

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université 8 Mai 1945 – Guelma**

**Faculté des Sciences et de la Technologie**

**Département d'Electronique et Télécommunications**



**Mémoire de Fin d'Etudes**

**Pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Electronique**

**Spécialité : Instrumentation**

---

**Conception d'un système de régulation de la température des panneaux photovoltaïques à base d'un système à microprocesseur**

---

Présenté par :

**AMIRI Imad Eddine**

**MEDJALDI Amar**

Sous la direction de :

YOUNSI Abdelaziz

**Septembre 2020**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## **Dédicace**

Au terme de ce très modeste travail, je tiens à exprimer ma gratitude aux personnes qui m'ont soutenu durant la réalisation de ce mémoire :

Mes très chers parents : Mon Père, Ma très chère mère et grand-mère :

Je vous remercie pour votre soutien moral, vos encouragements et vos conseils qui m'ont guidé durant mon parcours ;

A ma sœur Imane et mes frères Amine et Salah ;

A mes amis intimes, en particulier, Amjed et Raouf ;

A tous mes amis et à toute personne qui me connaît,

A mes collègues d'étude, en particulier mon frère et ami fidèle Amar et sa famille ;

A tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail, ...

je ne saurais tous vous remercier assez.

Imad

## **Dédicace**

*Je dédie ce modeste travail avec un grand amour, une profonde sincérité et une immense*

*fierté :*

*A l'âme de ma mère, à mon cher père source de tendresse, de noblesse, de patience et*

*d'encouragements*

*A la personne qui m'a soutenu tout au long de ce mémoire : mon frère Oussama,*

*A mes sœurs, Asma, Nessrine et Faiza, ma grand-mère et ma tante ;*

*A mon ami, qui pour moi, est un frère, Imad Amiri ;*

*A tous mes amis, en particulier Djalel, Yacine et Farès, pour leurs soutiens et leurs*

*encouragements ;*

*Je voudrais enfin dédier ce mémoire à toute personne ayant participé de près ou de loin à la*

*réalisation de ce travail.*

*Amar*

## Remerciements

Nous tenons, tout d'abord, de rendre Grâce à notre Dieu, Le Tout Puissant, de nous avoir donné la force, le courage, la santé et les moyens afin d'accomplir ce modeste travail.

La première personne que nous tenons à remercier particulièrement est notre encadreur, Mr Abdelaziz YOUNSI, pour ses conseils, ses orientations, la confiance et la patience qu'il nous a témoignées et qui ont constitué pour nous un stimulus considérable et sans lesquels ce travail n'aurait pu être mené à bon port.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Finalement, nous remercions tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.



## ملخص:

إن احتياجات الدول الناشئة للطاقة في ازدياد يوماً بعد يوم على المستوى العالمي، و من أكبر العوامل المؤثرة على ذلك هو زيادة عدد السكان، مما سبب العديد من الأضرار الطبيعية للبيئة. والواقع إن كل الطاقة المستخدمة اليوم تقريباً مستمدة في الأساس إما من مصادر طاقة ملوثة: مثل الفحم والنفط والغاز الطبيعي، أو من مصادر طاقة خطيرة مثل الطاقة النووية.

ولكن كل هذه الطاقات غير القابلة للتجدد، بل أنها أيضاً شديدة التلوث. وفي هذا الصدد، يلقي المجتمع العلمي المسؤولية الكاملة عن هذا النوع من الاستهلاك فيما يتعلق بالاحتباس الحراري، الذي يشكل على المدى الطويل تهديداً كبيراً للتوازن البيولوجي لكوكبنا.

و بالتالي فإن استخدام الطاقات النظيفة (التي تسمى أيضاً الطاقات المتجددة) يشكل ضرورة أساسية. لأن الطاقات المتجددة تحافظ على الطبيعة والبيئة والتنوع البيولوجي للنباتات والحيوانات. ومن بين مصادر الطاقة النظيفة والمتجددة الطاقة الشمسية لأنها الكمية التي يمكن أن نستفيد منها كل يوم تمثل حوالي خمسة أمثال إجمالي الاستهلاك البشري اليومي الذي توفره اليوم مصادر الطاقة الأخرى.

وفي هذا الصدد، تتمتع الجزائر بأعلى طاقة شمسية بين بلدان البحر الأبيض المتوسط، حيث يبلغ عدد ساعات شروق الشمس فيها 3500 ساعة سنوياً. فضلاً عن ذلك فإن الجزائر تتمتع بإمكانيات كبيرة فيما يتصل بالمهارات البشرية. لهذا يجب أن نوجه أبحاثنا نحو تطوير هذا الشكل من الطاقة ونحاول تحقيق أقصى قدر من الأرباح.

وفي هذا السياق، تهدف هذه المذكرة إلى دراسة نظام يمكنه الحفاظ على درجة حرارة الألواح الشمسية ضمن نطاق من القيم، وهو ما من شأنه أن يقودنا في نهاية المطاف إلى الاستخدام الأمثل لتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية. ومن المعروف أن اللوحة الشمسية الكهروضوئية تحول الطاقة الضوئية بشكل مباشر إلى طاقة كهربائية. لهذا فإنه يحول 25% من الإشعاع إلى طاقة كهربائية. ومع ذلك، فإن إحدى العقبات الرئيسية التي تحول دون عمل اللوحات الكهروضوئية على النحو الصحيح هي ارتفاع درجة حرارة الألواح بسبب الإشعاع الشمسي المفرط ودرجات الحرارة المحيطة بها.

ولهذا، فإننا نركز جهودنا في هذه المذكرة على دراسة وتطوير نظام آلي لتنظيم درجة الحرارة يشرف عليه معالج دقيق من أجل إتباع نظام تبريد في الوقت الحقيقي.

## Résumé :

Les besoins énergétiques au niveau mondial continuent d'augmenter de manière effrénée en raison d'une demande continûment croissante des pays émergents et de l'augmentation de la population mondiale et ce, au détriment, malencontreusement de l'environnement. En effet, la quasi-totalité de l'énergie exploitée aujourd'hui est puisée essentiellement soit des énergies polluantes tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, soit des énergies dangereuses telle que l'énergie nucléaire.

Toutes ces énergies sont, non seulement, périssables mais surtout très polluantes. A ce propos, la communauté scientifique reconnaît la responsabilité entière de ce type de consommation dans le réchauffement climatique qui, à terme, risque d'avoir des effets dramatiques sur les équilibres biologiques de notre planète.

Le recours à des énergies propres (appelées aussi énergies renouvelables) devient dès lors incontournable. Ainsi, et contrairement aux sources d'énergies fossiles rivales, les énergies renouvelables préservent la nature, l'environnement et la biodiversité des plantes et des animaux. Parmi les sources d'énergie dites propres et renouvelables, l'énergie solaire occupe une place prépondérante en raison de la sécurité d'approvisionnement dans cette ressource et de sa caractéristique inhérente dans la protection de l'environnement. Ce choix est également motivé par le fait que la quantité d'énergie solaire reçue chaque jour par la planète est cinq fois supérieure à la totalité de la consommation quotidienne humaine assurée aujourd'hui par le nucléaire, le charbon, le bois, le fioul, le gaz, ...

A cet égard, l'Algérie, qui fait partie de cette planète, dispose d'un potentiel solaire le plus fort sur la rive méditerranéenne avec ses 3 500 heures d'ensoleillement par an. De surcroît, l'Algérie possède un potentiel considérable en ce qui concerne les compétences humaines. De ce fait, elle est plus que jamais appelée à s'orienter vers le développement de cette forme d'énergie.

Dans ce contexte, il s'agit dans le cadre de notre projet de Fin d'études d'étudier un système permettant de maintenir la température des panneaux solaires dans une gamme de valeurs qui, enfin, nous conduit à une exploitation optimale de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. En effet, il faut savoir que le panneau solaire photovoltaïque convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Il convertit ainsi 25% de l'irradiation en énergie électrique. Néanmoins, l'un des principaux obstacles au bon fonctionnement des panneaux photovoltaïques est la surchauffe due au rayonnement solaire excessif et aux températures ambiantes élevées.

A ce titre, nous concentrons nos efforts dans ce mémoire à l'étude d'un dispositif automatisé pour la régulation de la température qui sera supervisé par un système à microprocesseur afin de suivre et contrôler en temps réel un système de refroidissement que nous développerons également dans ce mémoire.

### **Abstract:**

The energy demands at the world level are continuously increasing due to the needs of emerging countries, and the forever increasing demographic growth, causing, unfortunately, damage to the environment. In fact, almost all of the energy used today is drawn mainly either from polluting energies such as coal, oil and natural gas, or from dangerous energies such as nuclear energy.

All these energies are not only perishable but also very polluting. In this regard, the scientific community recognizes the full responsibility of this type of consumption for global warming which, in the long term, poses a huge threat the biological balances of our planet.

The use of clean energies (also called renewable energies) is therefore becoming essential. Thus, and unlike rival fossil energy sources, renewable energies preserve nature, the environment and the biodiversity of plants and animals. Among these clean and renewable energy sources, is the solar energy. It occupies a preponderant place thanks to the security of supply in this resource and its inherent characteristic in the protection of the environment. This choice is also motivated by the fact that the quantity of solar energy received each day by the planet is five times greater than the total daily human consumption provided today the other energy sources.

In this regard, Algeria, has the highest solar potential among the Mediterranean countries with its 3,500 hours of sunshine per year. Moreover, Algeria has considerable potential in terms of human skills. Therefore, we must direct our research towards the development of this form of energy and try to maximize the profit from it.

In this context, project aims to study a system whose main objective is to maintain the temperature of the solar panels within a range of values, which, would eventually, lead us to an optimal use of converting solar energy into electrical energy. Indeed, it's known that the photovoltaic solar panel directly converts light energy into electrical energy. So, it converts 25% of irradiation into electrical energy. However, one of the main obstacles to the proper functioning of photovoltaic panels is overheating due to excessive solar radiation and high ambient temperatures.

Therefore, we are concentrating our efforts in this thesis on the study of an automated system for the regulation of the temperature which will be supervised by a microprocessor in order to follow and control in real time a cooling system that we will also develop in this study.

