenceur qui va décider l'organisation de l'exécution de ces quatre sous instructions :

À travers le bus de commande, l'adresse de l'opérande U passe dans le bus d'adresse pointant la RAM en mode de lecture, le registre à adresse U. le contenu passe dans le registre tampon puis passe dans le bus de données (puis que c'est un opérande) alors passe dans l'entrée A de l'UAL), étant la première opérande alors il se loge dans l'accumulateur.

À travers le bus de commande, l'adresse de l'opérande I passe dans le bus d'adresse pointant la RAM en mode de lecture le registre à adresse I. le contenu passe dans le registre tampon puis passe dans le bus de données (puis que c'est un opérande) alors passe dans l'entrée A de l'UAL. Étant le deuxième opérande alors le contenu de l'accumulateur descend par le bus de donnée et passe dans le registre B de l'UAL. À cet instant la multiplication se passe et le résultat passe dans l'accumulateur.

À travers le bus de commande, l'adresse de résultat va dans le bus d'adresse pointant le registre à l'adresse P en écriture. Le résultat passe par le dans le bus de données vers la RAM passant par le registre tampon puis elle se loge dans l'adresse P.

Le compte ordinal s'auto incrémente sur la 4<sup>ème</sup> instruction (afficher P : valeur de P passe sur l'écran). L'adresse de cette instruction passe dans le bus d'adresse pointant à travers le décodeur en mode lecture le registre mémoire contenant cette instruction. Le contenu de ce registre (afficher P) passe dans le registre tampon puis dans le registre instruction. À ce niveau le contenu va être décodé dont le résultat de décodage : c'est une instruction d'affectation sur l'écran d'un contenu dans une adresse mémoire (P). Donc c'est simple il suffit de pointer à nouveau l'adresse P de la RAM en lecture et activer le buffer de l'écran en lecture. C'est une instruction qui exige l'exécution de deux sous instructions : (1) ramener l'opérande P depuis son adresse P dans la mémoire RAM sur le bus de données ; (2) Activer le buffer de l'écran accueillant la valeur de P depuis le bus de données. C'est le séquenceur qui va décider l'organisation de l'exécution de ces deux sous instructions :

À travers le bus de commande, l'adresse de l'opérande P passe dans le bus d'adresse pointant la RAM en mode de lecture le registre à adresse P. le contenu passe dans le registre tampon puis passe dans le bus de données.

À travers le bus de commande, le buffer de l'écran est activé, la valeur P est alors affichée sur l'écran. [57,58,76,77]

### III-3.7 Exemple d'un séquenceur relatif à une opération addition de deux nombres d'un seul chiffre

CHIF est une touche parmi toutes les touches des chiffres de 0 à 9, ces touches communiquent avec le codeur et la bascule D1.

En appuyant sur CHIF (front montant ; 1 ; front descendant) sachant la bascule est fonctionnelle au front montant, La bascule D1 prendra « 1 » et elle le garde. Les bascule D2 et D3 sont à l'état '0' alors AND1 prendra « 1 » par la suite AND4 prendra aussi « 1 » soit alors le compteur commence à compter. La troisième séquence de comptage donne avec la sortie en « 1 » du AND1, le mode en écriture du registre 1 à travers AND5, et donnera un front au niveau de son horloge à travers AND7, ainsi le chiffre codé dans le codeur s'enregistre au niveau du registre1.

En appuyant sur l'un des opérateurs (+, \*...) D2 (D3) prendra « 1 » alors que D1 bascule à « 0 » à cause de l'entrée RESET(D1) (excité par x2). Soit AND1 et AND2 à « 0 ». le D1

En appuyant sur CHIF, D1 prendra « 1 » soit AND1 à « 0 ». par contre AND2 prendra « 1 » par la suite AND3 prendra « 1 » et le compteur commence le comptage. AND2 en « 1 » et la 3<sup>ème</sup> séquence de comptage mis en mode d'écriture du registre 2 et avec AND8 offre l'impulsion d'introduction du deuxième chiffre au niveau du registre 2.

En appuyant sur la touche égale (=), D4 prendra « 1 » et fait passer les bascules D1 à « 0 ». Soit les deux registres sont en mode lecture. D2 ou D3 désigne la quelles des résultats passera sur le registre 3 à partir de AND9 et AND10.

