

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 سعد دحلب البلدية  
BLIDA de DAHLAB SAAD Université

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie  
قسم الإلكترونيك  
Départemen d'Électronique



## Mémoire de Master

Mention Électronique  
Spécialité : Microélectronique

présenté par

ALANE SARAH

&

AKKACHE LOUIZA

# Etude et simulation d'un Convertisseur Analogique Numérique

Proposé par : SAID NACER

Année Universitaire 2022-2023

# **Remerciements**

---

Tout d'abord nous voudrions remercier dieu de nous bénir et nous donner la force toutes ces longues années et nous donner le courage de terminer nos études

Nous profitons de cette occasion pour exprimer nos sincères gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire sur le convertisseur analogique-numérique.

Tout d'abord, nos remerciements vont à notre directeur de mémoire Monsieur **NACER Said**, pour son expertise, ses conseils éclairés et sa disponibilité tout au long de ce projet. Votre soutien et vos suggestions précieuses ont grandement enrichi ce travail.

Nos remerciements et nos gratitude vont à l'ensemble des enseignants qui ont contribué, de près ou de loin, à notre formation tout au long de ce parcours académique notamment ceux du département électronique.

## Dédicace

Cet humble travail est dédié à mes parents qui étaient là pour moi à chaque fois que je sentais que j'allais tomber et me casser, à ma sœur qui était l'épaule sur laquelle je pouvais me tenir à chaque fois que je me fatiguais, à mon fiancé bien-aimé qui bénissent ma vie avec joie et bonheur, et à tous mes amis et ma famille.

ALANE Sarah

## Dédicace

À mes parents, Je dédie ce mémoire avec une profonde gratitude et un amour infini. Votre soutien inconditionnel, vos encouragements et votre patience ont été la clé de ma réussite tout au long de ce parcours académique. Votre amour, vos sacrifices et votre confiance en moi m'ont donné la force de persévérer face aux défis et d'atteindre mes objectifs.

À mon mari, ton soutien sans faille, ta compréhension et ton amour ont été mon refuge pendant ces moments intenses de recherche et d'étude. Tu as été mon roc, m'encourageant à donner le meilleur de moi-même.

À ma fille, tu es la lumière qui illumine ma vie. Ton sourire et ta joie ont été ma motivation quotidienne. Je te dédie ce mémoire en espérant t'inspirer à poursuivre tes propres rêves avec détermination et passion.

À toute ma famille, vos encouragements, vos prières et votre soutien moral ont été essentiels dans cette aventure académique. Votre amour inconditionnel et votre fierté ont été ma plus grande motivation. Merci d'avoir été là pour moi à chaque étape. Que cette dédicace témoigne de ma reconnaissance éternelle envers vous tous.

AKKACHE Louiza

## ملخص

تصميم الدارات المتكاملة هو عبارة عن نشاط محفز، لأنها تهدف الى تخصيص تصاميم معقدة والتي تقوم بربط حجم الترانزستورات، وتعتمد على تكنولوجيا الجهاز. هذا العمل يتمحور على تصميم محول تناظري-رقمي من نوع Flash 4 ADC بايت باستعمال تكنولوجيا CMOS. إن برنامج DSCH يستعمل من أجل تخطيط الدارات الكهربائية أما برنامج

## MICROWIND

فيستعمل لتفعيل التصميم عن طريق المحاكاة هذه المخطوطة تحتوي أيضا على فصل على المبادئ الأساسية للدارات المتكاملة وعلى التحويل النظري-الرقمي.

الكلمات المفتاح: محول تناظري-رقمي ADC flash ; DSCH ; Microwind

## Résumé

La conception des circuits intégrés est une activité stimulante, car elle cible des spécifications de conception complexes qui sont étroitement liées à la taille des transistors et dépendant de la technologie du dispositif. Ce travail porte sur la conception d'un convertisseur analogique-numérique de type Flash ADC 4bit en utilisant la technologie CMOS. Le logiciel DSCH est utilisé pour schématiser les circuits électriques et le logiciel MICROWIND est utilisé pour dessiner le layout et valider la conception par simulation. Ce manuscrit contient aussi une section théorique, des notions de base sur les circuits intégrés et la conversion analogique numérique.

**Mots clés :** Convertisseur analogique numérique ; ADC flash ; DSCH ; Microwind

## Abstract

Integrated circuit design is a challenging activity because it targets complex design specifications that are closely related to transistor size and dependent on device technology. This work concerns the design of an analog-to-digital converter of Flash ADC 4bit type using CMOS technology. DSCH software is used to diagram electrical circuits and MICROWIND software is used to draw the layout and validate the design by simulation. This manuscript also contains a theoretical section, basic notions on integrated circuits and analog-to-digital conversion.

Keywords: Digital analog converter; Flash ADC; DSCH; Microwind

## Liste des acronymes et abréviations

Acronymes	Signification
ADC	Analogue Digital Converter
CAN	Convertisseur Analogique Numérique
EDA	Electronic Design Automation
MSB	Most Significant Bit
LSB	Less Significant Bit
MOS	Metal Oxide Semiconductor
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
NMOS	Negative-channel Metal Oxide Semiconductor
PMOS	Positive-channel Metal Oxide Semiconductor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
JFET	Junction Field Effect Transistor
CI	Circuit intégré

## Table des matières

### Chapitre 01 Les circuits intégrés

<b>1.1 Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Microélectronique</b> .....	<b>1</b>
1.2.1 Définitions.....	1
1.2.2 Les composants de microélectronique .....	1
<b>1.3 Les circuits intégrés</b> .....	<b>2</b>
1.3.1 Définition .....	2
1.3.2 Historique.....	2
<b>1.4 Circuit intégré analogique</b> .....	<b>3</b>
<b>1.5 Circuit intégré numérique</b> .....	<b>3</b>
<b>1.6 Principe de fonctionnement</b> .....	<b>3</b>
1.6.1. Inverseur NMOS .....	3
1.6.2 Inverseurs CMOS .....	3
<b>1.7 Circuit combinatoire CMOS</b> .....	<b>4</b>
1.7.1 Structure générale.....	4
1.7.2 Principe .....	4
1.7.3 Réalisation.....	4
<b>1.8 Techniques de fabrication</b> .....	<b>4</b>
<b>1.8.1</b> Etapes de fabrication .....	<b>5</b>
<b>1.9 Les portes logiques</b> .....	<b>6</b>
1.9.1 Composition des portes logiques.....	6
1.9.2 Principes de fonctionnement de base des portes logiques.....	7
<b>1.10 Porte ET (AND)</b> .....	<b>7</b>
<b>1.11 Porte OU (OR)</b> .....	<b>8</b>
<b>1.12 Porte NON (NOT)</b> .....	<b>9</b>
<b>1.13 Porte OU exclusif (XOR)</b> .....	<b>10</b>
<b>1.13 Porte non OU exclusif (XNOR)</b> .....	<b>11</b>
<b>1.14 Conclusion</b> .....	<b>12</b>

### Chapitre 02

#### Les convertisseurs Analogiques Numériques

<b>2.1 Introduction</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2 Le signal analogique</b> .....	<b>14</b>
<b>2.3. La conversion du signal analogique en numérique</b> .....	<b>14</b>

2.3.1 L'échantillonnage.....	14
2.3.2 La Quantification.....	15
2.3.3 Le codage .....	16
<b>2.4 Les différentes architectures de CAN.....</b>	<b>17</b>
2.4.1 CAN Sigma Delta .....	17
2.4.2 CAN Pipeline .....	18
2.4.3 CAN à Approximations successives (SAR).....	19
2.4.4 Le CAN double rampe .....	19
<b>2.5 CAN Flash.....</b>	<b>20</b>
2.5.1 Le comparateur.....	20
2.5.2 L'encodeur .....	20
2.5.3 Le CAN Flash N bits .....	21
2.5.4 Le CAN flash 4 bits .....	22
<b>2.6 Avantages et inconvénients.....</b>	<b>22</b>
<b>2.7 Conclusion .....</b>	<b>22</b>

## Chapitre 03

### CAN Flash 4 bits

<b>3.1 Introduction.....</b>	<b>24</b>
<b>3.2 A propos de DSCH.....</b>	<b>24</b>
<b>3.3. A propos de MICROWIND.....</b>	<b>24</b>
<b>3.4. CAN Flash 4 bits.....</b>	<b>25</b>
<b>3.5 Simulation du comparateur flash 4bit .....</b>	<b>25</b>
3.5.1 Tensions de référence .....	25
3.5.2 Le comparateur .....	26
3.5.3 Le Codeur .....	30
3.5.4. Le convertisseur analogique numérique flash 4 bit (ADC) .....	33
<b>3.6 Conclusion .....</b>	<b>35</b>
<b>Références.....</b>	<b>37</b>

## Liste des Figures

<b>Figure 1.1.</b> Jack St. Clair Kilby (November 8 , 1923 -June 20,2005) .....	2
<b>Figure 1.2.</b> Circuit intégré LM.....	3
<b>Figure 1.3.</b> Inverseurs CMOS .....	4
<b>Figure 1.4.</b> Circuit CMOS de la porte AND .....	7
<b>Figure 1.5.</b> Circuit CMOS de la porte OR .....	8
<b>Figure 1.6.</b> Circuit CMOS de la porte NOT.....	9
<b>Figure 1.7.</b> Circuit CMOS de la porte NOR.....	10
<b>Figure 1.8.</b> Schéma de circuit équivalent de la porte XOR .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure 2.1.</b> Schéma d'un échantillonnage à une fréquence $f_1$ .....	15
<b>Figure 2.2.</b> Représentation de l'effet du nombre de bits du convertisseur sur la quantification .....	15
<b>Figure 2.3.</b> Principe de la modulation Sigma-Delta. ....	18
<b>Figure 2.4.</b> Architecture de CAN pipeline .....	18
<b>Figure 2.5.</b> Détail de l'architecture d'un CAN SAR et chronogramme d'une conversion sur 4 bits. ...	19
<b>Figure 2.6.</b> Schéma de CAN double rampe .....	20
<b>Figure 2.7.</b> Convertisseur Flash. ....	21
<b>Figure 3.1.</b> Interface du logiciel DSCH .....	24
<b>Figure 3.2</b> Interface du logiciel MICROWIND .....	25
<b>Figure 3.3.</b> Schéma bloc du CAN figure à refaire .....	25
<b>Figure 3.4.</b> Schéma du circuit diviseur de tension .....	26
<b>Figure 3.5.</b> Schéma du comparateur .....	26
<b>Figure 3.6.</b> Code Verilog du Comparateur.....	27
<b>Figure 3.7.</b> Layout du comparateur.....	27
<b>Figure 3.8.</b> Simulation du comparateur.....	28
<b>Figure 3.9.</b> <b>Schéma du comparateur</b> .....	28
<b>Figure 3.10.</b> Code verilog du comparateur 4 bits.....	29
<b>Figure 3.11.</b> Layout du comparateur 4 bits .....	29
<b>Figure 3.12.</b> Simulation du comparateur.....	30
<b>Figure 3.13.</b> Circuit logique du codeur .....	31
<b>Figure 3.14.</b> Code verilog du codeur .....	32
<b>Figure 3.15.</b> Layout du codeur.....	32
<b>Figure 3.16.</b> Simulation du codeur.....	33
<b>Figure3.17.</b> Schéma de flash ADC .....	33
<b>Figure 3.18.</b> Code verilog du CAN flash 4 bits.....	34
<b>Figure 3.19</b> Layout du convertisseur 4 bits.....	34
<b>Figure 3.20</b> Simulation du convertisseur avec une rampe de tension.....	35
<b>Figure 3.21</b> Simulation du convertisseur avec une tension sinusoidale .....	35



## Liste des tableaux

<b>Tableau 1.1.</b> Tableau de vérité de la porte AND .....	7
<b>Tableau 1.2.</b> Tableau de vérité de la porte O .....	8
<b>Tableau 1.3.</b> Tableau de vérité de la porte NOT .....	9
<b>Tableau 1.4.</b> Tableau de vérité de la porte NOR.....	10
<b>Tableau 1.5.</b> Tableau de vérité de la porte XOR.....	11
<b>Tableau 1.6.</b> Tableau de vérité de la porte XNOR.....	12
<b>Tableau 2.1.</b> Code thermomètre. ....	16
<b>Tableau 2.2.</b> Codes bipolaires .....	17
<b>Tableau 3.1.</b> Table de vérité du codeur.....	30

# **Introduction Générale**

La microélectronique désigne l'ensemble des technologies de fabrication de composants qui utilisent des courants électriques pour transmettre, traiter ou stocker des informations. Les technologies de la microélectronique sont, en grande partie, à l'origine des formidables progrès réalisés ces dernières décennies dans le domaine entre autres de l'informatique, des télécommunications et de l'imagerie.

Au commencement était l'électronique, discipline née de la physique et dédiée à la manipulation des signaux électriques. L'électronique permet, au moyen de divers éléments appelés « composants », de construire des appareils capables de gérer ces signaux électriques dans le but de transmettre ou de recevoir des informations. L'émission d'ondes radio à des fins de communication en fut l'une des premières applications.

La découverte des matériaux semi-conducteurs et l'invention du transistor, au début des années 60, a véritablement lancé la miniaturisation des composants électroniques et l'essor de la microélectronique. Parallèlement, le passage du signal analogique (à variation continue) au signal numérique (codé en une succession de 0 et de 1) a facilité le développement de circuits électroniques aux fonctions de plus en plus performantes. De la résistance au transistor, du circuit intégré au microprocesseur en passant par les convertisseurs ou les diodes électroluminescentes (Leds)... les composants de la microélectronique, familièrement appelé « puces » (ou chip en anglais), sont extrêmement nombreux. Ils forment un étonnant bestiaire remplissant des fonctions extrêmement variées.

De nos jours, la conversion analogique-numérique (CAN) est devenue une opération courante dans de nombreux domaines tels que l'informatique, l'audio, la vidéo, la communication, l'industrie, etc.

Notre travail consiste à étudier un convertisseur analogique numérique 4bits.

Notre mémoire est divisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur les circuits intégrés.

Le deuxième chapitre portera sur les différents convertisseurs analogiques numériques.

Dans le troisième chapitre, Nous présenterons le circuit de notre convertisseur analogique numérique flash 4 bits, son layout ainsi que les simulations réalisées par les logiciels DSCH et Microwind.

Enfin, nous terminerons par une conclusion.

# **Chapitre 01**

## **Les circuits intégrés**

# Chapitre 01 Les circuits intégrés

---

## 1.1 Introduction

Le domaine de la micro-électronique occupe une place essentielle dans l'étude et la fabrication des composants électroniques à l'échelle micrométrique. Grâce à des technologies telles que la photolithographie, la micro-électronique permet l'intégration de multiples fonctions électroniques sur une seule puce de silicium ou d'autres semi-conducteurs. Les circuits intégrés, communément appelés puces, jouent un rôle central dans la micro-électronique en offrant des solutions économiques et compactes pour diverses applications. Ce chapitre explore les différentes facettes de la micro-électronique, des composants fondamentaux tels que les diodes et les transistors, aux circuits intégrés analogiques et numériques, en passant par les principes de fonctionnement et les techniques de fabrication.