# Liste des figures et Tableaux

## Chapitre 1 : L'énergie solaire photovoltaïque - Réalités et Perspectives

**Figure 1.1 :** Les lagunes de Venise en Italie mois de février-mars

**Figure 1.2 :** Evolution de la température moyenne annuelle sur la Terre au cours du 20<sup>e</sup> siècle et de la fin du 19<sup>e</sup> siècle

**Figure 1.3 :** Processus d'établissement de l'effet de serre : Les gaz à effet de serre (vapeur d'eau, gaz carbonique, méthane...) sont pratiquement transparents au rayonnement solaire et sont opaques au rayonnement infrarouge émis par la Terre. La chaleur est piégée

**Figure 1.4 :** Consommation mondiale d'énergie primaire

**Figure 1.5 :** Consommation mondiale d'énergie primaire par région

**Figure 1.6 :** Réserves en PWh à la fin de 1997

**Figure 1.7 :** Ressources en PWh à la fin de 1997

**Figure 1.8 :** Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

**Figure 1.9 :** Aspects externes de différents types de cellules solaires

**Figure 1.10 :** Modèle d'une cellule photovoltaïque idéale

**Figure 1.11 :** Modèle de la cellule photovoltaïque réelle

**Figure 1.12 :** Modèle de simulation pour un panneau photovoltaïque (PV)

**Figure 1.13 :** Schéma du modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque

**Figure 1.14 :** Courbe caractéristique P-V

**Figure 1.15 :** (a) Courbes P(V) et (b) Courbes I(V) d'un panneau photovoltaïque à divers ensoleillements à une température constante  $T = 25^{\circ}\text{C}$

**Figure 1.16 :** (a) Courbes I(V) et (b) Courbes P(V) d'un panneau PV pour différentes valeurs de la température et pour un éclairement constant  $G = 1\text{W/m}^2$

**Tableau 1.1 :** L'énergie en Algérie en chiffres

## Chapitre 2 : Aspects théoriques

**Figure 2.1 :** Variation de la résistance d'une thermistance en fonction de la température

**Figure 2.2 :** Caractéristiques typiques d'une CTN et d'une CTP

**Figure 2.3 :** Principe de fonctionnement d'un thermocouple

**Figure 2.4 :** Principe de la régulation analogique concrétisée au moyen d'un pont de Wheatstone

**Figure 2.5 :** Structure générale d'une régulation numérique

**Figure 2.6 :** Boucle de contrôle, montrant la frontière entre le monde extérieur (analogique) et le monde numérique à l'intérieur d'un système programmé

**Figure 2.7 :** Un régulateur numérique fait tourner un programme informatique en boucle afin d'assurer la régulation d'un paramètre du processus à une valeur précise

**Figure 2.8 :** Conversion analogique numérique d'un signal

**Figure 2.9 :** Les différents choix alternatifs disponibles pour la conception des systèmes

**Figure 2.10 :** Les éléments d'un système à microprocesseur

**Figure 2.11 :** Brochage et signaux externes du microprocesseur 8086

**Figure 2.12 :** Architecture interne du microprocesseur 8086

**Figure 2.13 :** Les registres à usage général

**Figure 2.14** : Les registres de base et d'index  
**Figure 2.15** : Les registres de segment  
**Figure 2.16** : Le registre Pointeur d'instruction  
**Figure 2.17** : Le registre d'état  
**Figure 2.18** : Les bits d'état du registre d'état du 8086  
**Figure 2.19** : Le circuit d'interface parallèle 8255A : (a) Brochage (b) Schéma fonctionnel  
**Figure 2.20** : Format du mot de contrôle du 8255 PPI  
**Figure 2.21** : Interfaçage entre le 8086 (en mode minimum) et un seul boîtier 8255  
**Figure 2.22** : Interfaçage entre le 8086 (en mode minimum) avec deux boîtiers 8255  
**Figure 2.23** : Le circuit 8253/8254 (a) Brochage (b) Schéma fonctionnel  
**Figure 2.24** : Interfaçage du 8086 avec le 8253/8254  
**Figure 2.25** : Circuit électronique d'un compteur automatique de billets (à base d'un microprocesseur 8086 associé aux circuits 8253 et 8279) utilisé dans une station de train

## **Chapitre 3 : Conception et Réalisations pratiques**

**Figure 3.1**: Equipements pour la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique  
**Figure 3.2** : Montage expérimental type d'un système de conversion photovoltaïque  
**Figure 3.3** : Schéma synoptique de la carte du système à microprocesseur dédiée au contrôle de la température  
**Figure 3.4** : Schéma électronique complet du circuit de contrôle et de régulation de la température des panneaux solaires  
**Figure 3.5** : Brochage et aspect externe du capteur de température LM35  
**Figure 3.6** : Interfaçage du capteur de température LM35 avec le CAN 0808  
**Figure 3.7** : Interfaçage du convertisseur CAN 0808 avec le circuit d'E/S parallèle 8255  
**Figure 3.8** : Brochage des circuits : Le microprocesseur 8086 – le circuit de verrouillage 74HC373 – le circuit d'E/S 8255  
**Figure 3.9** : Commande de l'électrovanne EP1  
**Figure 3.10** : Commande des deux électrovannes EP1 et EP2  
**Figure 3.11** : Organigramme complet relatif à la régulation de la température d'un panneau photovoltaïque

**Tableau 3.1** : Brochage du capteur de température LM35 et du CAN 0808  
**Tableau 3.2** : Brochage du CAN 0808 et du circuit d'E/S parallèle 8255  
**Tableau 3.3** : Brochage des circuits : Circuit 8086 - Circuit 74HC373 - Circuit 8255  
**Tableau 3.4** : Interfaçage du Port B du 8255 avec le circuit de commande des électropompes

<b>Dédicace</b> .....	I
<b>Remerciements</b> .....	III
<b>Résumés</b> .....	IV
<b>Liste des figures et tableaux</b> .....	VI
<b>Sommaire</b> .....	VIII
<b>Introduction générale - La problématique</b> .....	1
<b>Chapitre 1 : L'énergie solaire photovoltaïque - Réalités et Perspectives.</b>	3
1. Introduction .....	3
2. Pollution .....	3
2.1 Les effets de la pollution sur la santé .....	4
2.2 Les effets de la pollution sur la Nature .....	4
2.2.1 Effet de la pollution sur le réchauffement de la Planète .....	4
2.2.2 Effet de serre .....	5
3. Les énergies renouvelables - une alternative de choix .....	6
4. Situation énergétique mondiale .....	6
4.1 Consommation mondiale de l'énergie .....	6
4.2 Réserves et ressources .....	7
4.3 Ressources énergétique en Algérie .....	9
4.4 Consommation d'énergie en Algérie .....	10
4.5 L'énergie solaire en Algérie – Ressources et perspectives .....	11
5. Aperçu sur l'énergie solaire .....	11
5.1 Aperçu sur le rayonnement solaire .....	11
5.1.1 Rayonnement direct .....	11
5.1.2 Rayonnement diffus .....	11
5.1.3 Rayonnement réfléchi ou albédo du sol .....	12
5.1.4 Rayonnement global .....	12
5.2 Aperçu sur l'effet photovoltaïque .....	12
5.3 L'énergie solaire photovoltaïque .....	12
5.4 La cellule photovoltaïque .....	13
5.4.1 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque .....	13
5.4.2 Différentes structures des cellules PV .....	14
5.4.3 Les cellules solaires au silicium .....	14
5.4.4 Modèle et circuit équivalent d'une cellule PV .....	14
5.4.4.1 Cellule photovoltaïque idéale .....	15
5.4.4.2 Cellule photovoltaïque réelle .....	15
5.4.4.3 Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque .....	16
5.4.4.4 Simulation du modèle .....	17
5.4.4.5 Modèle à deux diodes .....	17
5.4.4.6 Puissance maximale .....	17
5.4.4.7 Le facteur de forme FF .....	18
5.4.4.8 Rendement de conversion .....	18
5.5 Influence de l'éclairement et de la température .....	19
5.5.1 Influence de l'éclairement .....	19
5.5.2 Influence de la température .....	19
Liste des références bibliographiques du chapitre 2 .....	21
<b>Chapitre 2 : Aspects théoriques</b> .....	22
<b>Partie A : Mesure de la température</b> .....	22
A.1. Introduction .....	22
A.2. Les différents types de capteurs de température .....	22

A.2.1 Les thermistances .....	23
A.2.1.1 Thermistance à Coefficient de Température Négatif (CTN) .....	23
A.2.1.2 Thermistance à Coefficient de Température Positif (CTP) .....	24
A.2.1.3 Thermistance RTC (Résistance à Température Critique) .....	24
A.2.2 Les thermocouples .....	24
A.2.3 Les pyrocapteurs .....	25
<b>Partie B : Régulation numérique</b> .....	26
B.1. Introduction .....	26
B.2. La régulation .....	26
B.2.1 Régulation analogique .....	26
B.2.2 Régulation numérique .....	27
B.3. Principe de fonctionnement d'un régulateur numérique .....	28
B.4. Propriétés de la régulation numérique .....	29
B.4.1 Avantages .....	30
B.4.2 Inconvénients .....	30
<b>Partie C : Conversions Analogique/Numérique (CAN) et Numérique / Analogique (CNA)</b> .....	30
C.1 Introduction .....	30
C.2 Les types de conversion .....	31
C.2.1 La Conversion Analogique-Numérique (CAN) .....	31
C.2.2 La Conversion Numérique-Analogique (CNA) .....	31
<b>Partie D : Les systèmes à microprocesseurs</b> .....	32
D.1 Introduction .....	32
D.2 Étude de faisabilité .....	32
D.3 Logique câblée ou Logique programmée ? .....	33
D.4 Architecture d'un système à base de microprocesseur .....	34
D.5 Le microprocesseur 8086 .....	35
D.5.1 Brochage et signaux externes du 8086 .....	35
D.5.2 Architecture interne du 8086 .....	35
D.5.3 Les registres internes du 8086 .....	37
D.5.3.1 Les registres généraux .....	37
D.5.3.2 Les registres de base et d'index .....	38
D.5.3.3 Les registres segment .....	38
D.5.3.4 Le registre Instruction Pointer IP .....	39
D.5.3.5 Le registre d'état (Flag register) .....	39
D.6. Système à microprocesseur .....	40
D.6.1 Introduction .....	40
D.6.2 Interface parallèle programmable 8255 .....	41
D.6.2.1 Présentation du circuit 8255 .....	41
D.6.2.2 Interfaçage du 8255 .....	42
D.6.3 Circuit de temporisation programmable 8253/8254 .....	43
D.6.3.1 Présentation du circuit 8253/8254 .....	43
D.6.3.2 Interfaçage du 8253/8254 .....	45
D.6.4 Exemple d'une application pilotée par un système à microprocesseur .....	45
Liste des références bibliographiques du chapitre 3 .....	46
<b>Chapitre 3 : Conception et Réalisations pratiques</b> .....	47
3.1. Le cheminement des pensées dans la conception d'un projet .....	47
3.2. Problématique du projet .....	47
3.3. Système de refroidissement des panneaux solaires .....	48

3.4. Description du projet .....	49
3.5. Description détaillée du montage électronique .....	51
3.5.1 Connexion du capteur de température LM35 avec le CAN .....	52
3.5.2 Connexion du circuit CAN avec le circuit d'E/S parallèles .....	53
3.5.3 Connexion du microprocesseur avec le circuit d'E/S parallèles.....	54
3.5.4 Connexion du microprocesseur avec le circuit de commande de l'électrovanne ....	56
3.6 Partie logicielle .....	59
3.6.1 Introduction .....	59
3.6.2 Organigramme complet relatif à la régulation de la température d'un panneau photovoltaïque	59
3.6.3 Programme relatif à la régulation de la température d'un panneau photovoltaïque	59
3.6.4 Simulation du programme .....	59
Liste des références bibliographiques du chapitre 4 .....	64
<b>Conclusions et Perspectives</b> .....	65
<b>Annexes</b> .....	66
Annexe A .....	66
Annexe B .....	67
Annexe C .....	69

## Introduction générale - La problématique

### *La consommation massive des combustibles fossiles menace l'équilibre fragile de l'écosystème planétaire ...*

En effet, la consommation mondiale énergétique a augmenté de manière effrénée pendant ces dernières décennies. Pire encore, les besoins énergétiques continuent encore et sans cesse d'augmenter eu égard au développement des pays émergents et ce, au détriment de l'environnement. A ce propos, l'essentiel des énergies utilisées aujourd'hui est puisée en grande partie soit des énergies non renouvelables et polluantes tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, soit des énergies non renouvelables et dangereuses telle que l'énergie nucléaire.

Ces énergies sont non seulement périssables mais également très polluantes. Aujourd'hui, la communauté scientifique reconnaît la responsabilité de l'utilisation de ce type de consommation énergétique dans le réchauffement climatique qui risque d'avoir, à terme, des effets dramatiques sur les équilibres biologiques, économiques, sociaux et politiques de notre planète.