Le niveau « 1 » de la bascule D4 :

- 1- fait passer le compteur au comptage. Les séquences (1, 2, 3, 4) sont assemblées sur une porte OR, pour assurer les 4 fronts montants de décalage de l'information enregistrée.
- 2- mettre le registre 3 en mode d'écriture.
- 3- offrant le train d'impulsion aux horloges des trois registres.

Étant les deux registres 1 et 2 sont en lecture et le registre 3 est en écriture, et tous les trois registres sont commandés par la même horloge à 4 front descendants, alors l'addition se fait normale et le résultat est bien enregistrée sur le registre 3.

Concernant l'affichage :

- 1- le contenu du registre 1 (1<sup>ère</sup> opérande) doit rester affiché jusqu'au la retouche pour la deuxième fois la touche CHIFF, à cet effet, R1 est en ET avec exclusif de (D1 et D2+D3).
- 2- le contenu du registre 2 (2<sup>ème</sup> opérande) doit rester affiché à partir la retouche pour la deuxième fois la touche CHIF, cela est réalisé par un ET avec (D1 ET (D2+D3)).
- 3- le contenu du registre 3 (Résultat de l'opération) s'affiche juste au basculement de D4 de 0 à 1. à l'appuie sur la touche (C), un RESET sur tous les éléments séquentielle du circuit. [57,58],

[75,76], [78-81]