## 1.2 Microélectronique

### 1.2.1 Définitions

La micro-électronique est une spécialité du domaine de l'électronique. Tel que son nom le suggère, la micro-électronique s'intéresse à l'étude et à la fabrication de composants électroniques à l'échelle micrométrique. Ces composants sont fabriqués à partir de matériaux à semi-conducteurs (comme le Silicium) au moyen de diverses technologies dont la photolithographie. Cette technologie permet l'intégration de nombreuses fonctions électroniques sur un même morceau de Silicium (ou autre semi-conducteur) et donc à un prix plus bas. Les circuits ainsi réalisés sont appelés puces ou circuits intégrés. Ils peuvent être standards ou spécifiques à une application (ils sont alors nommés "ASIC" : Application Specific Integrated Circuit). Tous les composants électroniques discrets : les transistors, les condensateurs, les inductances, les résistances, les diodes et, bien sûr, les isolants et les conducteurs, ont leur équivalent en micro-électronique.

### 1.2.2 Les composants de microélectronique

De la résistance au transistor, du circuit intégré au microprocesseur en passant par les convertisseurs ou les diodes électroluminescentes (Leds)... Les composants de la microélectronique, familièrement appelés « puces », sont extrêmement nombreux. Ils forment un étonnant bestiaire remplissant des fonctions extrêmement variées.

Parmi les centaines de composants microélectroniques existants, on peut relever par exemple, parmi les plus célèbres :

- **La diode** désigne un dispositif fabriqué à l'aide de matériaux semi-conducteurs laissant passer le courant électrique dans un seul sens, le bloquant dans l'autre. Il existe de nombreuses variétés de diodes, selon les propriétés des matériaux utilisés. Les diodes électroluminescentes (Leds), sont désormais largement utilisées pour produire de la lumière en consommant très peu d'énergie.
- **Le transistor** (transfer resistor) est un composant semi-conducteur qui permet de contrôler un courant électrique (l'interrompre, l'amplifier ou le moduler). Il a supplanté rapidement le tube électronique : démarrait quasi instantanément, sans temps de chauffe, beaucoup plus petit et léger. Il a pu être fabriqué industriellement dès les années 50.
- **Le microprocesseur** est un processeur miniaturisé composé d'un seul circuit intégré. Réalisé par gravure sur une surface de silicium, les premiers microprocesseurs rassemblaient quelques centaines de composants électroniques. Les microprocesseurs actuels concentrent plusieurs milliards de

# Chapitre 01 Les circuits intégrés

transistors et sont capables d'effectuer simultanément un très grand nombre d'opérations de calcul [1].

## 1.3 Les circuits intégrés

### 1.3.1 Définition

Le circuit intégré (CI), aussi appelé puce électronique, est un composant électronique reproduisant une ou plusieurs fonctions électroniques plus ou moins complexes, intégrant souvent plusieurs types de composants électroniques de base dans un volume réduit, rendant le circuit facile à mettre en œuvre. Il existe une très grande variété de ces composants divisés en deux grandes catégories : analogique et numérique.

### 1.3.2 Historique

Jack Kilby (1923–2005) est l'inventeur du circuit intégré. En 1958, cet Américain, alors employé par Texas Instruments, créait le tout premier circuit intégré, jetant ainsi les bases du matériel informatique moderne. Pour la petite histoire Jack Kilby, qui venait de rejoindre la compagnie, a fait cette découverte alors que la plupart de ses collègues profitaient de vacances organisées par Texas Instruments. À l'époque, Kilby avait tout simplement relié entre eux différents transistors en les câblant à la main. Il ne faudra par la suite que quelques mois pour passer du stade de prototype à la production de masse de puces en silicium contenant plusieurs transistors. Cette découverte a valu à Kilby un prix Nobel de physique en 2000, alors que ce dernier siégeait toujours au directoire de Texas Instruments et détenait plus de 60 brevets à son nom [2].



**Figure 1.1.** Jack St. Clair Kilby (November 8 , 1923 -June 20,2005) [2]

# Chapitre 01 Les circuits intégrés

## 1.4 Circuit intégré analogique

Les composants les plus simples peuvent être de simples transistors encapsulés les uns à côté des autres sans liaison entre eux, jusqu'à des assemblages réunissant toutes les fonctions requises pour le fonctionnement d'un appareil dont il est le seul composant.

Les amplificateurs opérationnels sont des représentants de moyenne complexité de cette grande famille où l'on retrouve aussi des composants réservés à l'électronique haute fréquence et de télécommunication.

Un exemple de circuit analogique : l'ampli op *LM741* et une ribambelle de cousin.

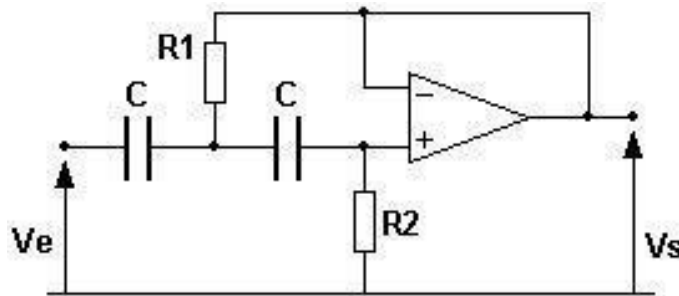


Figure 1.2. Circuit intégré LM741

## 1.5 Circuit intégré numérique

Les circuits intégrés numériques les plus simples sont des portes logiques (et, ou, non), les plus complexes sont les microprocesseurs et les plus denses sont les mémoires. On trouve de nombreux circuits intégrés dédiés à des applications spécifiques (**ASIC** pour *Application Specific Integrated Circuit*), notamment pour le traitement du signal (traitement d'image, compression vidéo...) on parle alors de DSP (pour *Digital Signal Processor*). Une famille importante de circuits intégrés est celle des composants de logique programmable (FPGA, CPLD). Ces composants sont amenés à remplacer les portes logiques simples en raison de leur grande densité d'intégration.

## 1.6 Principe de fonctionnement

### 1.6.1. Inverseur NMOS

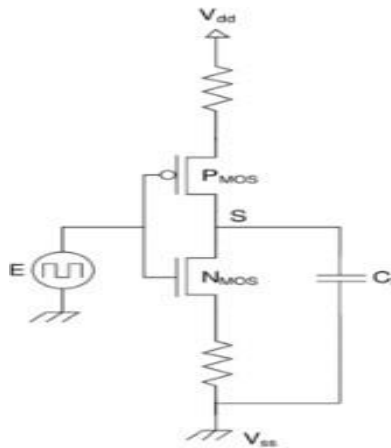
Lorsque l'entrée est à 0L, le transistor est bloqué ; la sortie est reliée à la tension d'alimentation (1L) par l'intermédiaire de la résistance de charge, et elle est isolée de la tension de référence (0L) par le transistor. Lorsque l'entrée est à 1L, le transistor est actif ; la sortie est reliée à la tension de référence (0L) par l'intermédiaire du transistor de signal, et à la tension d'alimentation (1L) par la résistance de charge.

### 1.6.2 Inverseurs CMOS

Un inverseur CMOS est constitué de deux transistors MOS complémentaires :

- Un transistor NMOS (transistor "de signal"),
- Un transistor PMOS (transistor "de charge").

# Chapitre 01 Les circuits intégrés



**Figure 1.3.** Inverseurs CMOS

Lorsque l'entrée est à 0L, le transistor de signal est bloqué et le transistor de charge est actif ; la sortie est reliée à la tension d'alimentation (1L) par l'intermédiaire de transistor de charge, et isolé de la tension de référence (0L) par le transistor de signal. Lorsque l'entrée est à 1L, le transistor de signal est actif et le transistor de charge est bloqué ; la sortie est reliée à la tension de référence (0L) par l'intermédiaire du transistor de charge, et isolée de la tension d'alimentation (1L) par le transistor de charge.

## 1.7 Circuit combinatoire CMOS

### 1.7.1 Structure générale

Un circuit combinatoire CMOS est constitué d'un réseau de transistors NMOS et d'un réseau de transistors PMOS. [3]

### 1.7.2 Principe

Le réseau de transistors PMOS :

- Relier à  $V_{DD}$  les sorties qui doivent être à 1L
- Isoler de  $V_{DD}$  les sorties qui doivent être à 0L ;

Le réseau de transistors NMOS :

- Relier à  $V_{SS}$  les sorties qui doivent être à 0L ;
- Isoler de  $V_{SS}$  les sorties qui doivent être à 1L ; [3]

### 1.7.3 Réalisation

Les fonctions "OU " sont réalisées avec des blocs de transistors en parallèle ; les fonctions "Et" sont réalisées avec des blocs de transistors en cascade.

## 1.8 Techniques de fabrication

La fabrication d'un circuit intégré est un procédé complexe dont la tendance est à se compliquer de plus en plus.

# Chapitre 01 Les circuits intégrés

- Le motif de base est le transistor, et ce sont ensuite les interconnexions métalliques entre les transistors qui réalisent la fonction particulière du circuit.
- L'aluminium est souvent employé dans ce but, mais une technologie plus performante permet l'emploi du cuivre.
- On utilise parfois du silicium polycristallin, également conducteur, notamment pour la grille du transistor

La matière première de base habituellement utilisée pour fabriquer les circuits intégrés est le silicium.

Néanmoins, d'autres matériaux sont parfois employés, comme le germanium ou l'arséniure de gallium.

Le silicium est un semi-conducteur dans sa forme mono-cristalline. Ce matériau doit être pur à 99,99%.

On fabrique d'abord un barreau cylindrique de silicium en le cristallisant très lentement. Ce barreau est ensuite découpé pour être utilisé sous forme de galettes de 100 à 800  $\mu\text{m}$  d'épaisseur et ayant jusqu'à 300 mm de diamètre, appelé *wafer* (galette, en anglais). Un wafer va supporter de nombreux circuits intégrés.

## **1.8.1 Etapes de fabrication**

Le nombre d'étapes de la fabrication des circuits intégrés a crû considérablement depuis 20 ans. Il peut atteindre plusieurs dizaines pour certaines productions spécialisées. Toutefois, on retrouve à peu près toujours la même série d'étapes :

- **Préparation de la couche** on expose le wafer à du dioxygène pur après chauffage pour fabriquer une couche d'oxyde (isolant) en surface, ensuite le wafer est recouvert d'un vernis photosensible.
- **Transfert** on transfère le dessin du circuit à reproduire sur la surface photosensible à l'aide d'un masque, comme pour la peinture au pochoir, en l'exposant aux ultraviolets, (ou aux rayons X, pour les gravures les plus fines). Le vernis non soumis aux rayonnements est dissout grâce à un solvant spécifique.
- **Gravure** l'oxyde de silicium est donc protégé par le vernis aux endroits exposés aux ultraviolets. Un agent corrosif va creuser la couche d'oxyde aux endroits non protégés.
- **Dopage** on dissout ensuite le vernis exposé avec un autre solvant, et des ions métalliques, appelés *dopants*, sont introduits dans le silicium exposé là où l'oxyde a été creusé, afin de le rendre conducteur.
- **Couche suivante** l'opération est renouvelée pour créer les couches successives du circuit intégré ou du microprocesseur (jusqu'à 20).
- On détermine la qualité de la gravure selon le plus petit motif qu'il est possible de graver, en l'occurrence la largeur de la grille du transistor MOS.



# Chapitre 01 Les circuits intégrés

-En 2004, les gravures les plus fines en production sont de 0,13  $\mu\text{m}$  (ou 130 nm) et **90 nm**.

-En 2006, les gravures les plus fines en production sont de 60 nm et **30 nm**.

## **-Phases finales**

- On dépose une pellicule métallique aux endroits où le circuit devra être en contact avec les broches de sortie.

- Les circuits intégrés sont testés directement sur le wafer. Les puces défectueuses sont marquées. Il s'agit de l'EWS

- Le wafer est finalement découpé au diamant ou via un procédé de découpe laser pour obtenir des *die*.

- Les puces ainsi obtenues sont insérées dans un boîtier individuel de protection et reliées aux broches qui vont leur permettre de communiquer avec l'extérieur.

Des tests de validation sévères et individuels sont alors entrepris pour qualifier les microprocesseurs, en fréquence et en température.

## **1.9 Les portes logiques**

Les portes logiques sont les éléments de base de tout système numérique. C'est un circuit électronique ayant une ou plusieurs entrées et une seule sortie.

La relation entre l'entrée et la sortie est basée sur une certaine logique. Sur cette base, les portes logiques sont nommés porte ET, porte OU, porte NON, etc.

Les portes logiques numériques sont disponibles en deux familles de base ou formes :

- **TTL** qui signifie Transistor-Transistor Logic comme la série 7400,

- **CMOS** qui signifie Complémentaire Métal-Oxyde-Silicium qui est la série 4000 [4].

### **1.9.1 Composition des portes logiques**

De manière générale, les circuits intégrés logiques TTL utilisent des transistors à jonction bipolaire de type NPN et PNP.

Par contre, les circuits intégrés logiques CMOS utilisent des Transistors à effet de champ de type MOSFET ou JFET pour leurs circuits d'entrée et de sortie.

Les portes logiques peuvent être constituées de résistances et de transistors ou de diodes. Une résistance peut généralement être utilisée comme résistance pull-up ou pull-down.

Les résistances pull-up et pull-down sont utilisées lorsqu'il ya des entrées de porte logique inutilisées pour se connecter à un niveau logique 1 ou 0. Cela empêche toute fausse commutation de la porte [4].

# Chapitre 01 Les circuits intégrés

## 1.9.2 Principes de fonctionnement de base des portes logiques

L'état logique d'un terminal peut changer à mesure que le circuit traite les données. Les conditions binaires hautes ou basses sont représentées par différents niveaux de tension.

Dans la plupart des portes logiques, l'état bas est d'environ zéro volt (0 V), tandis que l'état haut est d'environ cinq volts positifs (+5 V). [4]

### 1.10 Porte ET (AND)

Elle comporte deux entrées et une sortie, pour que la sortie soit au niveau logique 1, il faut que les deux entrées soient à 1. Dans le cas contraire, la sortie est à 0 [4]


symbole	table de vérité		
	B	A	Q
 2 entrées porte ET	0	0	0
	0	1	0
	1	0	0
	1	1	1
	expression boolean $Q = A.B$		
A ET B donne Q			

Tableau 1.1. Tableau de vérité de la porte AND [4]

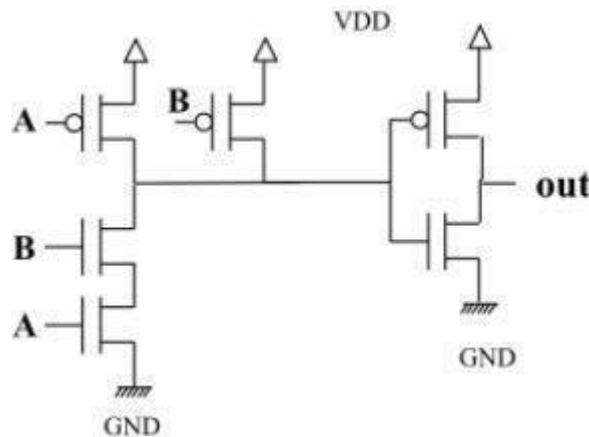


Figure 1.4. Circuit CMOS de la porte AND [4]

# Chapitre 01 Les circuits intégrés

## 1.11 Porte OU (OR)

La porte OR ( OU) tire son nom du fait qu'elle se comporte comme l'opérateur logique inclusif OR (OU).