### *Les énergies renouvelables une alternative obligatoire ...*

Le recours à des énergies propres pour assurer la sécurité énergétique et le développement économique et social des populations actuelles et futures devient dès lors incontournable. Ainsi et contrairement aux sources d'énergies fossiles rivales, qui sont utilisées aujourd'hui de manière abusive, les énergies renouvelables préservent la nature, l'environnement et la biodiversité des plantes et des animaux. Parmi les sources d'énergie dites propres et renouvelables, l'énergie solaire occupe une place prépondérante.

### *L'énergie solaire photovoltaïque : le défi à relever ...*

L'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus importante. Le panneau solaire photovoltaïque convertit directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Il convertit 25% de l'irradiation en énergie électrique.

L'un des principaux obstacles au fonctionnement des panneaux photovoltaïques (PV) est la surchauffe due au rayonnement solaire excessif et aux températures ambiantes élevées. Comme cela nous l'est rappelé dans la littérature relevant de la physique des semi-conducteurs, une augmentation de la température d'un degré au-dessus de la température de fonctionnement normal, engendrera une réduction de la tension de sortie d'une quantité égale à 2,2 mV. Le refroidissement du panneau est alors le seul moyen de surmonter ce problème de montée en température.

Il existe de nombreux autres facteurs qui sont susceptibles de réduire également l'efficacité du panneau solaire. L'on peut citer, à titre d'exemple, les effets de l'ombrage, la position angulaire du panneau solaire par rapport aux rayonnements solaires, la présence de différentes irradiations sur le panneau solaire tout au long de la journée en raison des divers changements climatiques, ... Néanmoins, l'élévation de la température se trouve être le problème le plus

important parmi tous ces facteurs et qu'il est impératif de résoudre afin d'extraire un maximum de puissance possible.

*Contrôler la température des panneaux solaires : une exigence à honorer ...*

Le refroidissement des panneaux solaires photovoltaïques est une étape d'une grande importance pratique dans ce processus de conversion du rayonnement solaire en électricité. Il conduit ni plus ni moins qu'à une réduction du coût de l'énergie solaire et cela de trois manières distinctes. Premièrement, le refroidissement peut améliorer la production électrique des modules PV standard à plaques en maintenant un rendement de la conversion solaire/électrique à un niveau respectable. Deuxièmement, le refroidissement rend possible l'utilisation des systèmes photovoltaïques à concentration (dispositifs photovoltaïques composés d'une série de composants optiques (lentilles ou miroirs) afin de concentrer la lumière sur les cellules photovoltaïques). Enfin, la chaleur évacuée par le système de refroidissement PV peut être récupérée et utilisée pour un usage domestique ou industriel.

Il existe plusieurs procédés conventionnels et autres originaux de refroidissement par air (Canaux d'air, Dissipateur de chaleur) et par eau (Jet d'eau, Échangeur de chaleur). Ces techniques sont destinées à réguler la température et/ou réduire ainsi le phénomène de surchauffe du panneau solaire.

Dans notre mémoire, nous concentrons nos efforts à l'étude d'un dispositif automatisé pour la régulation de température supervisé par un système à microprocesseur afin de suivre et contrôler le système de refroidissement que nous développerons dans ce mémoire.

## **Chapitre 1 :** **L'énergie solaire photovoltaïque -** **Réalités et Perspectives**

### **1. Introduction :**

Le développement de l'énergie durable est un défi extraordinaire que les scientifiques sont astreints de relever. D'une part, ce domaine de recherche offre des retombées scientifiques et économiques hautement intéressantes. D'autre part, il est primordial de développer cette énergie parce qu'il en va tout simplement de l'avenir et de la survie de notre planète et de ses habitants.

Sous le vocable d'énergie durable (ou bien encore énergie renouvelable), on désigne diverses formes d'énergie : l'énergie des marées, l'énergie des volcans, l'énergie hydraulique, l'énergie des vents (appelée aussi l'énergie éolienne), l'énergie solaire (qui est de deux types d'énergie : énergie solaire thermique et énergie solaire photovoltaïque), l'énergie extraite de la biomasse, etc. Dans ce contexte, l'énergie solaire photovoltaïque offre une solution capitale en raison de ses caractéristiques uniques. En effet, la technologie photovoltaïque est sûre, propre, robuste et hautement évolutive.

### **2. Pollution :**

Au cours des dernières années, il est devenu très clair que la réserve d'énergie du carburant diminue drastiquement jour après jour et qu'en outre, les réserves d'énergies fossiles ne sont pas infinies. Sur un autre plan, l'utilisation de ce type d'énergie provoque des problèmes écologiques insurmontables et de plus en plus graves. Cela s'est traduit par un impact très négatif sur la pollution de l'atmosphère. A titre indicatif, en un siècle, la concentration du dioxyde de carbone dans l'atmosphère a augmentée de 50 % et à ce rythme, la situation deviendra à terme rapidement insoutenable.

Les études disent que 90 % de la pollution atmosphérique sont liés à des activités humaines tels que les procédés industriels, la circulation automobile, les centrales thermiques, le chauffage domestique, l'incinération des ordures ménagères, ... etc. Les 10 % restants ont des origines naturelles comme les volcans, les orages, les activités des micro-organismes, ... [1].

Dans ce contexte, signalons une anecdote intéressante. La pandémie du corona virus (COVID 19) qui sévit depuis le début de l'année 2020 n'a pas engendré que des conséquences négatives sur les habitants de la planète. Hormis, les désagréments du confinement de la population mondiale et du ralentissement économique à l'échelle planétaire, la pandémie du COVID 19 a été une chance inouïe pour la planète Terre pour qu'elle respire proprement un tant soit peu. A ce propos, les lagunes de Venise en Italie sont devenues pour la première fois et cela depuis fort longtemps, propres, fig. 1.1. D'un autre côté, les images photographiées aux mois de **février-mars**, à partir des satellites d'observation au-dessus de la ville de Wuhan en Chine (l'épicentre de cette pandémie) montrent un ciel clair et débarrassé des émanations des fumées des usines et des automobiles.



Figure 1.1 : Les lagunes de Venise en Italie mois de février-mars

### 2.1 Les effets de la pollution sur la santé :

La pollution de l'atmosphère engendre des risques sur la santé des gens à l'échelle mondiale. Chaque jour, environ 12 000 litres d'air transitent par nos voies respiratoires. Des polluants tels que les gaz  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  et  $\text{O}_3$  altèrent les fonctions respiratoires (irritation des muqueuses, bronchites, asthme, œdème pulmonaire, ...).

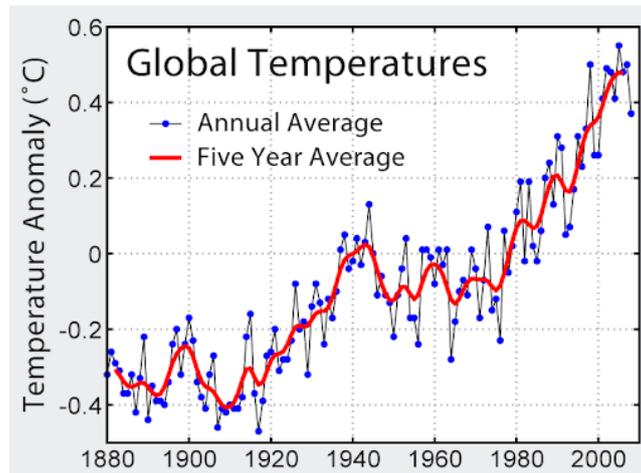
Si le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) n'est pas nocif pour l'homme, le monoxyde de carbone  $\text{CO}$  se révèle, par contre, extrêmement toxique (fatigue, maux de tête, problèmes de coordination, dérèglements cardiaques et pulmonaires). A très haute dose, son inhalation entraîne le coma et puis le décès de sa victime. D'une façon générale, le risque de ce gaz, remarqué sur les enfants, provoque des troubles allergiques et des risques de cancer et des mutations génétiques à terme.

### 2.2 Les effets de la pollution sur la Nature :

L'utilisation de l'énergie combustible a provoqué des bouleversements tragiques sur la planète Terre. Dans ce contexte, les changements climatiques engendrés par l'élévation de la température à la surface de la Terre peuvent être corrélés avec les phénomènes suivants :

#### 2.2.1 Effet de la pollution sur le réchauffement de la Planète :

Le réchauffement planétaire a provoqué une augmentation des températures moyennes au niveau des océans et de l'atmosphère, du fait des émissions excessives de gaz à effet de serre, fig. 1.2. Ces émissions dépassent, en effet, la capacité d'absorption des océans et de la biosphère ; augmentant ainsi l'effet de serre, lequel, piège la chaleur à la surface terrestre [2].

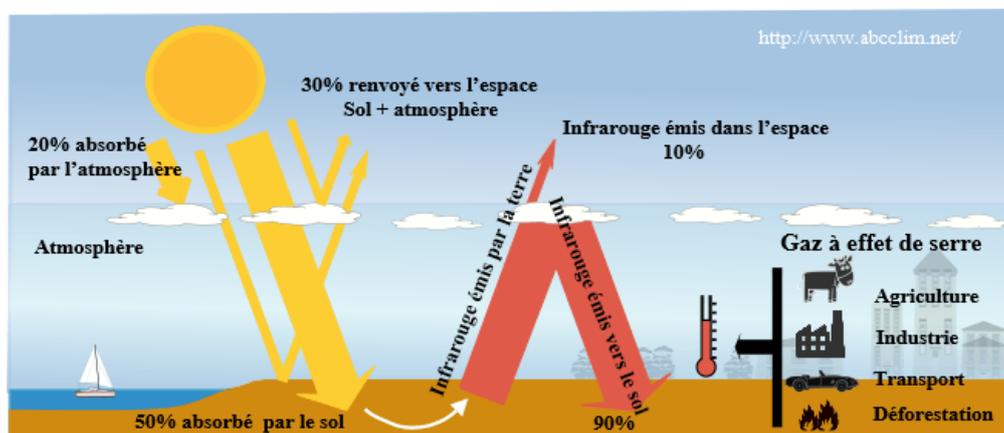


**Figure 1.2 :** Evolution de la température moyenne annuelle sur la Terre au cours du 20<sup>e</sup> siècle et de la fin du 19<sup>e</sup> siècle [2]

Pour être rigoureusement précis, l'expression **“réchauffement climatique”** désigne plus communément le réchauffement au niveau mondial, observé depuis le début du 20<sup>ème</sup> siècle. Tandis que l'expression **“changement climatique”**, celle-ci désigne plutôt les épisodes de réchauffement ou refroidissement d'origine naturelle qui se sont produits avant l'ère industrielle.

### 2.2.2 Effet de serre :

L'effet de serre est un phénomène naturel bénéfique pour la vie sur la Terre. Il est induit par une élévation de la température à la surface de notre planète. Indispensable à notre survie, ce fragile équilibre est, aujourd'hui, menacé. En effet, les activités humaines affectent dangereusement la composition chimique de l'atmosphère et entraînent l'apparition d'un **effet de serre additionnel**, qui est responsable, en grande partie, du changement climatique actuel.



**Figure 1.3 :** Processus d'établissement de l'effet de serre : Les gaz à effet de serre (vapeur d'eau, gaz carbonique, méthane...) sont pratiquement transparents au rayonnement solaire et sont opaques au rayonnement infrarouge émis par la Terre. La chaleur est piégée [3]

Pour comprendre cela, il faut savoir qu'une partie des rayons solaires, arrivant sur la Terre, la réchauffe. Ensuite, ils sont réfléchis par la surface terrestre dans l'espace. Lorsque les rayons renvoyés par la Terre rencontrent la couche de gaz à effet de serre emprisonnée dans la haute atmosphère, ils sont de nouveau réfléchis vers la Terre, ce qui entraîne à nouveau une augmentation de la température du sol, fig. 1.3. Puis le phénomène recommence, les rayons sont, en quelque sorte, piégés par la couche de gaz [3].