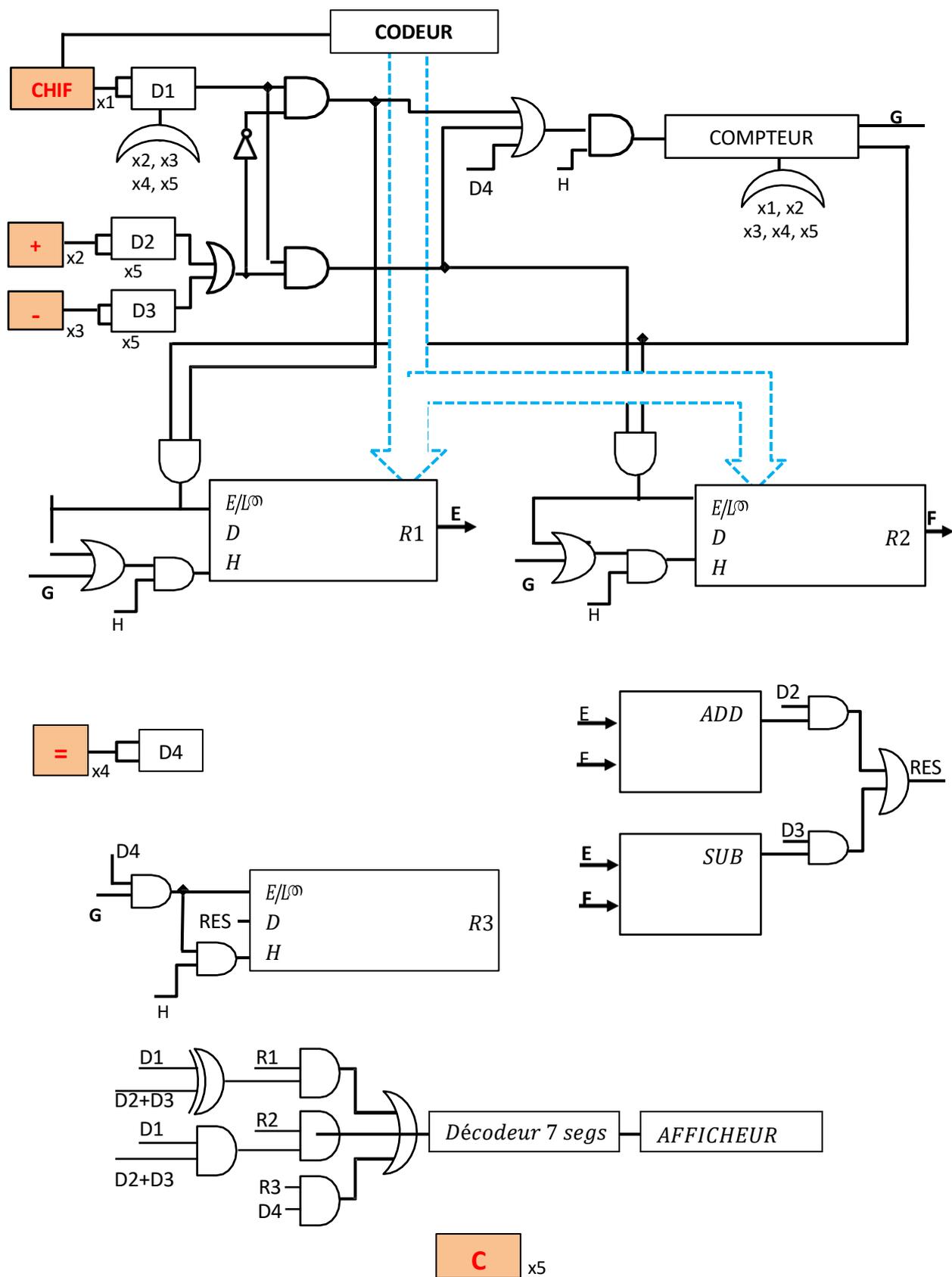


Figure : Schéma relatif à un déroulement d'une opération d'addition

### **III-3.8 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons expliqué brièvement la structure d'un microprocesseur, la segmentation de la mémoire afin qu'elle soit maîtrisée par le microprocesseur. Par la suite, nous avons donné un exemple d'exécution d'un programme. Nous avons donné une importance à cet exemple car il met en évidence un mécanisme de traitement de donnée. Finalement, un travail qui nous a rendus compte la complexité de mettre en œuvre une telle unité de contrôle et de commande.

# Conclusion Générale

---

La compréhension des semi-conducteurs, des portes logiques et des microprocesseurs est fondamentale pour la conception et l'optimisation des systèmes électroniques modernes. Ce document a exploré plusieurs aspects cruciaux de cette technologie, répartis en trois chapitres distincts.

Dans le Chapitre 1, nous avons abordé la physique des semi-conducteurs et leur rôle dans la conception des circuits intégrés. Nous avons examiné les techniques de fabrication des puces, la gestion thermique et l'importance des interrupteurs électroniques tels que les transistors bipolaires et les transistors à effet de champ. De plus, nous avons étudié les portes logiques de base et secondaires, ainsi que la manière de les matérialiser à partir des MOSFET de type P et N. Ces concepts sont fondamentaux pour la création de circuits intégrés aux portes logiques, qui sont les éléments de base des systèmes numériques.

Le chapitre 2 a porté sur le support séquentiel d'un additionneur à plusieurs bits. Nous avons exploré les différents types de circuits additionneurs, incluant les circuits semi-additionneurs, les additionneurs complets et les additionneurs en cascade. Nous avons également discuté des codeurs et décodeurs, des registres et de leurs types, ainsi que des compteurs numériques synchrones et asynchrones. Ces composants sont essentiels pour la réalisation de calculs numériques complexes et pour le stockage et le transfert de données au sein des systèmes électroniques.

Enfin, le Chapitre 3 s'est concentré sur le microprocesseur et son unité de commande. Nous avons passé en revue l'histoire des microprocesseurs, leur constitution, incluant l'horloge, les registres, la mémoire cache, les bus et les différentes unités fonctionnelles telles que l'unité d'instruction, le séquenceur et l'unité d'exécution. Un exemple d'exécution de programme et de séquenceurs relatifs aux opérations arithmétiques a été fourni pour illustrer le fonctionnement interne d'un microprocesseur.

Concernant notre travail, mettre en évidence de la machination de l'addition de deux nombres décimaux d'un seul chiffre, un travail qu'a été résolu depuis plusieurs décennies, on la repris uniquement dans le but de montrer la complexité de fluidité de l'information. Dans un projet futur, nous suggérons d'établir une unité de commande qui fait l'addition de deux nombres de deux chiffres et plus.

## Référence :

- [1] "Principles of Semiconductor Devices" par Sima Dimitrijevic
- [2] "Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles" par Donald A. Neamen
- [3] "Microelectronics: Circuit Analysis and Design" par Donald A. Neamen
- [4] "Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology" par Hong Xiao
- [5] site web :<https://www.irif.fr/~carton/Enseignement/Architecture/Cours/Gates/>
  
- [6] Site Web : Schneider Electric
- [7] Site Web : Wikipédia
- [8] Article : "UnderstandingElectricalSwitches" sur le site Web de Electrical Engineering Portal
- [9] Livre : "ElectricalWiringResidential" par Ray C. Mullin et Phil Simmons
- [10] "Solid State Electronic Devices" par Ben G. Streetman et Sanjay Kumar Banerjee
- [11] site web : <http://educyclopedia.karadimov.info/library/tran2-tj.pdf>
- [12] "The Art of Electronics" par Paul Horowitz et Winfield Hill
  