La sortie a pour valeur 1 logique lorsqu'une entrée ou lorsque les deux entrées ont pour valeur 1 logique. Si les deux entrées ont pour valeur 0 logique, la sortie a pour valeur 0 logique [4]

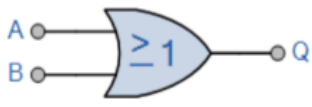
symbole	table de vérité		
	B	A	Q
 2entrées porte OU	0	0	0
	0	1	1
	1	0	1
	1	1	1
expression boolean $Q = A+B$	A OU B donne Q		

Tableau 1.2. Tableau de vérité de la porte OR [4]

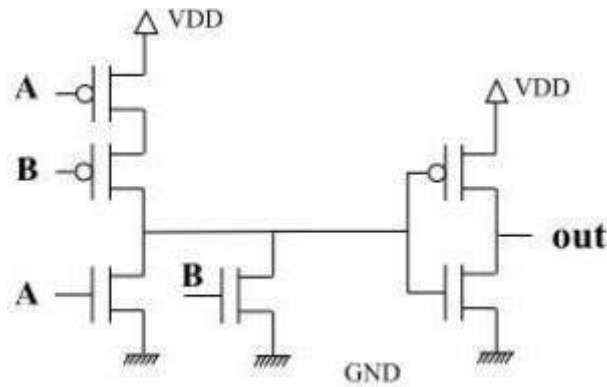


Figure 1.5. Circuit CMOS de la porte OR [4]

# Chapitre 01 Les circuits intégrés

## 1.12 Porte NON (NOT)

Un inverseur logique, parfois appelé porte NOT (NON) pour le différencier des autres types d'inverseurs électroniques, n'a qu'une seule entrée. Il en inverse l'état logique [4]

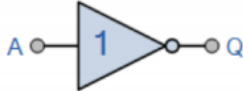
symbole	table de vérité	
 inverseur ou porte NON	A	Q
	0	1
	1	0
expression boolean $Q = \text{not } A \text{ or } \bar{A}$	l'inverse de A donne Q	

Tableau 1.3. Tableau de vérité de la porte NOT [4]

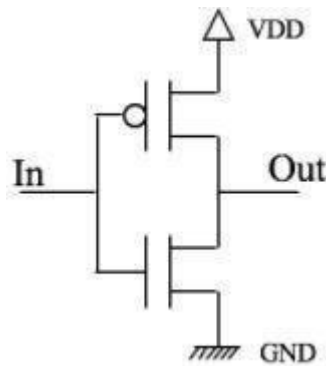


Figure 1.6. Circuit CMOS de la porte NOT [4]

## 1.13 La Porte NON OU (NOR)

La porte NOR (NON+OU) fonctionne comme une porte OR suivie d'un inverseur. La sortie a pour valeur 1 logique lorsque les deux entrées ont pour valeur 0 logique. Dans tous les autres cas, la sortie a pour valeur 0 logique [4].

# Chapitre 01 Les circuits intégrés

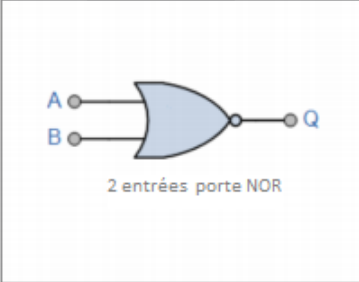
symbole	table de vérité		
 <p>2 entrées porte NOR</p>	B	A	Q
	0	0	1
	0	1	0
	1	0	0
	1	1	0
expression booleen $Q = \overline{A+B}$	A OU B donne NON Q		

Tableau 1.4. Tableau de vérité de la porte NOR [4]

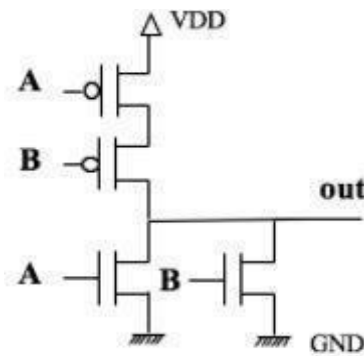


Figure 1.7. Circuit CMOS de la porte NOR [4]

## 1.13 Porte OU exclusif (XOR)

La porte XOR (OU exclusif) fonctionne de la même manière que l'opérateur logique « soit /ou ». La sortie a pour valeur 1 logique lorsqu'une des deux entrées, mais non les deux, a pour valeur 1 logique. La sortie a pour valeur 0 logique si les deux entrées ont pour valeur 0 logique, ou si les deux entrées ont pour valeur 1 logique. Pour envisager ce circuit différemment, considérez que la sortie a pour valeur 1 si les entrées sont de valeurs différentes, et 0 si les entrées sont de même valeur [4].

# Chapitre 01 Les circuits intégrés

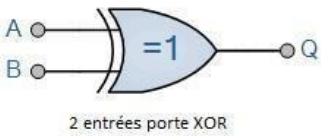
symbole	table de vérité		
	B	A	Q
	0	0	0
	0	1	1
	1	0	1
	1	1	0
expression boolean : $Q = A \oplus B$	A OU B mais pas les deux donne Q		

Tableau 1.5. Tableau de vérité de la porte XOR [4]

## - Circuit électronique équivalent à la porte logique XOR

L'inconvénient du circuit équivalent XOR est que la conception de base nécessite au moins trois types de portes logiques : OU, NAND et enfin ET dans ce cas présent de figure 1.8. [4]

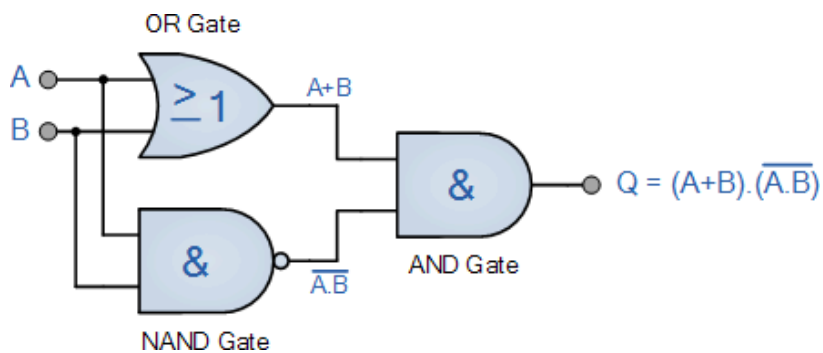
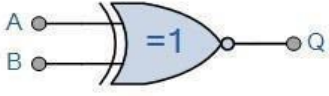


Figure 1.8. Schéma de circuit équivalent de la porte XOR [4]

### 1.13 Porte non OU exclusif (XNOR)

La porte XNOR (NOR exclusif) fonctionne comme une porte XOR suivie d'un inverseur. Sa sortie a pour valeur 1 logique si les entrées sont de mêmes valeurs, et pour valeur 0 logique si les entrées sont différentes [4].

# Chapitre 01 Les circuits intégrés

symbole	table de vérité		
 2 entrées porte XNOR	B	A	Q
	0	0	1
	0	1	0
	1	0	0
	1	1	1
expression boolean $Q = A \oplus B$	A = B = 0 OU A = B = 1 donne Q		

**Tableau 1.6.**Tableau de vérité de la porte XNOR [4]

- **Circuit électronique équivalent à la porte logique XNOR :** Comme XOR le circuit équivalent XNOR nécessite au moins troistypes de portes logiques. [4]

## 1.14 Conclusion

En conclusion, la micro-électronique est une discipline essentielle dans le domaine de l'électronique, se concentrant sur la fabrication de composants électroniques à l'échelle micronique. Les circuits intégrés, tels que les puces, sont le résultat de cette technologie avancée. Grâce aux progrès de la micro-électronique, nous bénéficions de dispositifs électroniques de plus en plus performants, compacts et abordables. L'importance de la micro-électronique dans notre société moderne ne peut être sous-estimée, car elle permet le développement de nombreux domaines technologiques, de l'informatique aux télécommunications, en passant par l'électronique grand public.

# **Chapitre 02**

## **Les convertisseurs Analogiques Numériques**



# **Chapitre02 Les Convertisseurs Analogiques Numériques**

## **2.1 Introduction**

Un convertisseur analogique-numérique (CAN, parfois convertisseur A/N, ou en anglais ADC pour Analog to Digital Converter ou plus simplement A/D) est un dispositif électronique dont la fonction est de traduire une grandeur analogique en une valeur numérique codée sur plusieurs bits. Le signal converti est généralement une tension électrique.

Le processus de conversion repose sur la quantification d'un signal c'est-à-dire par son appariement au niveau quantifié le plus proche (que l'on pourrait rapprocher du phénomène de l'arrondi pour les nombres à virgule).

La quantification d'un signal en dégrade sa richesse (il y a une perte d'information), c'est donc une transformation destructrice qui s'opère.

On appelle quantum, le pas minimum de conversion représenté par la variation du bit de poids faible, qui est aussi la valeur de l'imprécision de mesure. Plus le nombre  $n$  de bits du convertisseur sur lesquels s'effectuent la conversion est grand, plus la quantification a un effet réduit dans la dégradation du signal (sans jamais l'annuler).

## **2.2 Le signal analogique**

Un signal analogique est un signal continu qui peut varier de manière infinie dans le temps et dans l'espace. Par exemple, le son, la lumière, la température, la pression, etc. sont des signaux analogiques. Cependant, les ordinateurs et les autres dispositifs électroniques ne peuvent traiter que des signaux numériques, c'est-à-dire des signaux qui sont représentés par des nombres binaires (0 et 1) et qui sont stockés sous forme de bits. Par conséquent, la conversion d'un signal analogique en numérique est nécessaire pour permettre aux ordinateurs de traiter ces signaux.

## **2.3. La conversion du signal analogique en numérique**

La conversion analogique-numérique se fait en trois étapes : l'échantillonnage, la quantification et le codage. L'échantillonnage consiste à prélever des échantillons du signal analogique à intervalles réguliers. La quantification consiste à attribuer une valeur numérique à chaque échantillon prélevé. Enfin, le codage consiste à représenter ces valeurs numériques sous forme de bits afin qu'elles puissent être stockées et traitées par un ordinateur.

### **2.3.1 L'échantillonnage**

L'échantillonnage consiste à prélever les valeurs d'un signal à intervalles définis, généralement réguliers. Il produit une suite de valeurs discrètes nommées échantillons.

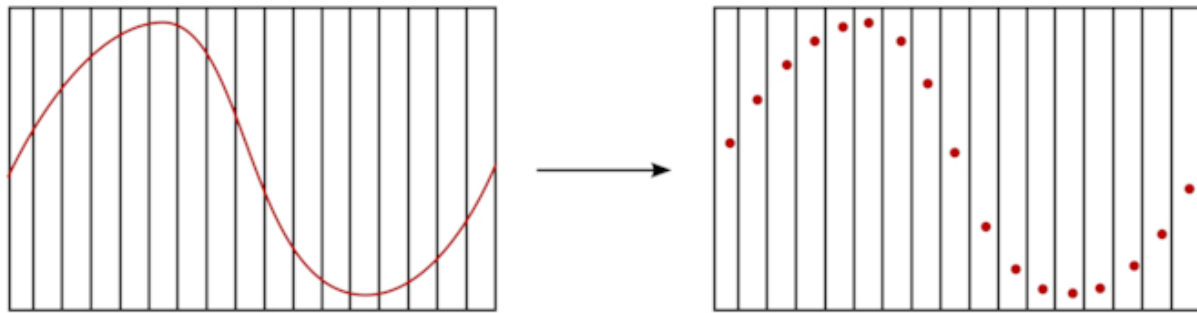
L'application la plus courante de l'échantillonnage est aujourd'hui la numérisation d'un signal variant dans le temps, mais son principe est ancien. La technique de l'échantillonnage permet :

- La reproduction des trois dimensions de l'image animée : le cinématographe
- La transmission d'une image par télégraphe.

Pour numériser le signal, la première étape consiste à mesurer son amplitude à intervalles de temps réguliers. L'échantillonnage consiste à prélever périodiquement des échantillons d'un signal analogique selon une période que l'on appellera période d'échantillonnage.

Plus la fréquence d'échantillonnage utilisée sera grande, plus les mesures seront fidèles au signal original.

# Chapitre02 Les Convertisseurs Analogiques Numériques



**Figure 2.1.** Schéma d'un échantillonnage à une fréquence  $f_1$

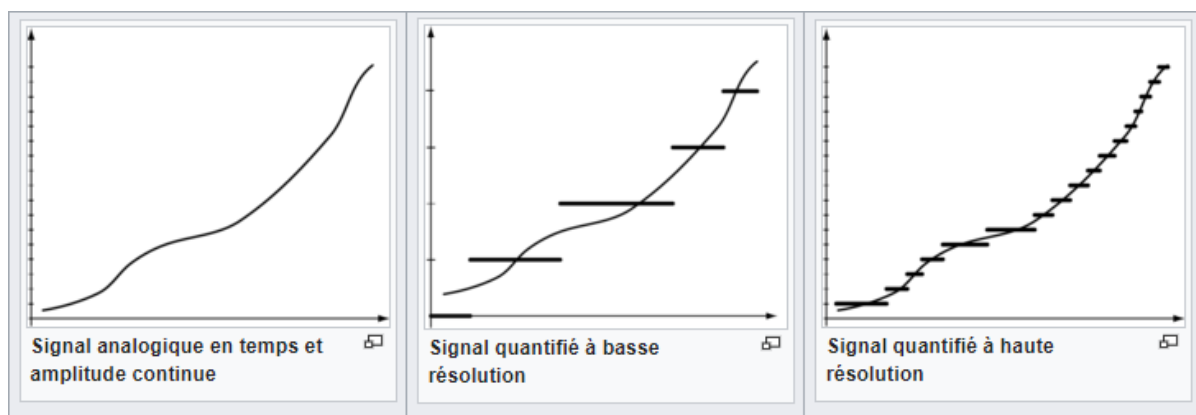
La théorie de l'échantillonnage s'applique à tout système capturant des valeurs à intervalles définis, La plupart du temps, l'intervalle entre chaque échantillon est constant. Pour déterminer la méthode d'échantillonnage, il faut avoir une connaissance préalable du signal. Il faut au moins déterminer une fréquence maximale susceptible d'y être présente.

## 2.3.2 La Quantification

La quantification est le procédé qui permet d'approcher un signal continu par les valeurs d'un ensemble discret d'assez petite taille. On parle aussi de quantification pour approcher un signal à valeurs dans un ensemble discret de grande taille par un ensemble plus restreint.

L'application la plus courante de la quantification est la conversion analogique-numérique mais elle doit le développement de sa théorie aux problèmes de quantification pour la compression de signaux audio ou image.

Le but de la quantification est, à partir d'une valeur d'entrée donnée d'un espace  $E$ , de déterminer la valeur la plus proche dans l'ensemble  $F$  d'arrivée. Dans le cas d'une conversion analogique-numérique, l'ensemble  $E$  est continu, et l'ensemble d'arrivée est discret, de taille finie. Cet ensemble est généralement appelé dictionnaire.



**Figure 2.2.** Représentation de l'effet du nombre de bits du convertisseur sur la quantification d'un signal

# Chapitre02 Les Convertisseurs Analogiques Numériques

## 2.3.3 Le codage

Dans le domaine des télécommunications, le codage est destiné à être utilisé dans les systèmes de communication pour transmettre des données.