### **3. Les énergies renouvelables - une alternative de choix :**

Les énergies renouvelables (et plus spécialement l'énergie solaire) devraient être la tendance qui viendraient détrôner les différentes sources d'énergie actuellement employées en raison de la sécurité de l'approvisionnement dans ces ressources et de leur caractéristique inhérente pour la protection de l'environnement. Ce choix est également motivé par le fait que la quantité d'énergie solaire reçue chaque jour par la planète est cinq fois supérieure à la totalité de la consommation quotidienne humaine assurée aujourd'hui par le nucléaire, le charbon, le bois, le fioul, le gaz, ... [4].

### **4. Situation énergétique mondiale :**

Alors qu'en 1973 les pays exportateurs de pétrole, organisés au sein de l'organisation de l'OPEP (Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole), ont laissé exploser les prix du pétrole par des boycotts d'approvisionnement, le dimanche sans voiture est devenu une réalité en Allemagne. Les économies occidentales, pressées par la pénurie d'énergie et les coûts élevés, ont compris à quel point la sécurité d'approvisionnement était importante pour leurs intérêts et à quel point les conséquences de leurs dépendances totales, en termes de ressources énergétiques, vis-à-vis des pays fournisseurs pourraient être graves. En conséquence, ces pays ont classé **l'utilisation efficace de l'énergie** très haut dans l'échelle de leurs priorités politiques.

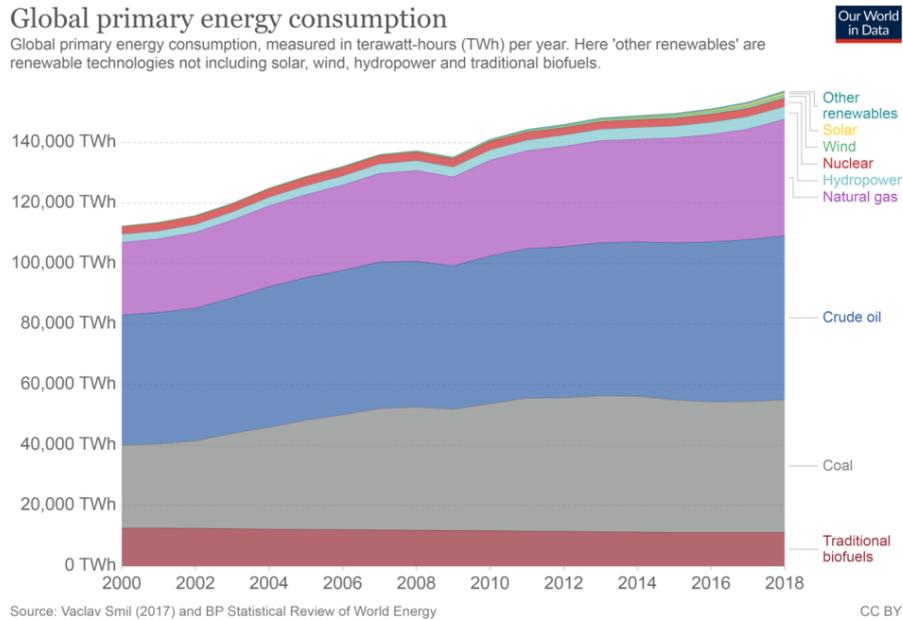
Jusqu'à présent, il n'y a pas eu de grande pénurie semblable à celle de 1973 pour les raisons suivantes. Tout d'abord, de nouveaux gisements gaziers et pétrolifères ont été découverts et sont entrés en exploitation. Deuxièmement, de nouvelles techniques d'extraction plus efficaces ont été développées, de sorte que l'exploitation des gisements, jadis non rentables, sont redevenus économiquement intéressants. Finalement, l'industrie et les citoyens occidentaux ont établi un rapport plus responsable envers l'utilisation de l'énergie en améliorant le rendement des appareils consommant l'énergie [5].

#### **4.1 Consommation mondiale de l'énergie :**

La consommation mondiale de l'énergie a augmenté en raison des besoins croissants en énergie dans les nouveaux pays industrialisés (Chine, Inde, Brésil, ...) d'une part et de l'augmentation rapide de la population mondiale, en particulier dans les pays du tiers monde, d'autre part. A ce propos, il est prévu que la population mondiale passerait de 6 milliards à environ 8 milliards au cours des 25 prochaines années, et devrait atteindre le seuil des 10 milliards de personnes d'ici le milieu du 21<sup>ème</sup> siècle.

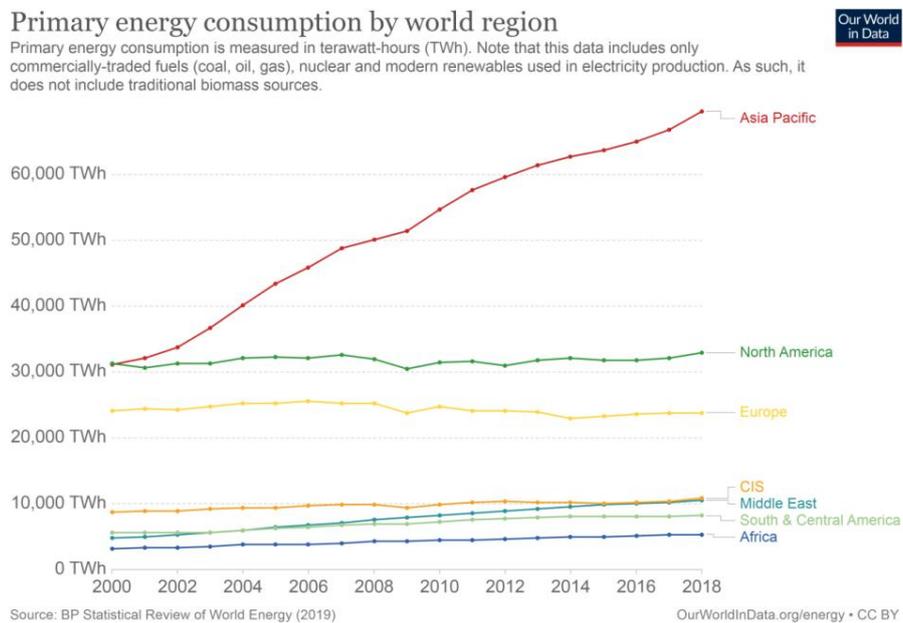
Une telle augmentation de la population aura inmanquablement un impact dramatique sur la demande en énergie, qui sera certainement doublée d'ici 2050, et ce même, si les pays développés continuent leurs politiques de consommation intelligente de l'énergie [5].

Lors de la Conférence mondiale (World Energy Congress) sur l'énergie tenue en septembre 1998 à Houston (Etats-Unis), il a été établi que les prévisions de la consommation mondiale de l'énergie suivraient approximativement l'allure illustrée sur la courbe dans la figure 1.4. Cette demande annuelle d'énergie augmenterait jusqu'à environ  $154 \times 10^{12}$  kWh dans les vingt prochaines années.



**Figure 1.4 : Consommation mondiale d'énergie primaire [6]**

Pour être plus précis, cette tendance de croissance est considérablement tirée vers le haut par une explosion prévisible de la demande en énergie venue des pays du Sud-est asiatique. A ce propos, la figure 1.5 montre la consommation mondiale de l'énergie par régions. L'on note que dans cette région du monde, cette croissance sera plus que doublée au bout d'une vingtaine d'années.



**Figure 1.5 : Consommation mondiale d'énergie primaire par région [6]**

#### 4.2 Réserves et ressources :

Étant donné que la consommation de l'énergie primaire est, dans le monde entier, dominée par le recours aux ressources énergétiques fossiles telles que le pétrole brut, le charbon et le

gaz naturel. L'augmentation de la consommation d'énergie aura donc un impact direct sur ces réserves qui seront très vite épuisées.

Avant d'aller plus loin et afin de lever toute ambiguïté, il est important de définir à ce stade, la nuance qui existe entre les termes "réserves" et "ressources".

**Réserves signifie** la partie des ressources totales qui est documentée en détail et qui peut être récupérée économiquement en utilisant les procédés technologiques actuels.

**Ressources signifie** la partie des ressources totales prouvées et indiquées géologiquement mais actuellement non encore récupérables sur le plan économique ou qui, pour d'autres raisons, ne peuvent pas être affectées aux réserves.

En conclusion, nous pouvons écrire :

$$\textit{Total des ressources} = \textit{Réserves} + \textit{Ressources}.$$

Il convient donc de noter que les réserves ne sont pas incluses dans les ressources. Selon la définition, les réserves sont la quantité qui peut être récupérée économiquement avec la technologie disponible. Par ailleurs, la quantité des réserves est fonction du prix de revient de l'extraction de cette énergie primaire.

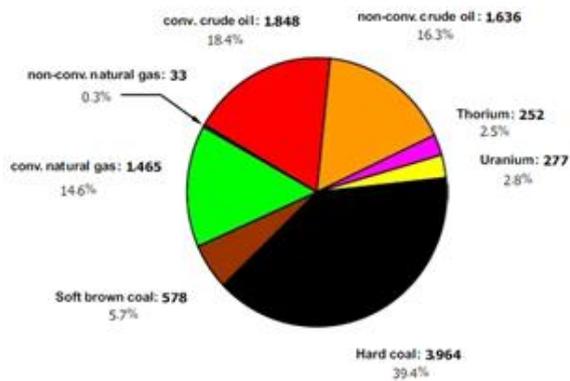
L'augmentation des réserves et des ressources d'hydrocarbures conventionnels ou non conventionnels n'est pas attribuée à de nouvelles découvertes mais à une réévaluation des champs connus (modification des critères d'évaluation) et à des méthodes de production améliorées.

Afin de mieux comprendre ces notions de dépendance du montant des réserves sur le prix de l'énergie, il est intéressant de considérer le cas de l'uranium (seul combustible dont les réserves et les ressources ont été très bien évaluées depuis longtemps) en fonction des coûts de production : 130 \$/kg d'uranium en 1993 et jusqu'à 80 \$/kg d'uranium en 1997.

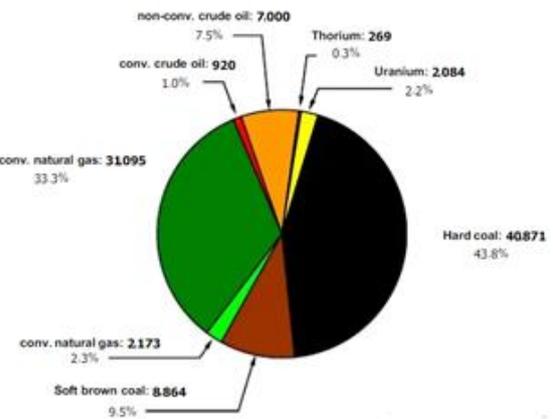
#### ***Total des ressources :***

Selon les figures 1.6 et 1.7, le charbon reste toujours dominant avec les plus grandes quantités de réserves et de ressources dans le monde. Les réserves de charbon représentent environ 45% (39,1% et 5,7%) de toutes les ressources énergétiques, tandis que le pétrole brut conventionnel et non conventionnel, deuxième source d'énergie en importance, représente près de 35% (18,4% et 16,3%, respectivement) des réserves de toutes les ressources énergétiques.