- [13][https://fr.wikipedia.org/wiki/Composant\\_semi-conducteur#:~:text=Un%20composant%20semi%2Dconducteur%20est,des%20semi%2Dconducteurs%20organiques](https://fr.wikipedia.org/wiki/Composant_semi-conducteur#:~:text=Un%20composant%20semi%2Dconducteur%20est,des%20semi%2Dconducteurs%20organiques)
- [14] "Physics of Semiconductor Devices" par Simon M. Sze et Ming-Kwei Lee.
- [15] résumé de Eric Cariou ,Circuits logiques Université de Pau et des Pays de l'Adour , UFR Sciences Pau - Département Informatique page de 6-11
  
- [16] "Chaîne youtube" info3500 – conception et réalisation de système numériques " , 0201base ,20 aout 2014
  
- [17] J.-M. Dutertre , Introduction aux semi-conducteurs La jonction PN ,Cours Electronique analogique résumé Page 6- 8
  
- [18] Adel SAID « Electronique Générale » Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Nabeul page 5 année 2013/2014
  
- [19] M. Horowitz, J. Plummer, R. Howe, E40M MOS Transistors, CMOS Logic Circuits, and Cheap, Powerful Computers, page 12
  
- [20] Ibrahim Kane ,(Contribution à l'analyse de la susceptibilité électromagnétique des composants)Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Limoges, page 27, Le 21 décembre 2016
  
- [21] "Chaîne youtube" info3500 – conception et réalisation de système numériques " , 0201base ,20 aout 2014
  
- [22] KAAT Lydia et HAMDY Yasmina, Contribution à la conception d'un CNA en technologie CMOS0.13µm page 8 , année 2019/2020
  
- [23] GabrielCormier , DESIGN DE CIRCUITS COMBINATOIRES , Resumé de CHAPITRE 5.
  
- [24] Dr bencheriet chemesse ennehar « structure machine , cours et exercice » université 8 mai 1945 ,page 13 ,2021 2022
  
- [25] Farhansiddiqui, ayoush johari. Study of designing of multibitadders. INTERNATIONAL JOURNAL OF RESERCH IN TECHNOLOGY (URT), vol. V, No. II, april 2018

- [26] Didier Teifreto Architecture des Systèmes Informatiques centre de télé-enseignement. Université de Franche-Comté. 25 juin 2014
- [27] Gualtiero Piccinini Livre Physical Computation: A Mechanistic Account .Resume de chapitre 10 Digital Calculators page 176–180 June 2015
- [28] Cours Préparé par M. EL ALAMI HASSAN .université moulay ismail page 2
- [29] Chapitre 1/p2: Circuits combinatoires. Faculté des sciences Université de Bouira. Février 2014.
- [30] Pr. Aziz AMARI. Cours d'électronique numérique Chapitre 3. Logique Combinatoire page 26 A.U. 2017-18
- [31] Eduardo Sanchez. Les unités arithmétiques .Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne .page 02
- [32] Trabelsi hichem circuits logiques combinatoires circuits arithmétiques 1 Chapitre 5 Université Virtuelle de Tunis
- [33] ((ASSABAA Mohamed, Systèmes de Numération et Codage des Nombres, Institut des Sciences et Techniques Appliquées (ISTA) UFMCI, page 15, Avril 2018)
- [34] (Collège of Information Technology / Software Department, Logic Design page 40-43 , 2018-2019)
- [35] MA251 Computer Organization and Architecture [3-0-0-6] Lecture 5: Decoder, Demultiplexer, Encoder, and Multiplexer. Spring 2011 Partha Sarathi Mandal
- [36] (College of Information Technology / Software Department, Logic Design page 40-41 , 2018-2019)
- [37] Gozim, Djamel, and Kamel Guesmi. "Logique Combinatoire Et Séquentielle." (2019).
- [38] MARJANE, Abdelaziz. Conception Vectorielle de Registre à rétroaction avec retenue sur les corps finis. 2011. Thèse de doctorat. Université Paris-Nord-Paris XIII.
- [39] "Digital Design with RTL Design, Verilog and VHDL" de Frank Vahid et Soheil Ghiasi.
- [40] "Digital Electronics: Principles, Devices and Applications" par Anil K. Maini.
- [41] Belaid. M., " Les circuits logiques combinatoires et séquentiels. Cours TD et TP", Edition page blues internationales. 2016.
- [42] MOKHTARI. Karima. Khadidja et CAIDI. Imane, " De l'algèbre de Boole aux circuits numériques (cours et application)", Office des publications universitaire. 2014.
- [43] ILLEMEJANE. J. "cours du codage des nombres à la logique séquentielle", Institut Universitaire de Technologie de creteil-vitry. Département de Génie Électrique et Informatique Industrielle. Année universitaire 2013-2014
- [44] SAADA OUI Abdelkader. "Support de cours : Systèmes logiques", Département Technologies de l'Informatique. Année universitaire : 2014/2015s
- [45] "Digital Design" par M. Morris Mano et Michael D. Ciletti.