Pour le transport de données numériques, le codage est souvent utilisé. Il consiste à représenter le signal numérisé à transporter, par un autre signal qui présente des variations d'amplitude régulièrement espacées dans le temps, celui-ci étant adapté aux propriétés physiques spécifiques des canaux de transmissions (et des équipements récepteurs). Le codage du signal est utilisé pour représenter les 1 et les 0 d'un signal numérique sur le lien, ce processus est appelé codage en ligne. Après le codage en ligne, le signal peut être directement émis sur le canal de transmission, sous la forme de variations de la tension ou du courant.

En mode unipolaire le codage le plus couramment utilisé est le code binaire naturel. Un mot binaire s'écrit :  $b^1 b^2 \dots b^{N-1} b^N$ , avec  $b^1$  le bit de poids fort (PF, ou MSB Most Significant Bit ) et  $b^N$  le bit de poids faible (pf, ou LSB Less Significant Bit ), le nombre décimal correspondant est : [5]

$$D = b^1 \times 2^{N-1} + b^2 \times 2^{N-2} + b^{N-1} \times 2^1 + b^N \times 2^0$$

A un code D donné correspond la tension :

$$V = q \times (b^1 \times 2^{N-1} + b^2 \times 2^{N-2} + \dots + b^{N-1} \times 2^1 + b^N \times 2^0)$$

Ou encore 
$$V = V_{PE} \times \left( \frac{b^1}{2} + \frac{b^2}{2^2} + \dots + \frac{b^N}{2^N} \right)$$

En fonction de l'architecture du CAN considéré on peut être amené à manipuler un code thermomètre. Par comparaison avec un code binaire classique sur N bits il s'écrit avec  $2^N - 1$  bits (Tableau 2.1) [5]

D	binaire	code thermometer
7	111	1111111
6	110	0111111
5	101	0011111
4	100	0001111
3	011	0000111
2	010	0000011
1	001	0000001
0	000	0000000

**Tableau 2.1.** Code thermomètre. [ 5]

# Chapitre02 Les Convertisseurs Analogiques Numériques

En mode bipolaire, on peut utiliser plusieurs codes courants présentés Tableau 2.2.

Le code binaire signé est obtenu en rajoutant un bit de signe devant le MSB au code binaire naturel. Pour un bit de signe nul, le nombre est positif, il est négatif pour un bit égale à un Le code binaire signé est peu propice aux opérations arithmétiques. [5]

D	Signé	Binaire décalé	Complément à 2
3	011	111	011
2	010	110	010
1	001	101	001
0	000/100	100	000
-1	101	011	111
-2	110	010	110
-3	111	001	101
-4	-	000	100

**Tableau 2.2.** Codes bipolaires. [5]

Le code binaire décalé consiste, comme son nom l'indique, à décaler le code binaire naturel. Il permet de compter de  $-2^{N-1}$  à  $2^{N-1}-1$ . b1 fait office de bit de signe. C'est un code fréquemment utilisé dans les CANs.

Le code complément à 2 correspond au code binaire décalé avec complémentation du bit de signe. Pour les nombres positifs on retrouve le code binaire naturel. Ce code doit son succès à sa facilité d'implémentation au niveau des opérateurs logiques. [5]

## 2.4 Les différentes architectures de CAN

On peut définir cinq grandes familles de convertisseurs analogiques numériques, présentant chacune une philosophie de fonctionnement particulière :

**2.4.1 CAN Sigma Delta** Les convertisseurs Sigma-Delta font partie de la famille des CAN à base temporelle, et leur principe est basé sur la théorie du sur-échantillonnage. La modulation Sigma-Delta consiste à convertir le signal analogique en un train de pulsations (généralement de type unaire) qui portera une information en fréquence plutôt qu'en tension ou courant (Figure 2.3). L'utilisation de pulsations se justifie par le fait qu'ils sont en pratique insensibles au bruit : une variation de 10mV sur une pulsation de 1V ne va pas changer sa valeur numérique [6].

# Chapitre02 Les Convertisseurs Analogiques Numériques

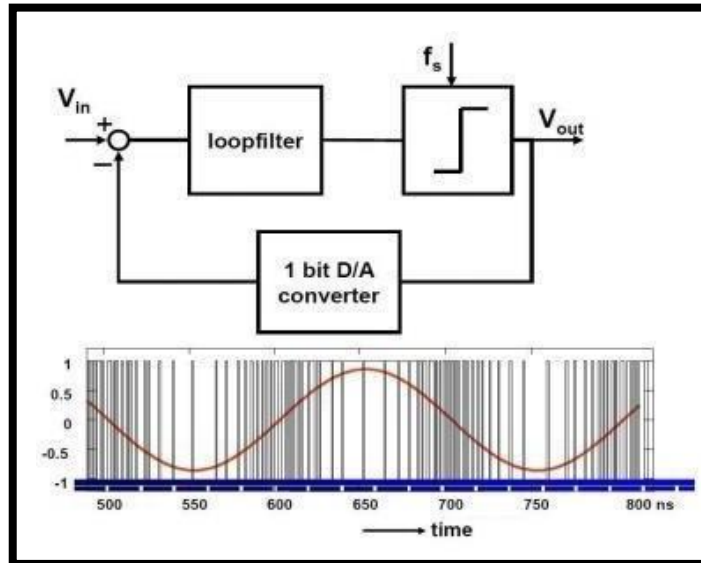


Figure 2.3. Principe de la modulation Sigma-Delta [6]

## 2.4.2 CAN Pipeline

Cette architecture consiste en une succession de différents étages. Chacun des étages contient : un circuit échantillonneur /bloqueur (E/B), un CAN à faible résolution, un convertisseur numérique - analogique, un circuit sommateur et un amplificateur.

Le convertisseur Pipeline est un compromis entre les CAN « Flash » et les CAN « SAR ». En effet, , les CAN « Flash » sont constitués de  $2^N - 1$  comparateurs et les CAN « SAR » d'un seul comparateur. Contrairement aux architectures de convertisseurs précédents, les CAN « Pipeline » répartissent l'opération de conversion sur M étages. L'architecture de ce convertisseur est illustrée sur la Figure 2.4 ci-dessous. [6]

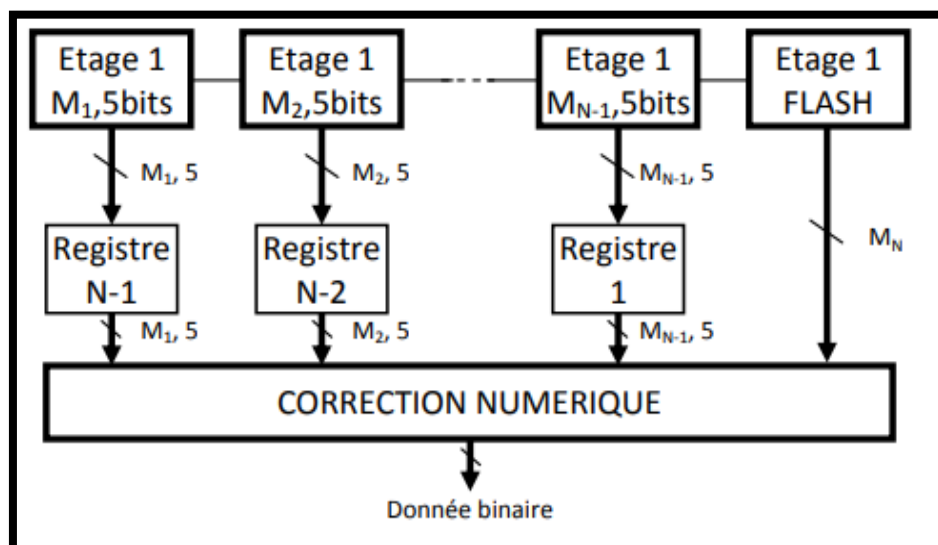


Figure2.4. Architecture de CAN pipeline [6]

# Chapitre02 Les Convertisseurs Analogiques Numériques

## 2.4.3 CAN à Approximations successives (SAR)

Le principe de l'architecture SAR est de tester successivement chaque bit en partant du bit de poids fort comme l'explique la Figure 2.5.

Pour réaliser ses opérations, le convertisseur est composé d'un CNA du même nombre de bits que sa résolution, d'un comparateur et d'un registre à approximation successive permettant l'analyse du résultat du test et le contrôle du CNA. La Figure 2.5 présente le détail de l'architecture du CAN SAR ainsi qu'un chronogramme de conversion [6].

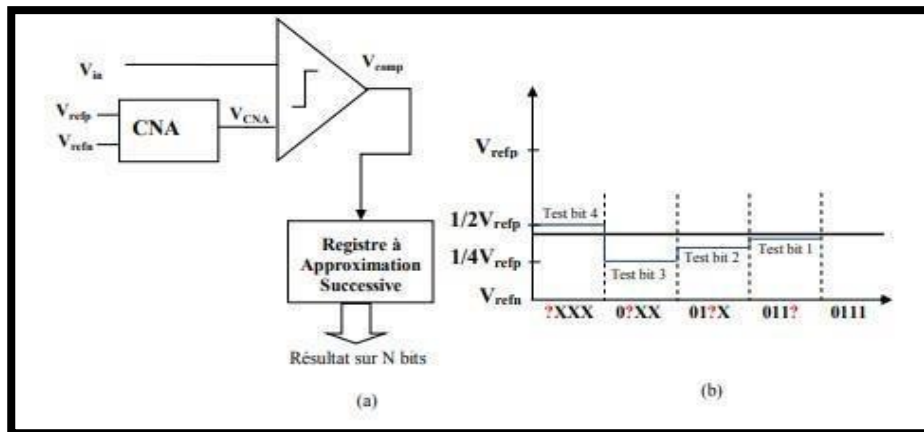


Figure 2.5. Détail de l'architecture d'un CAN SAR et chronogramme d'une conversion sur 4 bits. [6]

## 2.4.4 Le CAN double rampe

Le convertisseur analogique-numérique double rampe est un dispositif électronique qui transforme une tension en un temps, les 2 grandeurs étant proportionnelles. Ce temps peut ensuite être numérisé à l'aide d'un compteur.

Ce type de convertisseur fonctionne en deux étapes :

- Première étape : intégration de la tension à mesurer pendant une durée fixe appelée période d'intégration.
- Deuxième étape : décharge à courant du condensateur [6].

# Chapitre02 Les Convertisseurs Analogiques Numériques

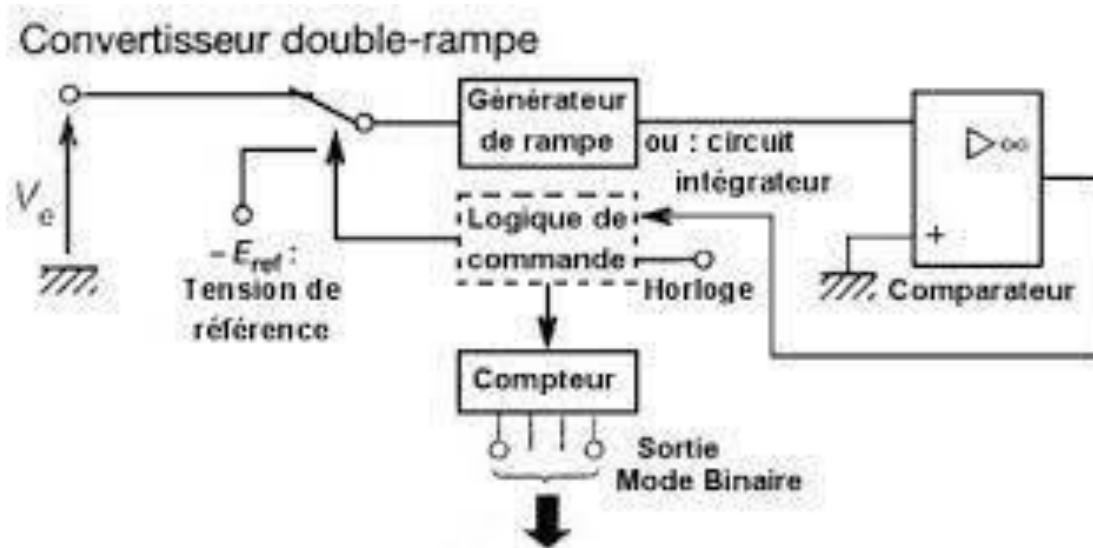


Figure 2.6. Schéma de CAN double rampe [6]

## 2.5 CAN Flash

Le convertisseur flash est un convertisseur analogique-numérique parallèle très rapide. Il utilise un ensemble parallèle de comparateurs pour convertir le signal analogique en signal numérique. Les comparateurs comparent le signal d'entrée à une tension de référence unique, et les sorties des comparateurs sont ensuite traitées par un circuit d'encodeur de priorité pour produire une sortie binaire. Cette technologie est la plus rapide des ADC et présente l'avantage de pouvoir produire une sortie non linéaire. L'entrée analogique à convertir est comparée simultanément aux  $2^N - 1$  tensions de seuil (pour un CAN N bit).

Ces tensions de seuil sont obtenues par un pont diviseur comportant  $2^N$  résistances connectées en série entre  $V_{ref}$  et la masse. Si toutes les résistances sont identiques on obtient des tensions de seuil correspondant à une quantification linéaire par défaut. Pour obtenir une quantification linéaire centrée, la résistance connectée à la masse est prise égale à  $R/2$  et celle connectée à  $V_{ref}$  égale à  $3R/2$ .

### 2.5.1 Le comparateur

Un comparateur est un composant électronique utilisé dans les convertisseurs analogique-numérique (ADC) pour comparer deux signaux et déterminer leur relation (supérieur, inférieur ou égal). Dans le contexte du texte, le comparateur est l'un des composants importants du flash ADC proposé. Il est conçu pour comparer le signal d'entrée analogique avec une tension de référence et générer une sortie numérique en fonction de la comparaison. Dans ce cas, le comparateur est conçu pour être peu sensible au bruit et avoir un rapport de réjection des modes communs élevé, ce qui signifie qu'il peut fonctionner de manière fiable même en présence de perturbations électromagnétiques et de variations de tension indésirables.

### 2.5.2 L'encodeur

Un encodeur est un composant électronique utilisé pour convertir une entrée de données dans un format spécifique, généralement en une sortie binaire correspondante. Dans le contexte du texte,

# Chapitre02 Les Convertisseurs Analogiques Numériques

l'encodeur est utilisé dans le processus de conversion du signal analogique en une sortie numérique dans le flash ADC proposé.

Plus précisément, après que les comparateurs ont produit leurs sorties numériques (1 ou 0) en fonction de la comparaison entre le signal analogique et la tension de référence, ces sorties sont appliquées à l'encodeur. L'encodeur convertit ensuite ces sorties des comparateurs (sous forme codée) en une sortie de données de 4 bits (un code binaire unipolaire).

En résumé, l'encodeur joue le rôle crucial de convertir les signaux numériques produits par les comparateurs en une sortie numérique binaire représentant la valeur numérique du signal analogique converti.

## 2.5.3 Le CAN Flash N bits

Un CAN Flash à N bits comporte  $2^N - 1$  comparateurs (un pour chaque seuil à comparer),  $2^N - 1$  bascules d'échantillonnage et une logique de conversion.

Chacun des comparateurs délivre en sortie le résultat de la comparaison entre la tension de seuil correspondante et le signal analogique  $V_a$ , le résultat est stocké dans une bascule d'échantillonnage [6].