Le gaz suit en troisième place avec environ 15%. Les combustibles nucléaires représentent, quant à eux, environ 5%. Bien que le thorium ne soit pas utilisé pour la production de l'électricité car il n'y a pas aujourd'hui de réacteurs au thorium en fonctionnement, les réserves de plus de 2 millions de tonnes de thorium peuvent être considérées comme une base de travail pour l'avenir.



**Figure 1.6 :** Réserves en PWh à la fin de 1997 [5]



**Figure 1.7 :** Ressources en PWh à la fin de 1997 [5]

$$(1 \text{ PWh (PétaWatheure)}) = 10^{15} \text{ Wh} = 10^{12} \text{ kWh} = 10^9 \text{ MWh} = 10^6 \text{ GWh} = 10^3 \text{ TWh})$$

Sur un autre registre, les ressources énergétiques ne sont pas réparties uniformément dans le monde. L'ordre des pays riches en ressources énergétiques est largement déterminé par les réserves de charbon. Pour cette raison, les États-Unis occupent la première place parmi les pays avec les plus grandes réserves d'énergie prouvées. La Chine possède les troisièmes grandes réserves d'énergie en raison de ses réserves de charbon qui sont très importantes. La Russie est la deuxième en raison de ses grandes réserves de gaz naturel. Le charbon est également la raison pour laquelle l'Australie occupe la quatrième place dans cette liste et l'Inde la sixième. Le pays pétrolier le plus important, à savoir l'Arabie saoudite, occupe la cinquième place. Enfin, les réserves de charbon de l'Allemagne lui assurent la neuvième place [5].

#### 4.3 Ressources énergétique en Algérie :

Un rapport de classification internationale, sous la conduite de "Business Insider", une fondation américaine, a classé l'Algérie à la 18ème place dans le monde, en termes de réserves d'énergies fossiles. Ce rapport a pris en compte, dans son étude, l'ensemble des pays qui ont les plus grandes réserves d'énergie produites à partir de combustibles fossiles, en l'occurrence, le pétrole, le gaz et le charbon [7].

Dans cette même étude, ce rapport a révélé aussi que l'Algérie occupe la sixième place dans le monde arabe, après l'Arabie saoudite, l'Irak, les Émirats arabes unis, le Koweït et la Libye.

La Fondation américaine a évalué également les réserves de pétrole disponibles dans le sud algérien, à 12,2 milliards de barils et les réserves en gaz à 4,5 mille milliards m<sup>3</sup>.

Dans ce même contexte, plusieurs autres rapports officiels, provenant de nombreux organismes internationaux, spécialisés dans les ressources énergétiques, ont révélé que l'Algérie possède d'énormes réserves en énergie non conventionnelles, en particulier le gaz de schiste, estimée à environ 20 milliards m<sup>3</sup>. Une réserve qui classe l'Algérie, selon ces mêmes rapports, au troisième rang mondial.

Parallèlement à ces chiffres encourageants sur les réserves énergétiques de l'Algérie, la consommation locale ne cesse malheureusement de s'accroître considérablement eu égard à

l'augmentation de la population d'une part et de l'amélioration du cadre de vie général du citoyen algérien d'autre part.

#### 4.4 Consommation d'énergie en Algérie :

Lors de la rencontre qui s'est déroulée le 16 février 2020 au Palais des Nations à Alger, le Ministre algérien de l'Énergie a révélé les chiffres relatifs à la consommation énergétique des algériens qui a connu un nouveau record inquiétant durant l'année 2019 [8]. En effet, selon le Ministre, la consommation des produits dérivés des hydrocarbures ont augmenté en atteignant 15.640 mégawatts de consommation d'électricité et 43.4 milliards de mètres cubes de gaz.

Le ministre a expliqué par ailleurs que l'Algérie a consommé 14 % de sa production du gaz et de l'électricité tandis qu'elle a exporté 86 % de sa production. Cette consommation locale est destinée aux ménages essentiellement avec 81 % contre 19 % pour le tissu industriel.

Au rythme de la croissance démographique actuelle, tout porte à croire que ces chiffres vont enregistrer de nouveaux pics dans les années à venir. A ce propos, le tableau XX présente divers chiffres relatifs à la consommation de l'énergie en Algérie (énergie primaire, production, consommation d'électricité, ...).

Énergie en Algérie						
	Population	Consommation énergie primaire	Production	Exportation nette	Consommation électricité	Émissions de CO <sub>2</sub>
Année	Millions	Mtep	Mtep	Mtep	TWh	Mt CO <sub>2</sub> éq
1990	25,91	22,19	100,10	77,34	13,69	51,16
2000	31,18	26,99	142,21	114,96	21,21	61,49
2008	34,81	37,27	162,03	123,63	32,90	88,10
2009	35,40	40,76	153,04	111,64	30,61	94,41
2010	36,04	40,09	150,51	109,41	36,58	95,77
2011	36,72	41,82	145,83	103,26	41,18	102,11
2012	37,44	45,97	143,76	97,13	46,28	110,67
2013	38,19	47,58	137,67	89,19	48,78	113,88
2014	38,93	51,67	143,20	89,74	53,05	122,93
variation 1990-2014	+50,3 %	+132,9 %	+43,0 %	+16,0 %	+287,5 %	+140,3 %

Tableau 1 : L'énergie en Algérie en chiffres [9]

Il est intéressant de noter que sur la période 1990 – 2014, la population a augmenté de plus de 50% passant de près de 26 millions d'habitants à presque 39 millions. Au même moment, la consommation en électricité a pratiquement triplé passant de 13,69 TWh en 1990 à 53,05 TWh en 2014 révélant un net progrès dans la couverture du territoire algérien par le réseau électrique et de l'amélioration du cadre de vie des algériens (explosion dans l'utilisation des appareils électroménagers et le raccordement des foyers en gaz naturel).

La hausse de la consommation énergétique locale constitue une situation intenable qui risque, à moyen terme, d'entraîner le pays vers un déficit structurel entre l'offre et la demande sur le marché national à l'horizon 2025 - 2030, a rapporté à cet égard le Ministre algérien en octobre

2019 devant l'Assemblée Nationale. Afin d'assurer la couverture de ses besoins du marché national dans le long terme, l'Algérie est dans l'obligation d'exploiter toutes les types de sources d'énergie, qu'elles soient conventionnelles ou renouvelables, à l'exemple de l'énergie solaire.

#### **4.5 L'énergie solaire en Algérie – Ressources et perspectives :**

L'Algérie faisant partie de cette planète, dispose d'un potentiel solaire le plus fort sur la rive méditerranéenne avec ses 3 500 heures d'ensoleillement par an. A titre d'exemple, le solaire thermique est de 169 440 TWh/an soit l'équivalent de 38 000 milliards m<sup>3</sup>/an représentant près de quatre fois la consommation énergétique mondiale [4]. De surcroit, l'Algérie possède un potentiel considérable en ce qui concerne les compétences humaines. De ce fait, elle est plus que jamais appelée à s'orienter vers le développement de cette forme d'énergie.

A signaler que le photovoltaïque est facile à introduire et à mettre en œuvre partout dans le monde, dans les pays développés comme dans les pays en voie de développement.

#### **5. Aperçu sur l'énergie solaire :**

Le Soleil est une étoile formée de gaz extrêmement chauds. Il est constitué de 75% d'hydrogène, 23% d'hélium et 2% d'autres molécules. Les atomes d'hydrogène sont transformés en hélium par une réaction de fusion thermonucléaire massive. De plus, la masse est transformée en énergie selon la formule d'Einstein  $E = mc^2$ . Cette réaction maintient la surface du soleil à une température approximative de 5 800 °K.

L'énergie du soleil est transformée sous forme de rayonnement dans l'espace de manière uniforme et dans toutes les directions. Lorsqu'elle a parcouru 150 millions de kilomètres du Soleil jusqu'à la Terre, sa densité extraterrestre totale diminue à 1 367 W/m<sup>2</sup>. Cette valeur est connue sous le nom de constante solaire.

En une heure, la terre reçoit suffisamment d'énergie du soleil  $1,2 \times 10^{17}$  W. Cette quantité est suffisante pour combler ses besoins pour presque une année. Les panneaux photovoltaïques permettent de profiter de cette énergie gratuite en la transformant en énergie électrique [10].

#### **5.1 Aperçu sur le rayonnement solaire :**

Le rayonnement solaire est une propagation d'ondes de longueur qui varient entre 0,2 et 4  $10^{-6}$  m. Il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité. Il existe plusieurs types de rayonnement solaire. Parmi lesquels, on peut citer [10] :

##### **5.1.1 Rayonnement direct :**

C'est un rayonnement qui est reçu directement du Soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ces rayons sont, en général, parallèles entre eux et pouvant être mesurés par un appareil de mesure appelé « pyromètre ».

##### **5.1.2 Rayonnement diffus :**

Il est constitué d'une lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa diffusion engendre un phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, un éclatement des rayons du soleil est souvent produit à la fois par les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières. Cela dépend donc avant tout des conditions purement météorologiques.

### **5.1.3 Rayonnement réfléchi ou albédo du sol :**

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement réfléchi peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

### **5.1.4 Rayonnement global :**

Il représente la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyromètre ou par un « Solari mètre » sans écran. Il est défini donc par l'expression suivante :

*Rayonnement global = Rayonnement direct + Rayonnement diffus + Rayonnement réfléchi*

### **5.2 Aperçu sur l'effet photovoltaïque :**

Le terme « photovoltaïque » est composé de deux parties qui sont : « photos » et « volt ». Le premier vocable, qui vient du grec, signifie « lumière », tandis que le second terme vient du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui a inventé la pile électrique en 1800 et a donné son nom à l'unité de mesure de la tension électrique « le volt ».

Le principe de l'effet photovoltaïque peut être résumé comme suit. Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes présentés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière. De plus, sous l'action de ce bombardement, les électrons de valence situés dans les couches électroniques intérieures (les couches les plus proches du noyau de l'atome) ont tendance à être "arrachés" et sont amenés vers les couches supérieures tout en cumulant ainsi une énergie supplémentaire. On dit qu'ils sont dans un état excité.

Ensuite, n'ayant plus assez d'énergie pour aller plus loin, ces électrons arrachés reviennent à leur état initial en cédant l'énergie supplémentaire, acquise sous l'effet du bombardement, au matériau. Ceci se traduit par l'échauffement de ce dernier. L'énergie cinétique du photon est donc transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. En conséquence, une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique provoquant ainsi l'effet photovoltaïque [11, 12].

En général, l'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules fabriquées souvent à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire (panneau solaire). La production de l'électricité à partir de la lumière via un panneau solaire, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel [11, 12].

### **5.3 L'énergie solaire photovoltaïque :**

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Ce changement dans le mode d'énergie passe par une cellule dite photovoltaïque (PV). Le principe de cette transformation est basé sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), etc. Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé dans la fabrication de la cellule.

De nos jours et selon les besoins, l'énergie électrique produite par un dispositif photovoltaïque est disponible sous forme d'électricité pour un usage direct (utilisation domestique), ou bien sous forme d'électricité injectée dans le réseau (utilisation à grande échelle), ou bien encore stockée dans des batteries pour un usage ultérieur (énergie électrique décentralisée).

#### 5.4 La cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque (PV) est l'élément le plus petit du panneau solaire dans une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs de type P et de type N qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux. Cette transformation est physiquement basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

##### 5.4.1 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une couche dopée au bore (silicium dopé P) et l'autre dopée au phosphore (silicium dopé N) créant ainsi une jonction PN munie d'une barrière de potentiel, fig. 1.8. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges négatives : N) et des trous (charges positives : P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge résistive placée à l'extérieur de cette cellule, on peut en plus récolter les porteurs.