- [46] "Digital Design and Computer Architecture" par David Money Harris et Sarah L. Harris.
- [47] site web : <https://icn13.alwaysdata.net/processeurs.html>
- [48] "The Microprocessor: A Biography" par Michael S. Malone
- [49] "A Brief History of Microprocessor Development" par Steven P. Morse et al. (IEEE Micro)
- [50] site web : <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Microprocesseur.html>
- [51] "Digital Design and Computer Architecture" par David Money Harris et Sarah L. Harris
- [52] "Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface" par David A. Patterson et John L. Hennessy
- [53] site web : <https://www.inmac-wstore.com/guides-achat-composants-qu-est-ce-que-cpu/cp37600.htm>
- [54] "Computer Organization and Architecture: Designing for Performance" par William Stallings
- [55] "Modern Processor Design: Fundamentals of Superscalar Processors" par John Paul Shen et Mikko H. Lipasti
- [56] "Université Badji Mokhtar Annaba, Faculté des Sciences". (2020-2021). Electronique et composants des systèmes [Matériel de cours]. Annaba, Algérie
- [53] site web : <https://www.inmac-wstore.com/guides-achat-composants-qu-est-ce-que-cpu/cp37600.htm>
- [57] Pixees, « Principes d'exécution d'un programme chaîne YouTube » ; Vidéo ; 29 septembre 2017
- [58] M. Sbaï, Electronique numérique, logique combinatoire et composants numérique, Ellipses Editions Marketing, Paris, France, 2013
- Sites web :
- [59] [https://leria-info.univ-angers.fr/~jeanmichel.richer/ensl3i\\_crs4.php](https://leria-info.univ-angers.fr/~jeanmichel.richer/ensl3i_crs4.php)
- [60] <https://kb.n0c.com/glossaire/memoire-cache/>
- [61] [https://inf1427.telug.ca/telugDownload.php?file=2018/10/Cours\\_INF1427\\_module\\_6](https://inf1427.telug.ca/telugDownload.php?file=2018/10/Cours_INF1427_module_6) HYPERLINK "https://inf1427.telug.ca/telugDownload.php?file=2018/10/Cours\_INF1427\_module\_6.pdf".pdf
- [62] "Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface" par David A. Patterson et John L. Hennessy
- [63] Boukhenoufa, N. (s.d.). "Systèmes à microprocesseurs: Cours & Exercices." Université Mohamed Boudiaf -Msila , page 19-20
- [64] Raphaël David et Dominique Lavenier et Sébastien Pillement , Du micro-processeur au circuit FPGA (une analyse sous l'angle de la reconfiguration ) ,2e soumission à Technique et science informatiques, page 04 , le 15 juillet 2003
- [65] MouhoubiHassina, KaricheRoza , Etude et Réalisation d'un microprocesseur sur une cible

reconfigurableFPGA. UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMARI TIZI-OUZOU Page14, 2013-2014

[66] Melle:Kebaili Souad page 5 Conception d'un microprocesseur à 4 bits UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU

[67] Nicolas Delanoue, Microcontrôleur Assembleur et architecture des ordinateurs avec Little Computer 3. Université d'Angers - Polytech Angers page

[68] Docteur Abdallah Zegaoui , Les Microprocesseurs & Les Microcontrôleurs , Université HassibaBenbouali de Chlef, Algérie Page 17

[69] Benosmanamina, cours et travaux dirigés de la matière : électronique, composants des systèmes, centre univ-Belhadj Bouchaib d'aintemouchent-institut des sciences département mathématiques et informatique, page 37, 2018-2019

[70] T.Dumartin, Architecture des ordinateurs ( Note de cours), Informatique Industrielle , page 19 , Année 2004 - 2005

[71] Docteur Abdallah Zegaoui , Les Microprocesseurs & Les Microcontrôleurs , Université HassibaBenbouali de Chlef, Algérie , page 13