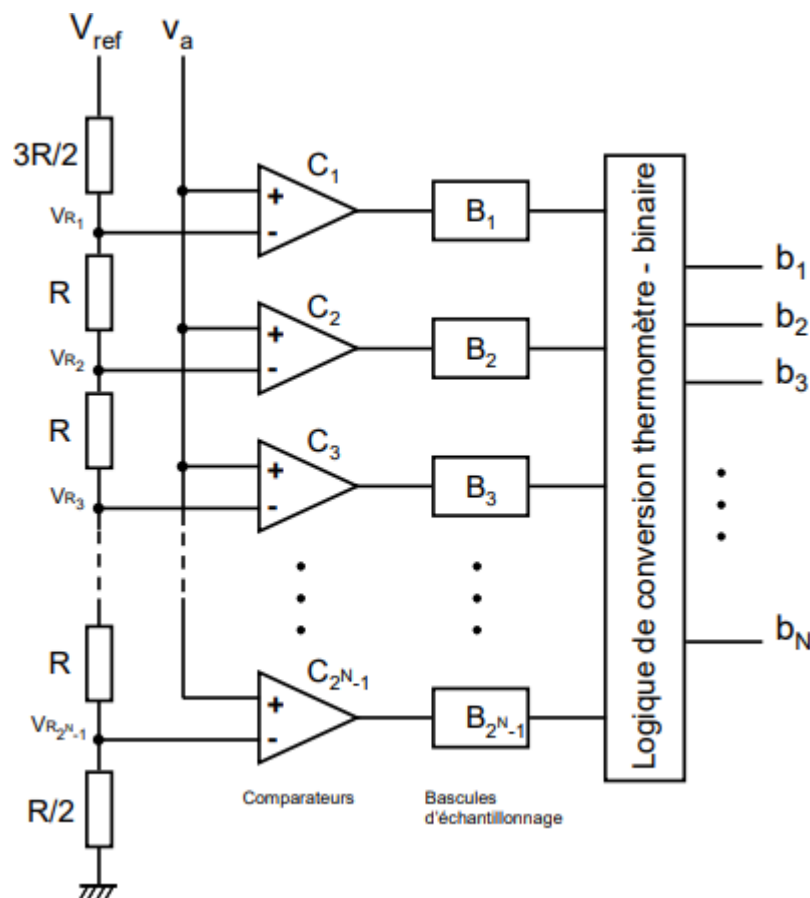


Figure 2.7. Convertisseur Flash [6]

La conversion est réalisée en un seul cycle d'horloge, ce type de convertisseur est donc par essence extrêmement rapide.



# **Chapitre02 Les Convertisseurs Analogiques Numériques**

Cependant leur complexité croît exponentiellement avec N le nombre de bits (en  $2^N$ ). Le coût résultant en terme de surface ( $2^N - 1$  comparateurs,  $2^N - 1$  bascules), pour une résolution élevée limite leur emploi à une douzaine de bits (on gardera à l'esprit  $2^{12} = 4096$ ) [6].

## **2.5.4 Le CAN flash 4 bits**

Le flash ADC 4 bits nécessite  $2^4$  résistances :

Nous prévoyons de convertir toute tension entre 0 et 1,8 V. La division de tension se fait comme suit :

$$V_a = \frac{M \times V_{ref}}{2}$$

Le flash ADC proposé comprend un comparateur en tant que composant important. Ce comparateur est conçu de manière à être moins sensible au bruit et à présenter un rapport de réjection des modes communs élevé. Le circuit utilise  $2^4 - 1 = 15$  amplificateurs différentiels en tant que comparateurs dans l'architecture du flash ADC 4 bits.

La sortie des comparateurs est sous forme codée. Par conséquent, un encodeur de priorité doit être conçu pour convertir le signal codé en une donnée de 4 bits (numérique) qui est un code binaire unipolaire.

Une tension analogique est appliquée aux bornes non inversées de tous les comparateurs à l'aide d'une seule ligne. Une tension de référence est appliquée aux bornes inversées des comparateurs à l'aide d'un circuit diviseur.

Chaque comparateur produit une sortie numérique sous forme de 1 ou de 0. Si la tension analogique inconnue est supérieure à la tension de référence, le comparateur produit une valeur logique élevée. Si la tension analogique est inférieure à la tension de référence, le comparateur produit une valeur logique basse, c'est-à-dire 0.

Ainsi, tous les comparateurs parallèles produisent une représentation numérique de la tension analogique sous forme de zéro et de un. Ces sorties des comparateurs sont ensuite appliquées à l'encodeur rapide. L'encodeur convertit ces zéros et uns en un nombre binaire et produit une sortie binaire numérique [6].

## **2.6 Avantages et inconvénients**

- Les plus rapides (vitesse de conversion jusqu'à 20 GHz).
- Résolution limitée (de 6 à 10bits).
- Puce de dimension importante.
- Capacité d'entrée élevée.
- Consommation importante [6]

## **2.7 Conclusion**

Comme nous l'avons vu au cours de ce chapitre, il existe de nombreuses architectures permettant la conversion d'un signal analogique en un signal numérique. Nous avons présenté leurs avantages et inconvénients en termes de performances, plus précisément sur Le CAN flash, qui nous intéresse dans ce travail.

# **Chapitre 03**

## **CAN Flash 4 bits**

# Chapitre 03 CAN Flash 4 bits

## 3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons la description et la simulation d'un convertisseur analogique-numérique (CAN) flash 4 bits en technologie CMOS dans l'environnement Microwind/DSCH. Un CAN flash est conceptuellement simple, mais la conception devient complexe (et lente) à mesure que la résolution augmente. Un dispositif 4 bits comporte un nombre gérable de composants : 15 comparateurs, 15 références de tension et un encodeur de priorité composé d'environ 20 portes logiques. Le développement de chacun de ces composants, ainsi que de plusieurs périphériques, est documenté en détail dans ce chapitre.

## 3.2 A propos de DSCH

Le programme DSCH est un éditeur logique qui est utilisé pour valider l'architecture du circuit logique avant de commencer la conception de la microélectronique. DSCH fournit un environnement convivial pour la conception logique hiérarchique et une simulation rapide avec analyse des retards, qui permet la conception et la validation de structures logiques complexes.

DSCH propose également les symboles, les modèles et le support d'assemblage pour les contrôleurs 8051 et PIC16F84. Les concepteurs peuvent créer des circuits logiques pour s'interfacer avec ces contrôleurs et vérifier les programmes logiciels à l'aide de DSCH

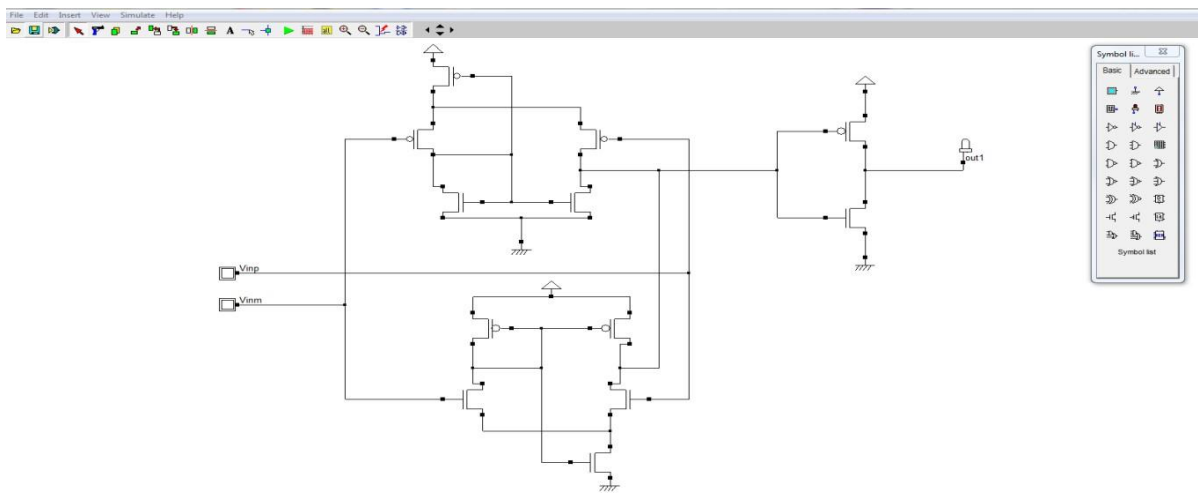


Figure 3.16. Interface du logiciel DSCH

## 3.3. A propos de MICROWIND

MICROWIND est un logiciel EDA (Electronic design automation) véritablement intégré englobant les conceptions de circuits intégrés du concept à la réalisation, permettant aux concepteurs de puces de concevoir au-delà de leur imagination. MICROWIND intègre la conception de puces front-end et back-end traditionnellement séparées en un seul flux, accélérant le cycle de conception et réduisant les complexités de conception.

Il intègre étroitement la mise en œuvre de signaux mixtes avec la mise en œuvre numérique, la simulation de circuit, l'extraction et la vérification au niveau des transistors, fournissant une initiative éducative innovante pour aider les individus à développer les compétences nécessaires pour les postes de conception dans pratiquement tous les domaines de l'industrie des circuits intégrés.

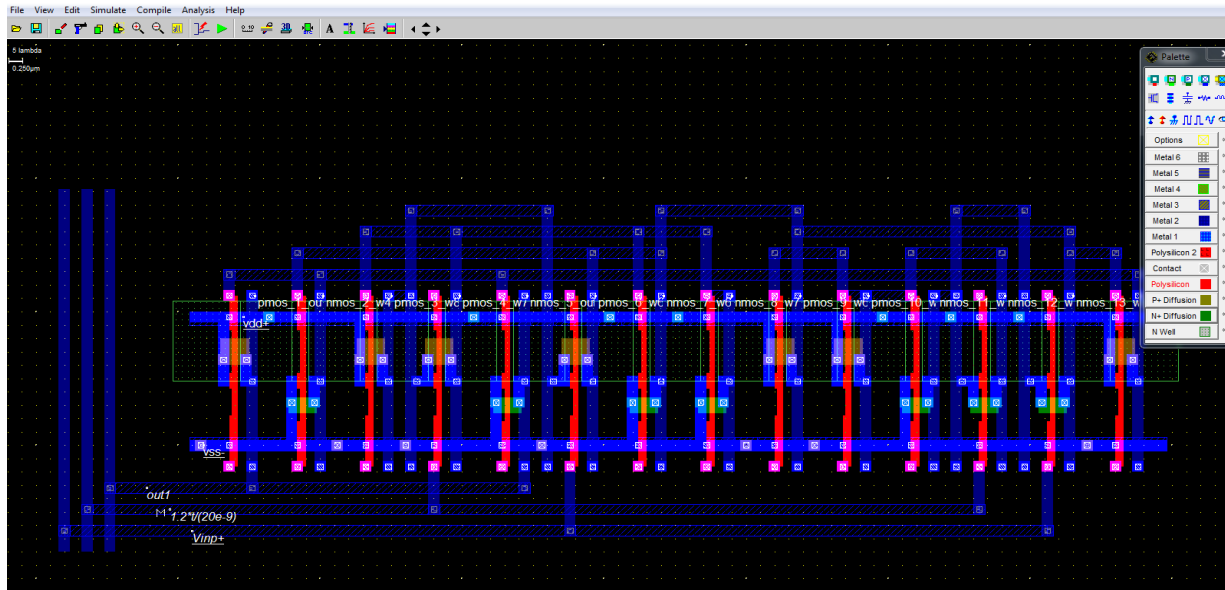


Figure 3.17 Interface du logiciel MICROWIND

## 3.4. CAN Flash 4 bits

Ce CAN flash est le plus rapide parmi tous les autres CAN. Il se compose du comparateur à grande vitesse, du circuit diviseur de tension résistif ainsi que du codeur.

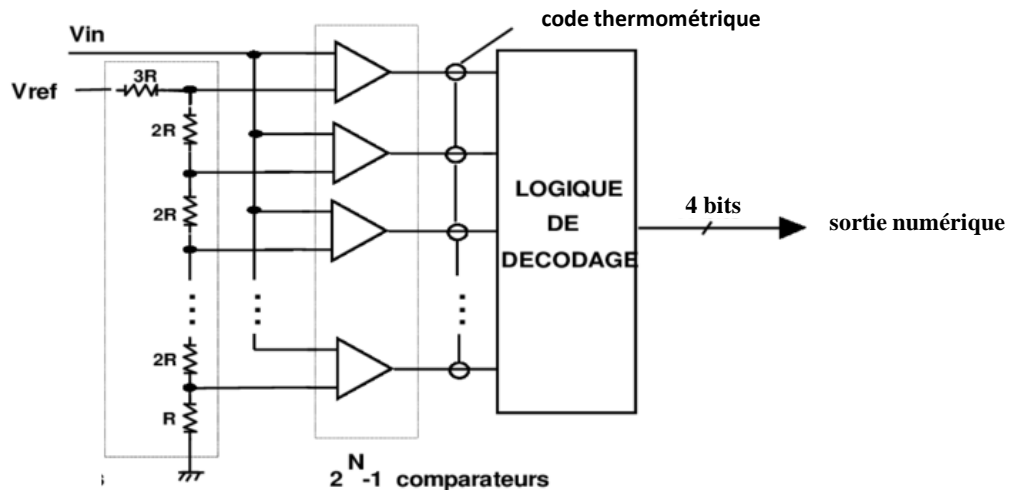
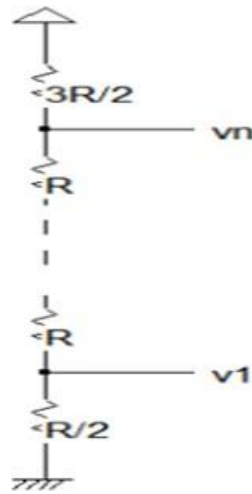


Figure 18.3. Schéma bloc du CAN 4 bits

## 3.5 Simulation du comparateur flash 4bit

### 3.5.1 Tensions de référence

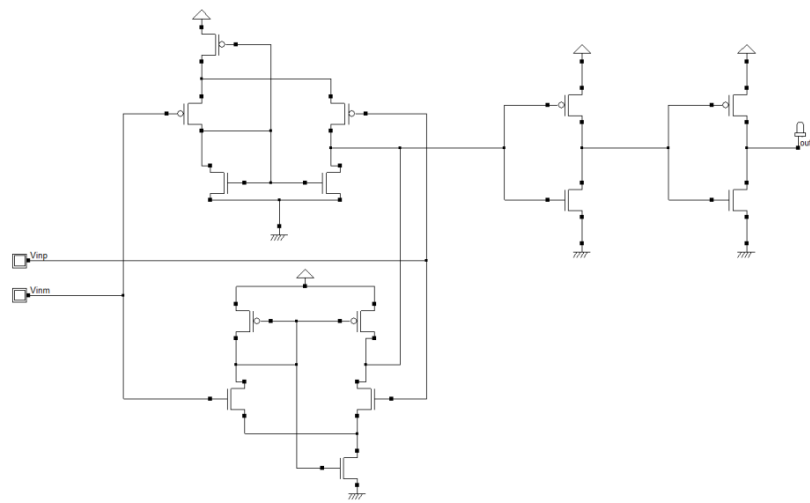
Les tensions de référence définissant les niveaux de quantification du signal analogique sont fixées par un réseau de résistances.