La tension maximale de la cellule est d'environ 0,6 V pour un courant nul (circuit ouvert). Cette tension est nommée tension de circuit ouvert ( $V_{CO}$ ).

Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ).

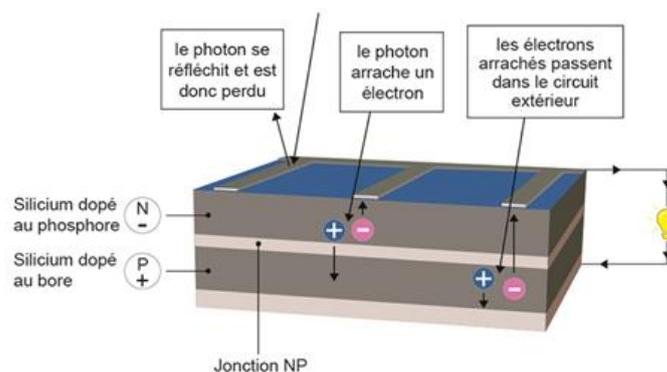


Figure 2.8 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

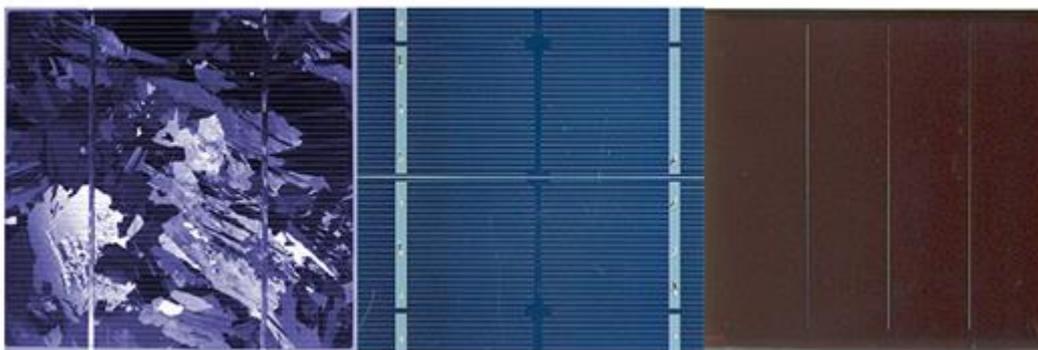
#### 5.4.2 Différentes structures des cellules PV :

Afin d'améliorer les performances des cellules PV et augmenter leur rendement, on utilise différents matériaux et structures. On distingue ainsi plusieurs types de cellules solaires selon leurs structures : les cellules solaires à couche mince, les cellules solaires organiques et les cellules solaires au silicium. Nous présenterons uniquement les dernières citées car étant les plus répandues.

#### 5.4.3 Les cellules solaires au silicium :

Le silicium est le matériau de base des photopiles. Il est également abondant sur notre planète, mais il n'existe pas à l'état pur dans la nature (le sable et le quartz en contiennent). Il existe trois catégories de cellules solaires au silicium, fig. 1.9.

- *Le silicium monocristallin* : est actuellement l'option la plus populaire pour les cellules commerciales bien que beaucoup d'autres matériaux soient également disponibles. Leur méthode de production est laborieuse et délicate, et donc, très chère. Il présente un taux de rendement excellent (12 – 16% allant jusqu'à 24 % en laboratoire). Le terme "cristallin" implique que tous les atomes dans le matériau PV actif font partie d'une structure cristalline simple où il n'y a aucune perturbation (défaut) dans les arrangements ordonnés des atomes [13, 14].
- *Le silicium polycristallin* : Il est composé de petites régions de silicium cristallin. Il a un coût de production moins élevé. L'efficacité de conversion PV pour une cellule à base de silicium polycristallin s'étend de 11 – 13 % (autour de 18 % en laboratoire) [14].
- *Le silicium amorphe* : Les cellules amorphes (caractérisées par l'absence de tout arrangement ordonné des atomes de Si) sont utilisées partout où une solution économique est recherchée ou lorsque très peu d'électricité est nécessaire, par exemple pour l'alimentation des montres, des calculatrices, ou des luminaires de secours. Elles se caractérisent par un fort coefficient d'absorption, ce qui autorise de très faibles épaisseurs, de l'ordre du micron. Par contre, son rendement de conversion est entre 8 – 10 % (autour de 13 % en laboratoire pour une cellule non dégradée) [13, 14].



Structure polycristalline

Structure cristalline

Structure amorphe

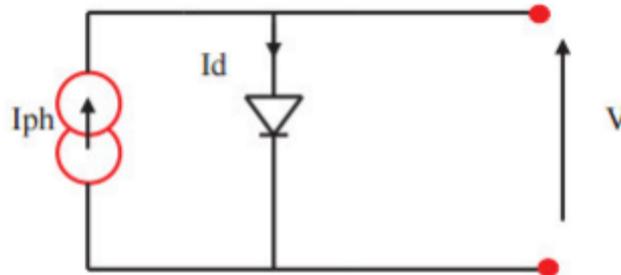
**Figure 1.9** : Aspects externes de différents types de cellules solaires

#### 5.4.4 Modèle et circuit équivalent d'une cellule PV :

Une cellule PV peut être modélisée par un schéma électrique équivalent qui reproduit son comportement quand elle est éclairée par un faisceau lumineux. Nous distinguons ainsi deux modèles possibles : la cellule PV idéale et la cellule PV réelle.

#### 5.4.4.1 Cellule photovoltaïque idéale :

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode, fig. 1.10, qui correspond à la région de transition p-n de la cellule PV.



**Figure 1.10 :** Modèle d'une cellule photovoltaïque idéale

D'après la loi de nœuds, nous pouvons écrire que le courant  $I$  produit à la sortie est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (1.1)$$

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance (de charge) est égale à la tension aux bornes de la diode :

$$V = V_d \quad (1.2)$$

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation :

$$I_d = I_0 \left( \exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (1.3)$$

$I_0$  : Le courant de saturation inverse de la diode [A].

$V_d$  : La tension aux bornes de la diode [V].

$V_t$  : Potentiel thermique.

En remplaçant l'expression de l'intensité  $I_d$  dans l'expression (1.1), nous obtenons la relation suivante :

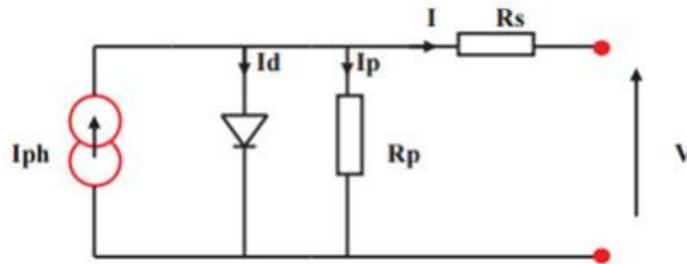
$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (1.4)$$

#### 5.4.4.2 Cellule photovoltaïque réelle :

Le modèle photovoltaïque précédent ne prenait pas en compte tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans la réalité, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. A ce titre, on modélise donc la perte de tension par une résistance en série  $R_S$  et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_P$ , fig. 1.11.

En tenant compte de ces résistances, l'expression de l'intensité du courant devient :

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (1.5)$$



**Figure 1.11** : Modèle de la cellule photovoltaïque réelle

Par ailleurs, l'on peut exprimer l'intensité du courant  $I_p$  qui circule dans la résistance  $R_p$  en appliquant la loi des mailles ( $V = R_p I_p - R_s I$ ) :

$$I_p = \left( \frac{V + R_s I}{R_p} \right) \quad (1.6)$$

D'un autre côté, en considérant la relation (1.3) qui relie l'intensité du courant de la diode  $I_d$  en fonction de la tension  $V_d$  aux bornes de la diode d'une part, et en remplaçant d'autre part la tension  $V_d$  par l'expression  $(V + I R_s)$  conformément à la loi des mailles, l'expression du courant  $I_d$  peut alors s'écrire :

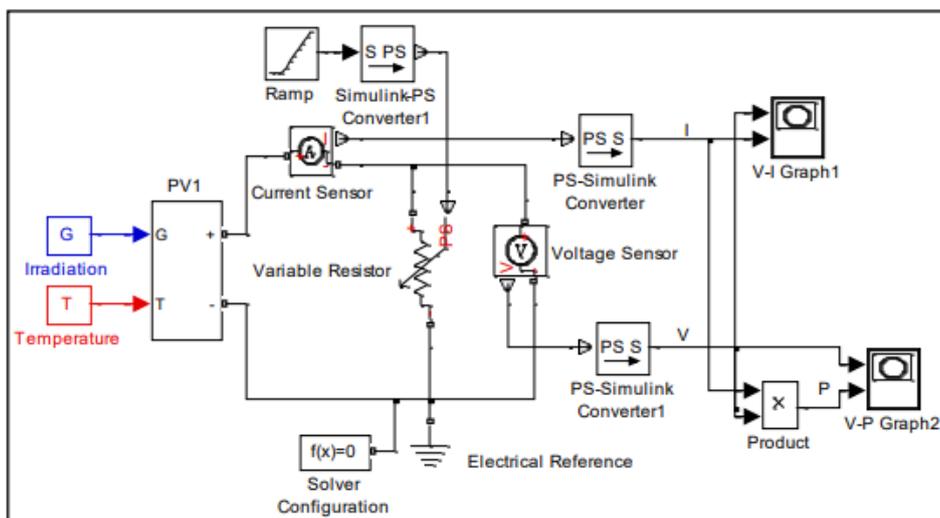
$$I_d = I_0 \cdot \left( \exp \left( \frac{V + I R_s}{V_t} \right) - 1 \right) \quad (1.7)$$

Finalement, nous pouvons écrire l'expression de l'intensité du courant  $I$  fournie par la cellule PV en vertu de l'expression (1.5) :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + I R_s}{V_t} \right) - 1 \right) - \left( \frac{V + R_s I}{R_p} \right) \quad (1.8)$$

#### 5.4.4.3 Paramètres caractéristiques d'une cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques se distinguent les unes des autres au moyen d'un certain nombre de paramètres :  $I_{CC}$ ,  $V_{CO}$ ,  $FF$ ,  $\eta$  qui sont fournis par les constructeurs ou bien extraits des caractéristiques courant-tension de la cellule PV. Ces paramètres permettent ainsi de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.



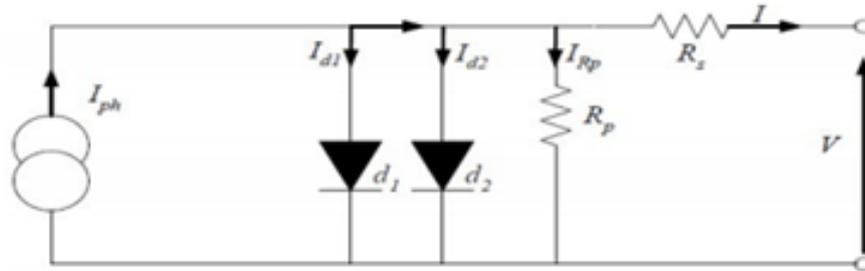
**Figure 1.12** : Modèle de simulation pour un panneau photovoltaïque (PV) [15]

#### 5.4.4.4 Simulation du modèle :

Nous présentons sur la figure 1.12 le modèle de simulation d'une cellule photovoltaïque empruntée à une étude réalisée par Berrezzoug en 2016 [15].