[72] Roselyne Chotin-Avot , Architectures matérielles pour l'arithmétique stochastique discrète ,thèse de doctorat Université de paris VI , le 6 juin 2003

[73] Mr. LEGGAT Ahmed Reda Le MICROPROCESSEUR, Univ-Tlemcen : page 36 37

[74] Philippe darche , le microprocesseur 3 aspects materiels , collection informatique page 51

[75] "chaine You tube tarik3 med3" « étapes d'exécution d'un programme » le 17 septembre 2020

[76] Djaafri, Fouzi. "Les étapes d'exécution d'instructions ."YouTube Vidéo. 2021

[77] ChaineYouTube : FormationVidéo. "Architecture - processeur." YouTube Vidéo. 29 janvier 202

[78] Giovanni.del-franco ; [http://karlaoui.free.fr/Site%20Epmi/Electronique\\_num%C3%A9rique/Cours/3. Logique\\_combinatoire\\_et\\_multiplexage.pdf](http://karlaoui.free.fr/Site%20Epmi/Electronique_num%C3%A9rique/Cours/3. Logique_combinatoire_et_multiplexage.pdf)

[79] [https://fr.wikibooks.org/wiki/Fonctionnement\\_d%27un\\_ordinateur/Les\\_circuits\\_pour\\_1%27addition\\_et\\_la\\_soustraction](https://fr.wikibooks.org/wiki/Fonctionnement_d%27un_ordinateur/Les_circuits_pour_1%27addition_et_la_soustraction)

[80] [https://www.electronique-et-informatique.fr/Electronique-et-Informatique/Digit/Digit\\_11T.php#HAUT](https://www.electronique-et-informatique.fr/Electronique-et-Informatique/Digit/Digit_11T.php#HAUT)

[81] <https://fastercapital.com/fr/sujet/explorer-l'utilisation-des-registres-dans-les-op%C3%A9rations-arithm%C3%A9tiques.html>

## Résumé

Ce mémoire explore la complexité de la conception et de la mise en œuvre d'une unité de commande et de contrôle dans les systèmes électroniques, illustrée par un exemple de calcul simple. Le premier chapitre couvre la physique des semi-conducteurs et les portes logiques, incluant la conception et la fabrication des circuits intégrés. Le deuxième chapitre traite des circuits séquentiels nécessaires pour un additionneur à plusieurs bits, abordant les additionneurs, registres et compteurs numériques. Le troisième chapitre examine les microprocesseurs, décrivant leur structure, fonctionnement et unités fonctionnelles, avec un exemple pratique d'addition. La conclusion souligne la complexité des systèmes numériques et propose des extensions futures pour des unités de commande plus avancées.

**Mots clés :** *microprocesseur ; compteur ; registre ; additionneur numérique ; unité de contrôle et de commande*

## Abstract

This thesis explores the complexity of designing and implementing a control unit in electronic systems, illustrated by a simple calculation example. The first chapter covers semiconductor physics and logic gates, including the design and fabrication of integrated circuits. The second chapter deals with sequential circuits necessary for a multi-bit adder, addressing adders, registers, and digital counters. The third chapter examines microprocessors, describing their structure, operation, and functional units, with a practical example of addition. The conclusion highlights the complexity of digital systems and proposes future extensions for more advanced control units.

**Keywords:** *microprocessor; counter; register; digital adder; control and command unit*

## ملخص

يهدف هذا البحث الى تعقيد تصميم وتنفيذ وحدة التحكم في الأنظمة الإلكترونية، مع توضيح ذلك من خلال مثال حسابي بسيط. يغطي الفصل الأول فيزياء أشباه الموصلات وبوابات المنطق، بما في ذلك تصميم وتصنيع الدوائر المتكاملة. يتناول الفصل الثاني الدوائر التسلسلية اللازمة لمجمع متعدد البتات، مع التركيز على المجمعات والسجلات والعدادات الرقمية. يفحص الفصل الثالث المعالجات الدقيقة، ويصف هيكلها وتشغيلها والوحدات الوظيفية الخاصة بها، مع مثال عملي على الجمع. تسلط الخاتمة الضوء على تعقيد الأنظمة الرقمية وتقتراح امتدادات مستقبلية لوحدات تحكم أكثر تقدم.

**الكلمات المفتاحية :** معالج دقيق ; كومبيوتر ; سجل ; إضافة رقمية ; وحدة السيطرة والقيادة