**Figure 3.19.** Schéma du circuit diviseur de tension

### 3.5.2 Le comparateur

Le comparateur est essentiellement un amplificateur différentiel à gain élevé. Étant donné que les tensions de référence les plus basses et les plus élevées sont proches des rails d'alimentation, il est important que le comparateur ait une plage d'entrée allant de rail à rail. Un amplificateur différentiel simple à auto-polarisation de type canal N fonctionne bien avec des tensions de mode commun nettement supérieures à  $V_{th}$ , mais ne fonctionne pas vraiment avec des entrées de mode commun basses. L'inverse est vrai pour les amplificateurs différentiels de type canal P, mais en mettant ces deux circuits complémentaires en parallèle, comme illustré dans la figure 3.5, on obtient de bons résultats.



**Figure 3.20.** Schéma du comparateur

A l'aide de DSCH un code Verilog est généré pour la compilation du masque (Layout) sur Microwind.

La figure 3.6 représente le code Verilog du comparateur.

# Chapitre 03 CAN Flash 4 bits

```
Verilog | Hierarchy | Netlist | Critical path |
// DSCH 3.5
// 26/06/2023 00:19:57
// C:\Users\banotat papaha\Desktop\FICH\adcsarah 2.sch

module adcsarah2 ( Vinn,Vinp,out1);
input Vinn,Vinp;
output out1;
wire w4,w6,w7,w8,w9,w10;
pmos # (1) pmos_1(out1,vdd,w4); // 0.5u 0.05u
nmos # (2) nmos_2(w4,vss,w6); // 0.3u 0.05u
pmos # (1) pmos_3(w8,vdd,w7); // 0.5u 0.05u
pmos # (2) pmos_4(w7,w8,Vinn); // 0.5u 0.05u
nmos # (1) nmos_5(out1,vss,w4); // 0.3u 0.05u
pmos # (2) pmos_6(w6,w8,Vinp); // 0.5u 0.05u
nmos # (2) nmos_7(w6,vss,w7); // 0.3u 0.05u
nmos # (2) nmos_8(w7,vss,w7); // 0.3u 0.05u
pmos # (2) pmos_9(w6,vdd,w9); // 0.5u 0.05u
pmos # (2) pmos_10(w9,vdd,w9); // 0.5u 0.05u
nmos # (1) nmos_11(w10,vss,w9); // 0.3u 0.05u
nmos # (2) nmos_12(w9,w10,Vinn); // 0.3u 0.05u
nmos # (2) nmos_13(w6,w10,Vinp); // 0.3u 0.05u
pmos # (2) pmos_14(w4,vdd,w6); // 0.5u 0.05u
endmodule

// Simulation parameters in Verilog Format
always
#200 Vinn=~Vinn;
#400 Vinp=~Vinp;

// Simulation parameters
// Vinn CLK 1 1
// Vinp CLK 2 2
```

Information  
Module name (8 char. max)  
adcsarah2  
 Add gate delay info  
 Append simul. informations  
 Add labels as comments  
The Verilog file has 32 lines  
The design includes 25 symbols  
The circuit has 10 nodes  
Misc.  
Time scale: 1.00  
Max clocks: 16  
Update Verilog Extract circuit  
OK

Figure 3.21. Code Verilog du Comparateur

Après la compilation du code dans Microwind, on obtient le dessin du masque du comparateur.

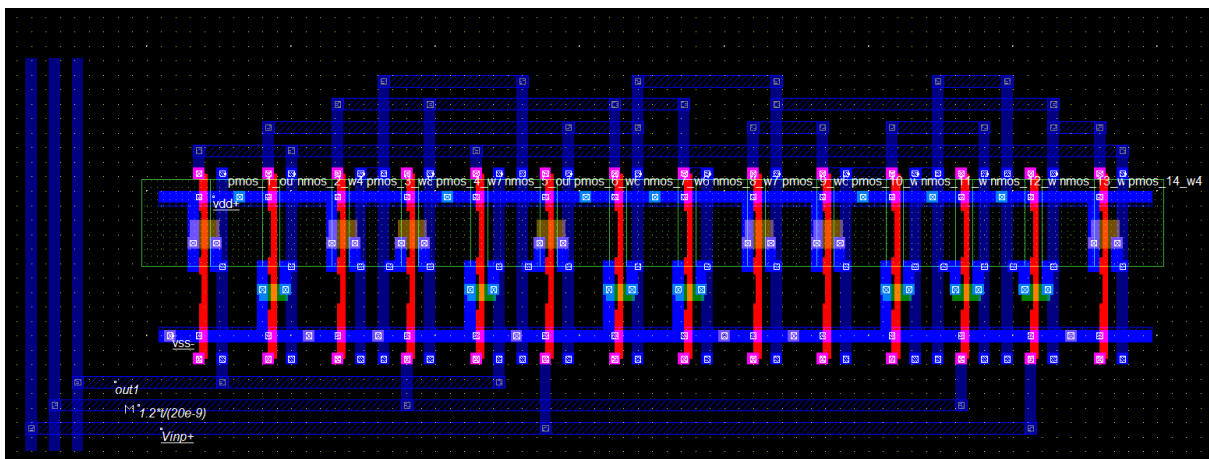
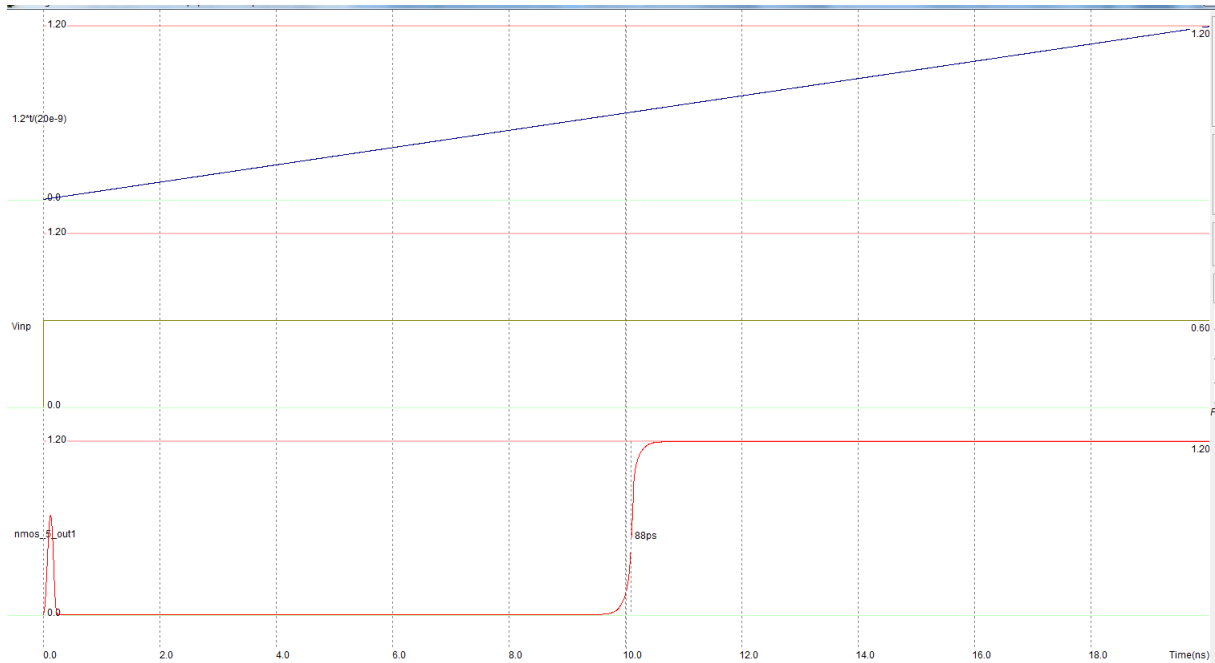


Figure 3.22. Layout du comparateur

Les résultats de simulation du comparateur sont représentés sur la figure 3.8.

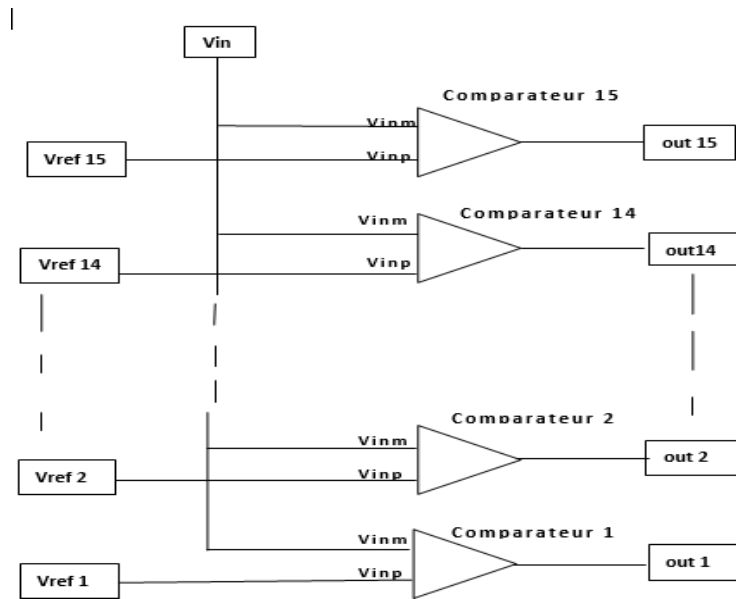
On applique à l'entrée une rampe de tension (0-1.2V) qu'on compare à une référence (V=0.6V).

On remarque que la tension de sortie bascule de 0 à 1 lorsque la tension d'entrée dépasse la tension de référence.



**Figure 3.23.** Simulation du comparateur

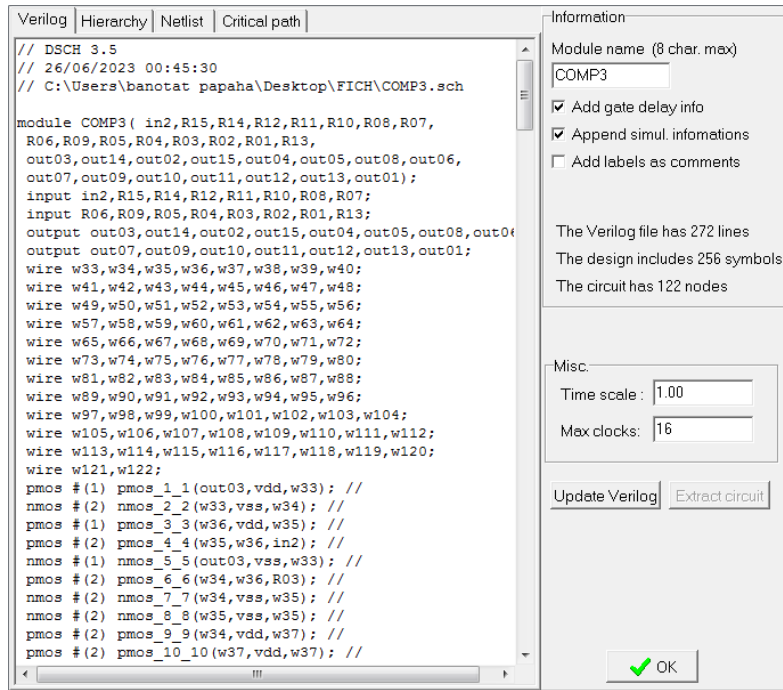
Notre convertisseur 4 bits comprend 15 comparateurs ayant une entrée reliée à  $V_{in}$  et l'autre entrée reliée aux différentes tensions de référence. Les 15 sorties définissent le code thermomètre.



**Figure 3.24.** Schéma du comparateur

A l'aide de DSCH, un code Verilog est généré pour la compilation du masque sur Microwind.

La figure 3.10 représente le code Verilog du comparateur 4 bits.



```
// DSCH 3.5
// 26/06/2023 00:45:30
// C:\Users\banotat papaha\Desktop\FICH\COMP3.sch

module COMP3( in2,R15,R14,R12,R11,R10,R08,R07,
R06,R09,R05,R04,R03,R02,R01,R13,
out03,out14,out02,out15,out04,out05,out08,out06,
out07,out09,out10,out11,out12,out13,out01);
input in2,R15,R14,R12,R11,R10,R08,R07;
input R06,R09,R05,R04,R03,R02,R01,R13;
output out03,out14,out02,out15,out04,out05,out08,out06,
out07,out09,out10,out11,out12,out13,out01;
wire w33,w34,w35,w36,w37,w38,w39,w40;
wire w41,w42,w43,w44,w45,w46,w47,w48;
wire w49,w50,w51,w52,w53,w54,w55,w56;
wire w57,w58,w59,w60,w61,w62,w63,w64;
wire w65,w66,w67,w68,w69,w70,w71,w72;
wire w73,w74,w75,w76,w77,w78,w79,w80;
wire w81,w82,w83,w84,w85,w86,w87,w88;
wire w89,w90,w91,w92,w93,w94,w95,w96;
wire w97,w98,w99,w100,w101,w102,w103,w104;
wire w105,w106,w107,w108,w109,w110,w111,w112;
wire w113,w114,w115,w116,w117,w118,w119,w120;
wire w121,w122;
pmos # (1) pmos_1_1 (out03,vdd,w33); //
nmos # (2) nmos_2_2 (w33,vss,w34); //
pmos # (1) pmos_3_3 (w36,vdd,w35); //
pmos # (2) pmos_4_4 (w35,w36,in2); //
nmos # (1) nmos_5_5 (out03,vss,w33); //
pmos # (2) pmos_6_6 (w34,w36,R03); //
nmos # (2) nmos_7_7 (w34,vss,w35); //
nmos # (2) nmos_8_8 (w35,vss,w35); //
pmos # (2) pmos_9_9 (w34,vdd,w37); //
pmos # (2) pmos_10_10 (w37,vdd,w37); //
```

Figure 3.25. Code verilog du comparateur 4 bits

Après la compilation du code Verilog dans Microwind, on obtient le dessin du masque du comparateur 4 bits (Fig.3.11).

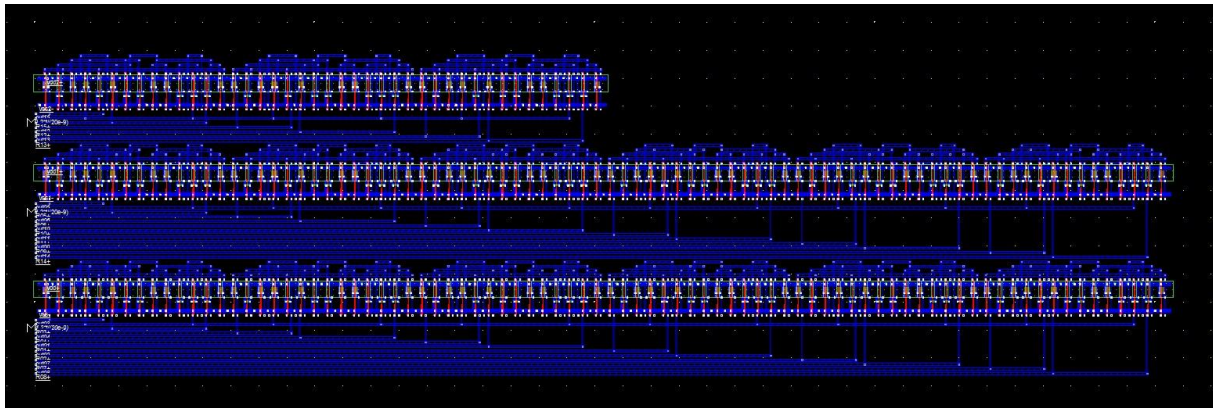


Figure 3.26. Layout du comparateur 4 bits

La figure 3.12 représente le résultat de La simulation du comparateur 4 bits.