#### 5.4.4.5 Modèle à deux diodes :

Le schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisé, est représenté sur la figure 1.13. Il s'illustre par rapport au précédent modèle par le remplacement de la diode par une paire de diodes mises en parallèle.



**Figure 1.13 :** Schéma du modèle équivalent à deux diodes d'une cellule photovoltaïque [15]

L'expression de l'intensité du courant I fourni par la cellule PV selon le modèle à deux diodes est donnée par l'équation (1.9) :

$$I = I_{ph} - I_{s1} (e^{q(V + I R_s)/(n_1 kT)} - 1) - I_{s2} (e^{q(V + I R_s)/(n_2 kT)} - 1) - ((V + I R_s)/R_p) \quad (1.9)$$

Dans cette expression, les différents paramètres sont ainsi définis :

I et V : Courant et tension de sortie de la cellule photovoltaïque.

$I_{ph}$  : Photo-courant produit.

$I_{s1}$  et  $I_{s2}$  : Courants de saturation des diodes.

$n_1$  et  $n_2$  : Facteurs de pureté de la diode.

$R_s$  et  $R_p$  : respectivement la résistance série et la résistance parallèle.

T : Température absolue en Kelvin.

q : Charge élémentaire constante ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  C).

k : Constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K).

#### 5.4.4.6 Puissance maximale :

Dans des conditions de fonctionnement ambiantes fixes (éclairage, température, ... qui sont constantes), la puissance électrique P disponible aux bornes d'une cellule PV est, par définition, égale au produit du courant continu I fourni par cette cellule PV et de la tension continue V aux bornes de cette cellule.

$$P = I \times V \quad (1.10)$$

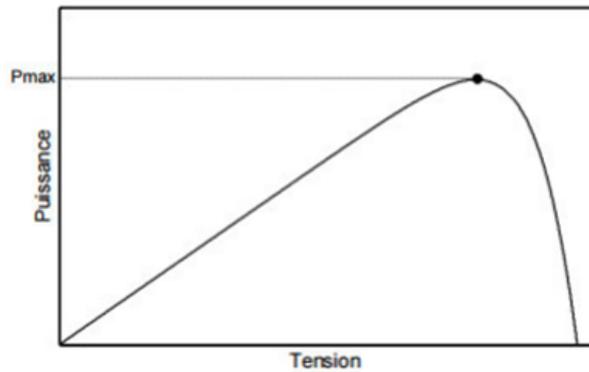
P : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV (Watt).

V : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV (Volt).

I : Intensité fournie par la cellule PV (Ampère).

L'évolution de la puissance P en fonction de la tension V est représentée sur la figure 1.14. Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum  $P_{max\_idéale}$  correspondrait donc à la tension de circuit ouvert  $V_{co}$  multipliée par le courant de court-circuit  $I_{cc}$  :

$$P_{max\_idéale} = V_{co} \times I_{cc} \quad (1.11)$$



**Figure 1.14 :** Courbe caractéristique P-V

$P_{\max\_idéale}$  : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV idéale (Watt).

$V_{co}$  : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV (Volt).

$I_{cc}$  : Intensité de court-circuit fournie par la cellule PV (Ampère).

*En pratique, les professionnels caractérisent un module PV par sa puissance nominale aux conditions de fonctionnement standard STC (STC : Standard Test Conditions en anglais). Ces conditions ont été ainsi définies : un ensoleillement de  $1000W/m^2$  et une température de  $25^{\circ}C$ .*

#### 5.4.4.7 Le facteur de forme FF :

On appelle Facteur de Forme FF, le rapport entre la puissance maximum  $P_{\max}$  fournie par la cellule, et la puissance maximale d'une cellule idéale.

Rappelons que la puissance maximale d'une cellule idéale est définie comme le produit du courant de court-circuit  $I_{cc}$  par la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ .

$$FF = \frac{P_{\max}}{(V_{co}I_{cc})} \quad (1.12)$$

Le facteur peut être également exprimé ainsi :

$$FF = \frac{I_m V_m}{(V_{co}I_{cc})} \quad (1.13)$$

#### 5.4.4.8 Rendement de conversion :

Par définition, le rendement  $\eta$  des cellules PV désigne le rendement de la conversion en puissance photovoltaïque. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale  $P_{\max}$  délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$  :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}}$$

En vertu de l'expression (2.13), l'expression du rendement s'écrit de nouveau :

$$\eta = \frac{FF \times V_{co} \times I_{cc}}{P_{in}} \quad (1.14)$$

En conclusion, le rendement peut être amélioré en augmentant soit le facteur de forme, soit le courant de court-circuit soit la tension en circuit ouvert.

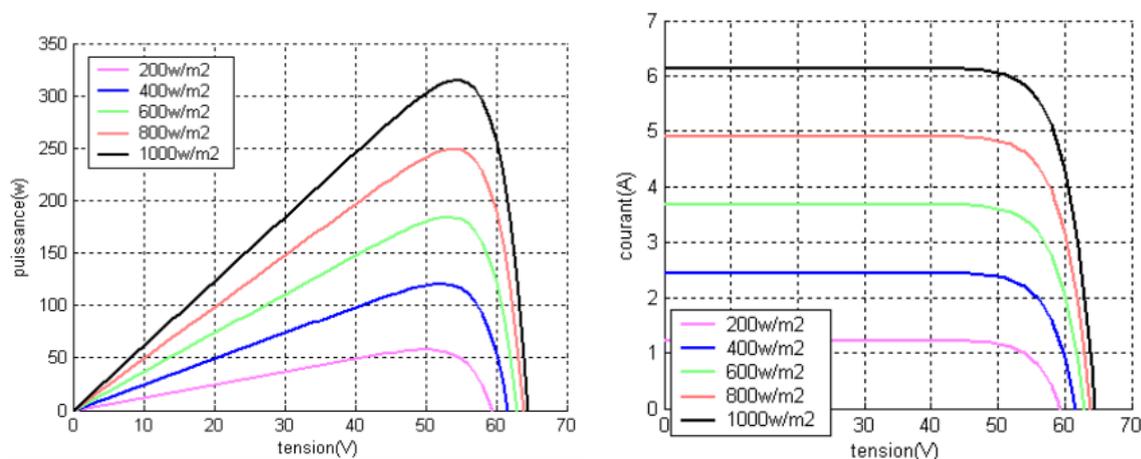
## 5.5 Influence de l'éclairement et de la température :

### 5.5.1 Influence de l'éclairement :

Une baisse de l'éclairement provoque nécessairement une diminution de la création des paires électron/trou. En absence de tout éclairement, il subsiste cependant un courant très faible engendré par la circulation des porteurs minoritaires (c'est le courant inverse dans la diode). Ce courant est appelé courant d'obscurité.

En clair, le courant solaire produit par le panneau solaire est égal à la différence entre le courant  $I_{ph}$  engendré par l'éclairement et le courant d'obscurité intrinsèque à la diode. En conséquence, une baisse dans l'éclairement de la cellule PV entraîne indéniablement une diminution proportionnelle du courant solaire  $I_{cc}$  qui sera accompagnée d'une très légère diminution de la tension  $V_m$  et donc en définitive, un décalage du point  $P_m$  du panneau solaire vers les puissances inférieures.

Les graphes suivants représentent respectivement les caractéristiques  $P(V)$  et  $I(V)$  d'un générateur photovoltaïque (panneau SPR315E de chez SUNPOWER) pour une température constante  $T = 25^\circ C$  et un ensoleillement variable de  $G = 200W/m^2$  jusqu'à  $1000 W/m^2$ .



**Figure 1.15 :** (a) Courbes  $P(V)$  et (b) Courbes  $I(V)$  d'un panneau à divers ensoleillements à une température constante  $T = 25^\circ C$  [16]

L'on constate sur la figure 1.15 (a) que la puissance de la cellule PV est d'autant plus faible que l'éclairement de la cellule est moins élevé à cause précisément de la diminution du courant  $I_{cc}$ . Par ailleurs, l'examen de la courbe  $I(V)$  de la figure 1.15 (b) fait clairement ressortir que la valeur du courant de court-circuit est précisément directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement.

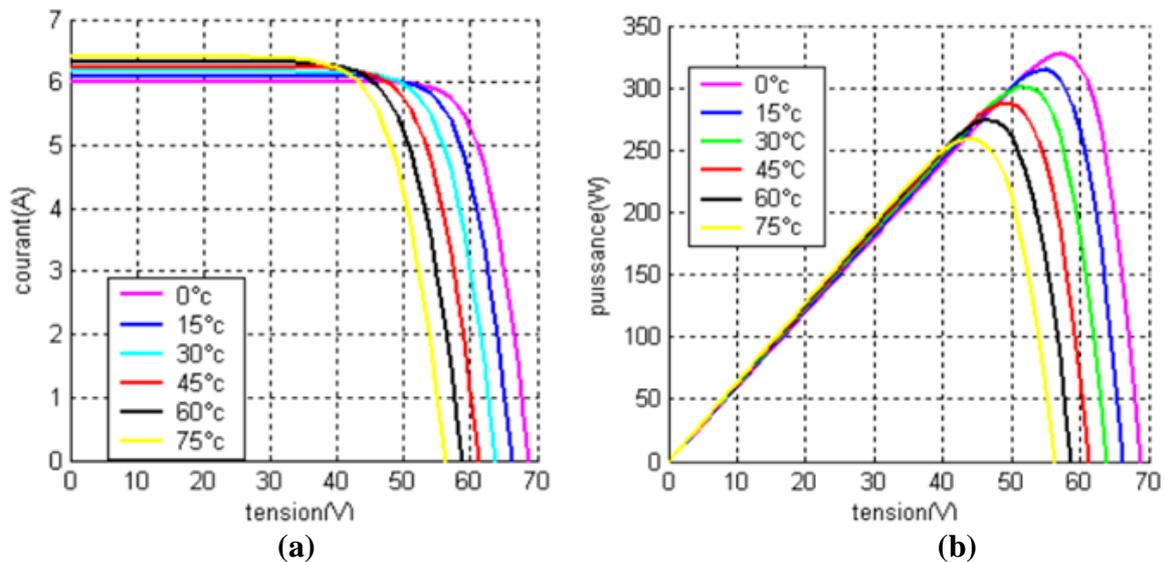
Ce courant est d'autant plus élevé que l'intensité du rayonnement est plus grande. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique aussi bien à faible éclairement qu'à éclairement élevé. Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule  $P_m$  est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension [17].

### 5.5.2 Influence de la température :

La figure 1.17 présente des courbes  $I(V)$  et  $P(V)$  pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque variant de  $0^\circ C$  à  $75^\circ C$  et pour une irradiation constante, soit  $G = 1000W/m^2$ .

Nous remarquons d'abord sur la figure 1.16 (a) que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse de manière significative lorsque la température augmente.



**Figure 1.16 :** (a) Courbes I(V) et (b) Courbes P(V) d'un panneau PV pour différentes valeurs de la température et pour un éclairement constant  $G = 1\text{W/m}^2$  [16]

Sur un autre plan, nous savons que la puissance fournie par une cellule PV est directement proportionnelle à la tension mesurée à ses bornes et ce, conformément à l'expression (1.11). En conséquence, la diminution de la tension aux bornes d'une cellule PV impacte nécessairement sur la puissance extractible de cette cellule lorsque la température de cette cellule augmente. Ceci est clairement montré sur la figure 1.16 (b). En effet, la puissance maximale  $P_{\text{max}}$  diminue au fur et à mesure que la température augmente.

Il est enfin utile de noter que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% pour chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C [17].