La tension d'entrée  $V_{in}$  est une rampe de tension (0-1.2V) appliquée à l'une des entrées des différents comparateurs. Les autres entrées des comparateurs sont reliées aux différentes tensions de référence. On remarque que les sorties basculent de 0 à 1 lorsque la tension d'entrée dépasse la tension de référence.



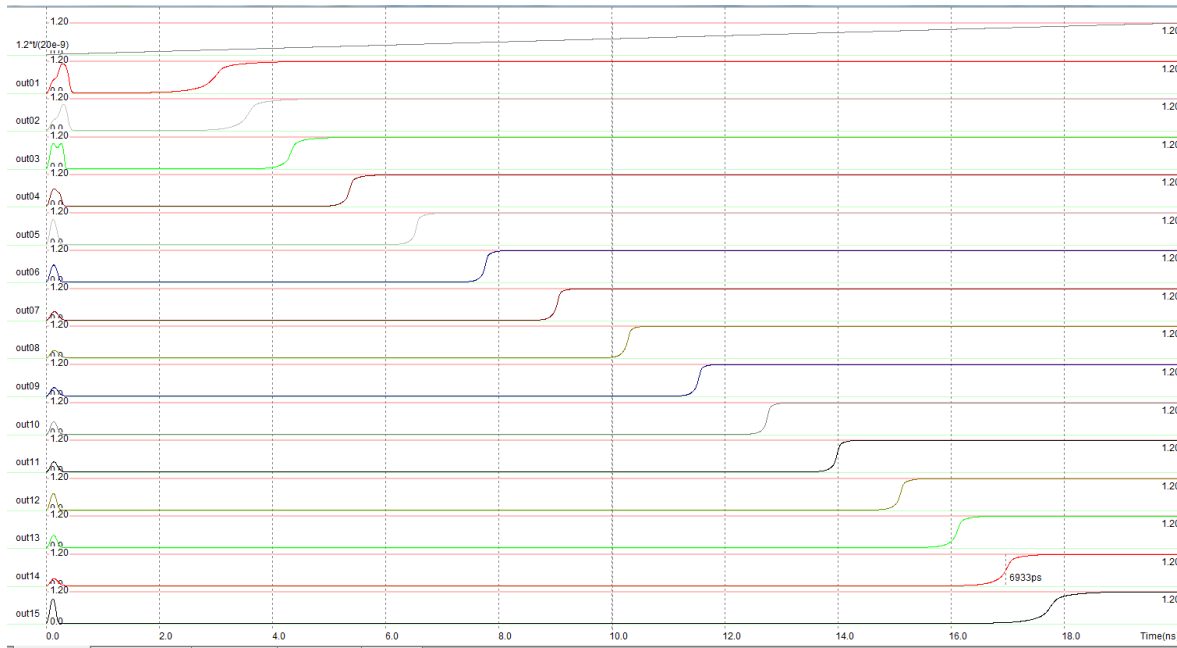


Figure 3.27. Simulation du comparateur

### 3.5.3 Le Codeur

Le code thermomètre peut être entièrement représenté par un code binaire de 4 bits. L'encodage des 15 bits à partir des sorties du comparateur en un signal de 4 bits est réalisé à l'aide d'un circuit logique dérivé de la table de vérité illustrée dans le tableau 3.1.

b15	b14	b13	b12	b11	b10	b9	b8	b7	b6	b5	b4	b3	b2	b1		Y3	Y2	Y1	Y0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1		0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1		0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1		0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1		0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1		0	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1		0	1	1	1
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	0	0	1
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	0	1	0
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	0	1	1
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	0	0
0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	0	1
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	1	1

Tableau 3.9. Table de vérité du codeur

# Chapitre 03 CAN Flash 4 bits

Les expressions logiques des sorties du codeur déduite de la table de vérité sont décrites par les équations 3.1.

$$Y_3 = b_8$$

$$Y_2 = b_4 \cdot \bar{b}_5 + b_{12} \tag{3.1}$$

$$Y_1 = b_2 \cdot \bar{b}_6 \cdot \bar{b}_7 + b_{10} \cdot \bar{b}_2 + b_{14}$$

$$Y_0 = b_1 \cdot \bar{b}_2 + b_3 \cdot \bar{b}_4 + b_5 \cdot \bar{b}_6 + b_7 \cdot \bar{b}_8 + b_9 \cdot \bar{b}_{10} + b_{11} \cdot \bar{b}_{12} + b_{13} \cdot \bar{b}_{14} + b_{15}$$

A partir de ces équations le circuit logique du codeur est construit dans DSCH (Fig.3.13),

Puis converti en un fichier Verilog (Fig.3.14) et compilé dans Microwind (3.15).

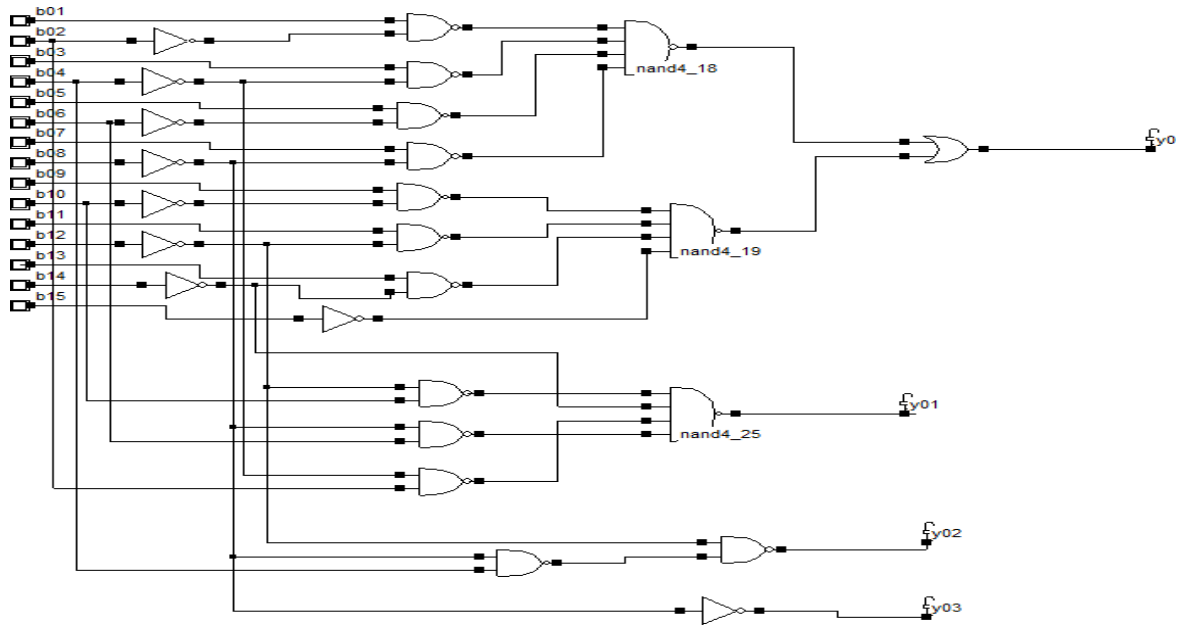


Figure 3.28. Circuit logique du codeur

# Chapitre 03 CAN Flash 4 bits

```
Verilog | Hierarchy | Netlist | Critical path |
// D5CH 3.5
// 26/06/2023 02:25:55
// C:\Users\banotat papaha\Desktop\FICH\ENCODER.sch

module ENCODER( b01,b15,b13,b04,b02,b12,b11,b03,
b05,b10,b07,b06,b08,b14,b09,y03,
y02,y01,y0);
input b01,b15,b13,b04,b02,b12,b11,b03;
input b05,b10,b07,b06,b08,b14,b09;
output y03,y02,y01,y0;
wire w18,w19,w20,w24,w25,w26,w27,w28;
wire w29,w30,w31,w32,w33,w34,w35,w36;
wire w37,w38,w39,w40,w41;
not # (1) inv_1(w18,b02);
not # (1) inv_2(w19,b04);
not # (1) inv_3(w20,b06);
not # (1) inv_4(w24,b14);
nand # (2) nand2_5(w25,w18,b01);
nand # (2) nand2_6(w26,w19,b03);
nand # (2) nand2_7(w27,w20,b05);
nand # (2) nand2_8(w29,w28,b07);
nand # (2) nand2_9(w31,w30,b09);
nand # (2) nand2_10(w33,w32,b11);
nand # (2) nand2_11(w34,w24,b13);
not # (1) inv_12(w35,b15);
or # (2) or2_13(y0,w36,w37);
not # (2) inv_14(w28,b08);
not # (1) inv_15(w30,b10);
not # (2) inv_16(w32,b12);
not # (1) inv_17(y03,w28);
nand # (2) nand4_18(w36,w25,w26,w27,w29);
nand # (2) nand4_19(w37,w31,w33,w34,w35);
nand # (2) nand2_20(w38,b04,w28);
nand # (2) nand2_21(y02,w38,w32);
nand # (2) nand2_22(w39,b10,w32);
endmodule
```

Information  
Module name (8 char. max)  
ENCODER  
 Add gate delay info  
 Append simul. informations  
 Add labels as comments  
The Verilog file has 74 lines  
The design includes 44 symbols  
The circuit has 41 nodes  
Misc.  
Time scale: 1.00  
Max clocks: 16  
Update Verilog Extract circuit  
OK

Figure 3.29. Code verilog du codeur

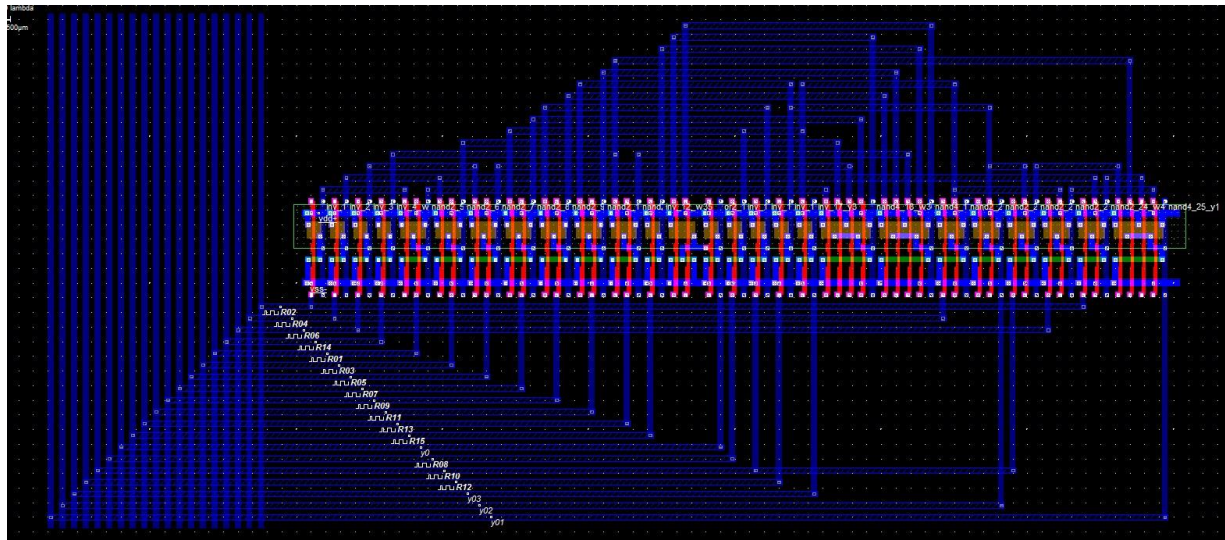


Figure 3.30. Layout du codeur

La figure 3.16 représente les résultats de simulation du codeur.

Les entrées du codeur passent successivement du premier niveau de quantification jusqu'au dernier niveau et les sorties expriment ces niveaux par un nombre de 4 bits.

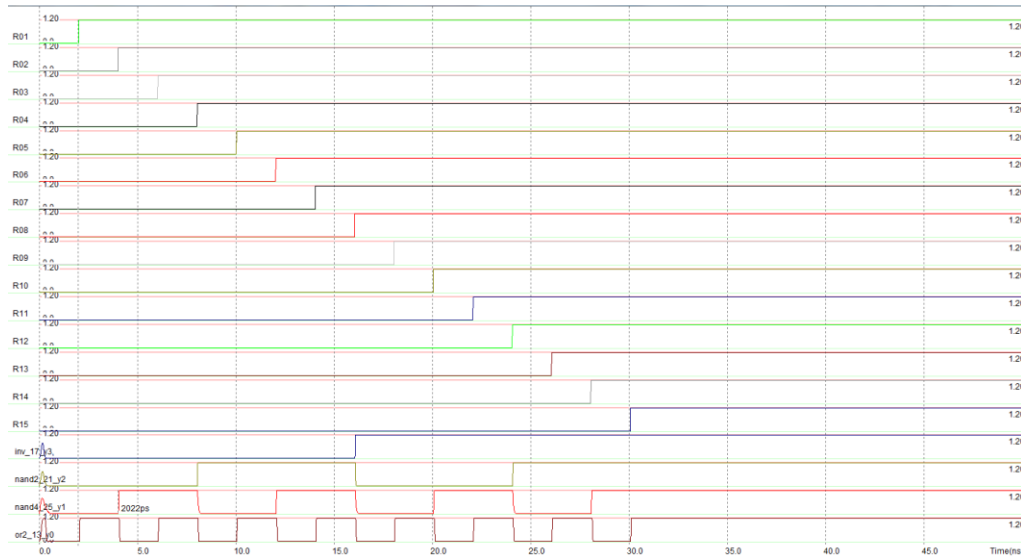


Figure 3.31. Simulation du codeur

### 3.5.4. Le convertisseur analogique numérique flash 4 bit (ADC)

Le schéma fonctionnel typique du convertisseur flash est représenté sur la figure 3.17. Il se compose du diviseur de tension résistif, du comparateur et du codeur. Il a pour entrées le signal analogique et les 15 tensions de références et pour sorties un mot de 4 bits qui représente la valeur du niveau de quantification du signal.

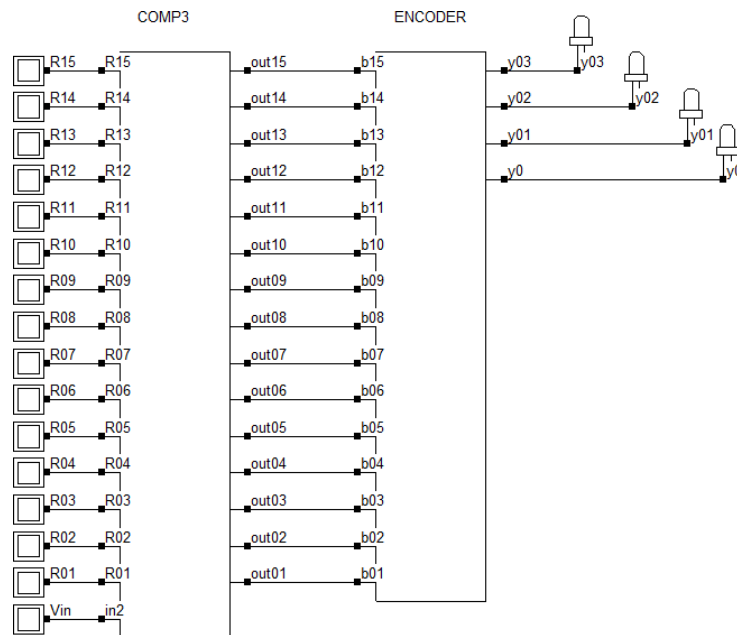


Figure3.32. Schéma de flash ADC

A l'aide de DSCH, un code Verilog est généré pour la compilation du masque sur Microwind.

La figure 3.18 représente le code Verilog du convertisseur 4 bits.

# Chapitre 03 CAN Flash 4 bits

```
Verilog Hierarchy Netlist Critical path
// DSCH 3.5
// 02/07/2023 14:23:52
// C:\Users\banotat papaha\Desktop\FICH\COMP3.sym

module COMP3 ( R15,R14,R13,R12,R11,R10,R08,R07,
R06,R05,R04,R03,R02,R01,Vin,R09,
y0,y01,y02,y03 );
input R15,R14,R13,R12,R11,R10,R08,R07;
input R06,R05,R04,R03,R02,R01,Vin,R09;
output y0,y01,y02,y03;
wire w4,w5,w6,w7,w8,w9,w10,w11;
wire w12,w13,w14,w15,w16,w17,w18,w37;
wire w38,w39,w40,w41,w42,w43,w44,w45;
wire w46,w47,w48,w49,w50,w51,w52,w53;
wire w54,w55,w56,w57,w58,w59,w60,w61;
wire w62,w63,w64,w65,w66,w67,w68,w69;
wire w70,w71,w72,w73,w74,w75,w76,w77;
wire w78,w79,w80,w81,w82,w83,w84,w85;
wire w86,w87,w88,w89,w90,w91,w92,w93;
wire w94,w95,w96,w97,w98,w99,w100,w101;
wire w102,w103,w104,w105,w106,w107,w108,w109;
wire w110,w111,w112,w113,w114,w115,w116,w117;
wire w118,w119,w120,w121,w122,w123,w124,w125;
wire w126,w127,w128,w129,w130,w131,w132,w133;
wire w134,w135,w136,w137,w138,w139,w140,w141;
wire w142,w143,w144,w145,w146,w147;
not #(1) inv_1_1(w37,w8);
not #(1) inv_2_2(w38,w7);
not #(1) inv_3_3(w39,w15);
not #(1) inv_4_4(w40,w17);
nand #(1) nand2_5_5(w41,w37,w4);
nand #(1) nand2_6_6(w42,w38,w11);
nand #(1) nand2_7_7(w43,w39,w12);
nand #(1) nand2_8_8(w45,w44,w14);
nand #(1) nand2_9_9(w47,w46,w18);
```

Information  
Module name (8 char. max)  
COMP3  
 Add gate delay info  
 Append simul. informations  
 Add labels as comments  
The Verilog file has 299 lines  
The design includes 257 symbols  
The circuit has 147 nodes  
Misc.  
Time scale: 1.00  
Max clocks: 16  
Update Verilog Extract circuit  
OK

Figure 3.33. Code verilog du CAN flash 4 bits

La figure 3.19 représente le layout du convertisseur dans Microwind .

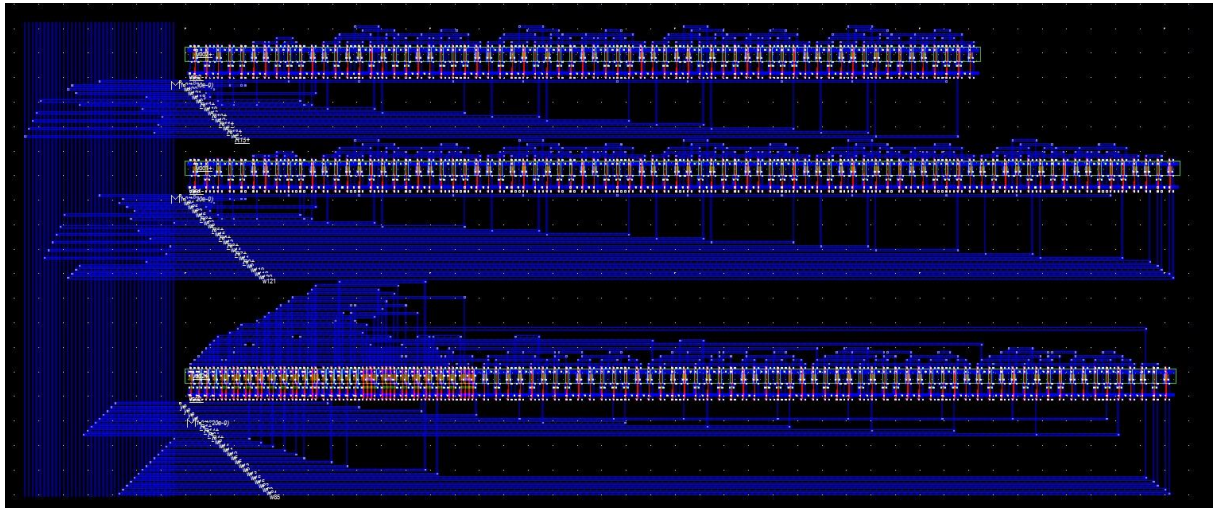
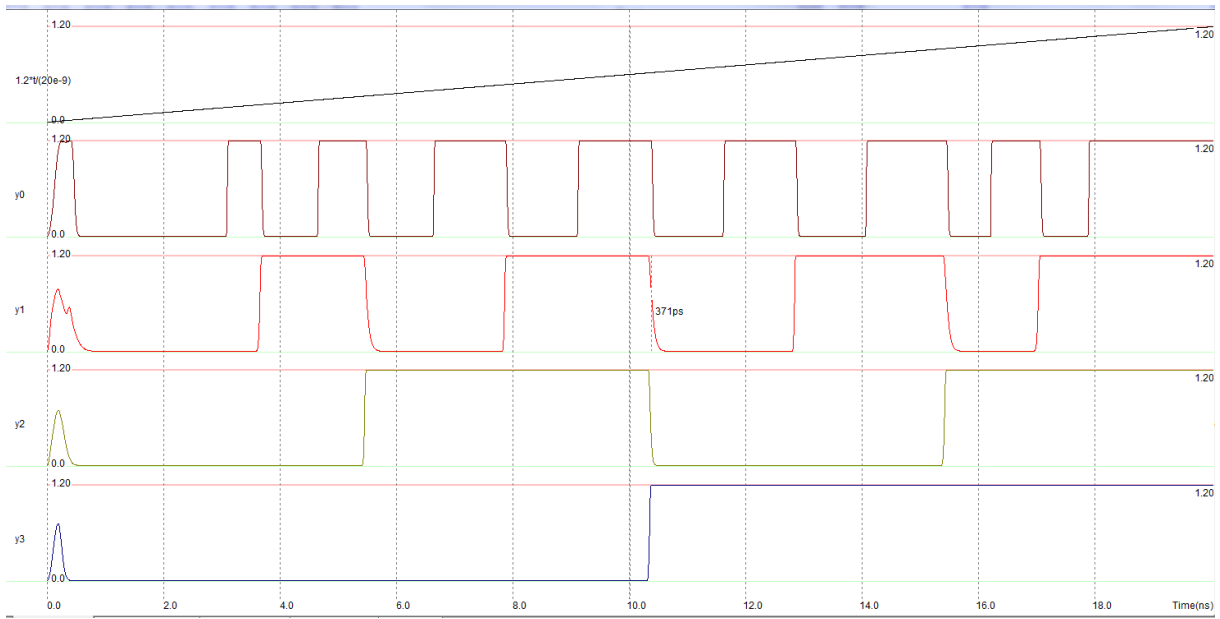


Figure 3.34 Layout du convertisseur 4 bits

Sur la figure 3.20, sont représentés les résultats de simulation du convertisseur.

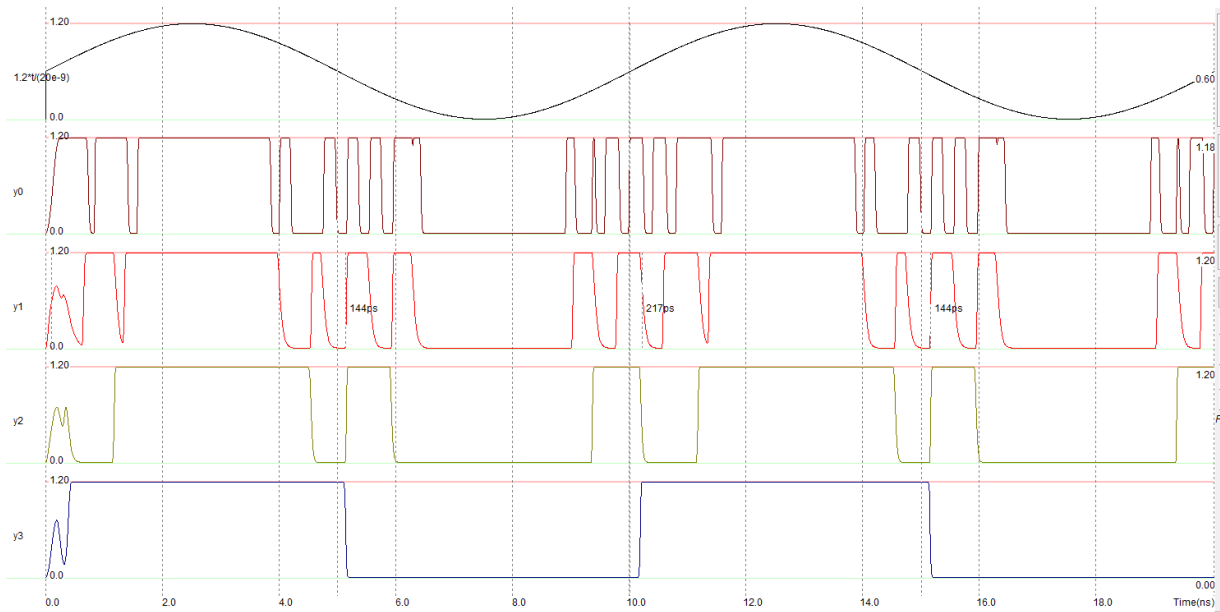
Le signal analogique d'entrée est une rampe de tension variant entre 0 et 1.2V. La sortie est un mot de 4bits qui varie de 0 à 15 décrivant les 15 niveaux de quantification du signal.

# Chapitre 03 CAN Flash 4 bits



**Figure 3.35** Simulation du convertisseur avec une rampe de tension

La figure 3.21 représente la simulation du convertisseur attaqué par une tension sinusoïdale. La sortie varie de 0 à 15 lorsque la tension varie entre le minimum et le maximum de la sinusoïde.



**Figure 3.36** Simulation du convertisseur avec une tension sinusoïdale

## 3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la description et la simulation d'un convertisseur analogique-numérique (CAN) flash 4 bits en technologie CMOS dans l'environnement Microwind/DSCH. Notre circuit a été testé avec deux types de signaux analogiques : rampe de tension et sinusoïde. Les résultats de la simulation ont montré le bon fonctionnement de notre circuit.

# **Conclusion Générale**

Cette étude approfondie sur les convertisseurs analogique-numérique (CAN) et plus spécifiquement sur le convertisseur flash ADC 4 bits, a permis de mieux comprendre les principes fondamentaux, les composants clés et les défis de conception associés à ces dispositifs essentiels de l'électronique. Nous avons exploré la chaîne de résistances, le comparateur et l'encodeur de priorité, qui sont les éléments constitutifs du convertisseur flash ADC 4 bits.

Chaque composant joue un rôle crucial dans le processus de conversion analogique-numérique, contribuant à la précision, à la rapidité et à la fiabilité du système. L'étude a souligné l'importance de la précision dans la conception des CAN, car des erreurs de quantification peuvent entraîner des distorsions indésirables dans les données numériques. Nous avons également examiné les avantages et les limites du convertisseur flash ADC 4 bits. Bien qu'il offre une conversion rapide et parallèle, il présente des inconvénients tels qu'une consommation d'énergie élevée et une complexité accrue du circuit. Il est important de prendre en compte ces aspects lors du choix d'un CAN pour une application spécifique.

Enfin, cette étude nous a permis de comprendre l'importance de la conception et de l'optimisation des CAN pour répondre aux besoins spécifiques des systèmes électroniques modernes. Les avancées technologiques continuent de repousser les limites des convertisseurs analogique-numérique, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour des performances améliorées et une consommation d'énergie réduite.

En somme, les convertisseurs analogique-numérique jouent un rôle essentiel dans la traduction des signaux analogiques en données numériques, permettant ainsi le traitement et l'exploitation de ces informations par des systèmes numériques. Une compréhension approfondie des principes, des composants et des techniques de conception des CAN est donc cruciale pour l'avancement de l'électronique et de la technologie. Cette étude ne représente qu'un aperçu du vaste domaine des convertisseurs analogique-numérique, et il existe encore de nombreuses possibilités de recherche et d'innovation dans ce domaine en constante évolution. En continuant à explorer et à améliorer les performances des CAN, nous pourrions repousser les frontières de l'électronique et exploiter pleinement le potentiel des signaux analogiques dans le monde numérique.

## Références

- [1] p. stroppa, «CEA,» 07 03 2022. [En ligne]. Available: [https://www.cea.fr/comprendre/Pages/nouvelles-technologies/essentiel-sur-microelectronique.aspx?fbclid=IwAR2okHaK6i\\_OEGyxE-ltWrhFbokiAeyqiNMZJiGyXuM\\_exGNPevJZMoQBkw\\_aem\\_th\\_ARQ36K2GgXEeZ-ljiXyFA1tXyvgfZA7CTZm8Yb3IU4VVEEm4R4Gl6zjczb2gmSiYmAw](https://www.cea.fr/comprendre/Pages/nouvelles-technologies/essentiel-sur-microelectronique.aspx?fbclid=IwAR2okHaK6i_OEGyxE-ltWrhFbokiAeyqiNMZJiGyXuM_exGNPevJZMoQBkw_aem_th_ARQ36K2GgXEeZ-ljiXyFA1tXyvgfZA7CTZm8Yb3IU4VVEEm4R4Gl6zjczb2gmSiYmAw).
- [2] m. L.Boulahbal &.H.Boulaares , Écrivain, *Etude et simulation d'un multiplieur 4bits*. [Performance]. université saad dahleb blida 1, 2019/2020.
- [3] D. folio, *support de cours de composants électroniques*, institut national des sciences appliqués centre val de loire, 2017/2018.
- [4] w.Ananne & I.Terranti, *Etude et simulation d'une RAM 4X4bits*, université saad daleb blida1, 2020/2021.
- [5] «enseignement,» 2009. [En ligne]. Available: [https://www.emse.fr/~dutertre/documents/cours\\_convertisseurs.pdf](https://www.emse.fr/~dutertre/documents/cours_convertisseurs.pdf).
- [6] A.Tayebi &. A. ch. eddine.Toumi, *etude et conception d'un convertisseur anlogique numérique pipeliné en technologie CMOS*, université de mohamed El-Bachir El-Ibrahimi-Borj Bou Arreridj, 2020/2021.