**Liste des références bibliographiques :**

- [1] Les Energies fossiles et la pollution atmosphérique [En Ligne] [http://www4.ac-nancy-metz.fr/physique/ancien\\_site/Nouvprog/prem\\_L/docs/enjeux\\_planet/Energies-fossiles&pollution-CH.pdf](http://www4.ac-nancy-metz.fr/physique/ancien_site/Nouvprog/prem_L/docs/enjeux_planet/Energies-fossiles&pollution-CH.pdf); consulté le 14 mars 2020.
- [2] Global Warming [En Ligne] <https://aboutgw.do.am/> ; Consulté le 01 mai 2020.
- [3] Effet de serre [En Ligne] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet\\_de\\_serre](https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_de_serre) ; Consulté le 13 mars 2020.
- [4] Hadj Belkacemi Mohammed ; Modélisation et Etude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perforé ; Mémoire de Master ; Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2011.
- [5] Photovoltaic Systems Technology 2003 ; [En Ligne] ; <https://www.scribd.com/document/26768123/Photovoltaic-Systems-Technology-SS-2003>; consulté le 14 mars 2020
- [6] How much energy does the world consume ? [En Ligne] <https://ourworldindata.org/energy> ; Consulté le 01 mai 2020.
- [7] Nabil Nehli ; Energies fossiles : L'Algérie – 18<sup>ème</sup> réserve mondiale ; [En Ligne] <https://www.algerie360.com/energies-fossiles-lalgerie-18eme-reserve-mondiale/>; Consulté le 17 août 2020.
- [8] Algérie : Nouveau record pour la consommation énergétique des algériens ; [En Ligne] ; <https://www.dzairdaily.com/algerie-consommation-energetique-finale-algeriens-2019/> ; Consulté le 7 août 2020.
- [9] [Data and statistics - Algeria : Balances 2017, Agence internationale de l'énergie](#), 24 septembre 2019 ; cité in [https://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie\\_en\\_Algérie](https://fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_en_Algérie) ; Consulté le 7 août 2020.
- [10] Tahraoui Ibrahim & Halil Amine ; Dimensionnement et Etude d'une installation photovoltaïque pour une habitation domestique ; Mémoire de master ; Université de Tlemcen ; Algérie, 2017.
- [11] Bensaci Wafa ; Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT ; Mémoire de master ; Université d'Ouargla ; Algérie, 2012.
- [12] Daoudi Ali ; Etude et simulation d'un traqueur de puissance maximale d'un système photovoltaïque ; Mémoire de magister ; Université de Constantine ; Algérie, 2010.
- [13] Kawther A., Production d'énergie électrique à partir de l'énergie photovoltaïque ; Mémoire de License ; Université de Guelma, 2017.
- [14] A. Labouret, M. Viloz ; Energie solaire photovoltaïque ; 3<sup>ème</sup> édition ; Dunod, Paris, 2006.
- [15] Berrezzoug Hanane ; Principe de fonctionnement et mesure des caractéristique d'une cellule photovoltaïque ; Mémoire de Master ; Université Moulay Tahar Saida ; 2016
- [16] Assia Zerdoudi & Rachid Chenni ; Etude de l'influence des différents paramètres sur un module photovoltaïque ; article publié le 25/06/2015 ; Science & Technology A N°41 ; Université des frères Mentouri de Constantine.
- [17] Madani Maroua, Implantation d'un algorithme MPPT dans un FPGA en utilisant la carte ML605 ; Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf ; M'sila ; 2018.

## Chapitre 2 : Aspects théoriques

Nous abordons dans ce chapitre les aspects théoriques impliqués de manière directe dans l'application que nous nous sommes attelés à étudier de manière à faciliter l'appréhension du montage électronique retenu.

Rappelons qu'il s'agit d'étudier un système permettant de maintenir la température des panneaux solaires dans une gamme de valeurs qui aboutirait à une exploitation optimale de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. En outre, ce système doit être automatisé, ce qui implique le recours à un système programmé, qu'il convient de définir, pour contrôler cette régulation de température.

A ce propos, cette étude théorique est subdivisée en quatre parties. Nous passons en revue dans la première partie un certain nombre de capteurs qui sont susceptibles d'être retenus dans cette application. La seconde partie traite du concept de la régulation où nous expliquons pourquoi nous avons opté pour la régulation numérique. Ce dernier choix nous a obligé alors à recourir aux techniques de conversion analogique-numérique et numérique-analogique qui sont abordés de manière rapide dans la troisième partie de ce chapitre. Finalement, nous parachevons ces rappels théoriques avec un détour sur les solutions programmées qui peuvent intervenir dans la commande de tout processus de régulation. Nous détaillerons, dans la mesure du possible, notre choix qui s'est arrêté sur un système à base de microprocesseur.

### Partie A : Mesure de la température

#### A.1. Introduction :

Il existe plusieurs composants ou dispositifs électroniques qui sont très sensibles à l'influence de la température. Ils fournissent un signal électrique qui peut être exploité par un appareil de mesure. Le choix du capteur est impératif et correspond à une analyse du système dans lequel la connaissance du milieu à mesurer, les modes opératoires et les habitudes de production sont essentiels.

Le choix du capteur dépend des critères suivants :

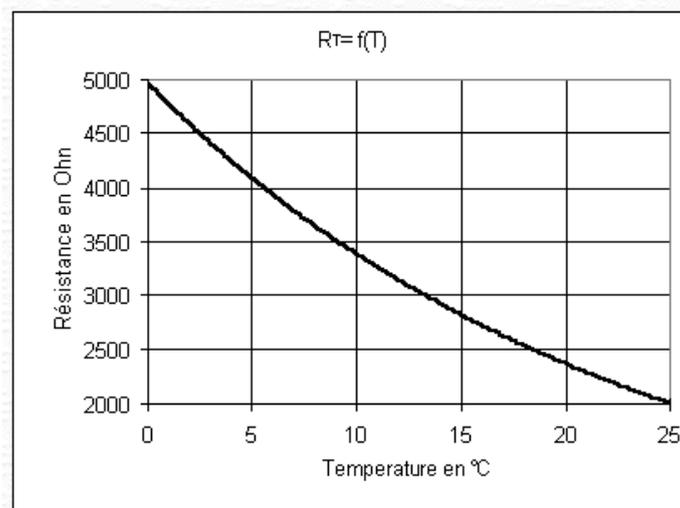
1. La plage de mesure.
2. La précision nécessaire.
3. Le temps de réponse souhaité.
4. Le capteur possède-t-il un élément de mesure démontable ?
5. Les risques encourus par le capteur.
6. Le point physique de mesure le plus approprié.
7. Le risque pour le système après installation du capteur.
8. Le risque en cas de défaillance du système.
9. La maintenance prévisible sur le capteur.

#### A.2. Les différents types de capteurs de température :

Il existe plusieurs types de capteurs de température. Parmi ces composants, nous trouvons : les thermistances, les thermocouples, les capteurs thermiques à quartz, les pyrocapteurs, les capteurs thermiques à transistors (à semi-conducteurs).

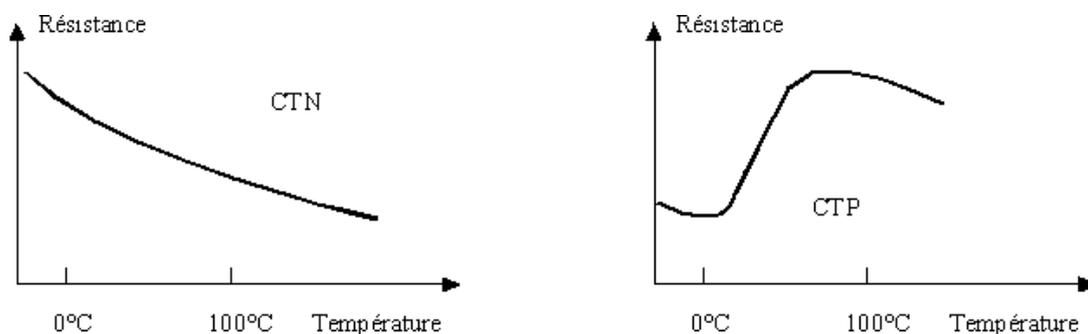
### A.2.1 Les thermistances :

La propriété primordiale de ce type de résistance est une sensibilité thermique très élevée, de l'ordre de 10 fois celle des résistances métalliques. Elles sont constituées à partir de mélanges d'oxydes métalliques semi-conducteurs polycristallins qui sont précisément très sensibles à l'influence de la température [1]. La courbe de la figure 3.1 montre un exemple d'un type de thermistance où l'on remarque une forte diminution de la résistance d'un facteur de 2,5 sur une plage de température de 0° à 25°C.



**Figure 2.1 :** Variation de la résistance d'une thermistance en fonction de la température [2]

Les thermistances peuvent être classées suivant leurs caractéristiques de base dans deux classes distinctes. En effet, certaines thermistances voient leur résistance augmenter lorsqu'elles sont chauffées, ce sont les thermistances à coefficient de température positif (CTP). D'autres au contraire, voient leur résistance faiblir lorsque la température diminue, ce sont les thermistances à coefficient de température négatif (CTN). Nous présentons dans la figure 3.2 les allures de la variation de la résistance en fonction de la température pour les deux types de thermistance. L'on constate de premier abord que la résistance des thermistances CTN varie sur une large gamme de température tandis que la résistance des thermistances CTP varie, quant à elles, sur une gamme de température très réduite.



**Figure 2.2 :** Caractéristiques typiques d'une CTN et d'une CTP

#### A.2.1.1 Thermistance à Coefficient de Température Négatif (CTN) :

C'est une thermistance dont la résistivité diminue de manière monotone quand la température augmente. Cette diminution a lieu sur une large gamme de température. La plupart des

thermistances CTN sont constituées par des oxydes céramiques homogènes qui sont effrités à des hautes températures. Ces thermistances sont stables à l'air libre car elles ne réagissent pratiquement pas avec l'oxygène. Elles se présentent sous la forme de disques ou bâtonnets dont la masse se situe entre le milligramme et quelques grammes [1].

La variation de la résistivité de la thermistance en fonction de la température est donnée par la formule suivante :

$$R(T) = R(T_0)e^{\alpha\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (1)$$

où :  $R(T)$  est la valeur de la résistance du capteur à la température  $T$  ;  $R(T_0)$  est la valeur de la résistance du capteur à la température de référence  $T_0$  ; les températures  $T$  et  $T_0$  sont exprimées en K (Kelvin) ;  $\alpha$  et  $T_0$  sont des constantes caractéristiques du composant [3].

Les thermistances CTN couvrent une large gamme d'applications. Nous citerons à titre d'exemple : la compensation thermique du circuit à transistor, la mesure et le contrôle thermique, la régulation automatique des appareils de communication, ...

#### **A.2.1.2 Thermistance à Coefficient de Température Positif (CTP) :**

Ce sont des thermistances dont la résistance augmente fortement avec la température dans une plage de température limitée. L'augmentation de la température a lieu entre deux températures relativement proches. Ce type de thermistance est constitué par une céramique à base de titanate de baryum ( $BaTiO_3$ ).

Comparées à d'autres éléments chauffants, la thermistance à CTP présente de nombreux avantages parmi lesquels, nous citons :

- La thermistance est automatiquement réglée à la température spécifiée,
- Elle est insensible aux interférences,
- Elle économise l'énergie,
- Sa température est indépendante de la tension appliquée, ...

Enfin, les thermistances à CTP sont utilisées dans de nombreuses applications telles que la protection contre les surcharges, la commutation retardée, le chauffage, les téléviseurs couleurs, les circuits de démagnétisation, ...

#### **A.2.1.3 Thermistance RTC (Résistance à Température Critique) :**

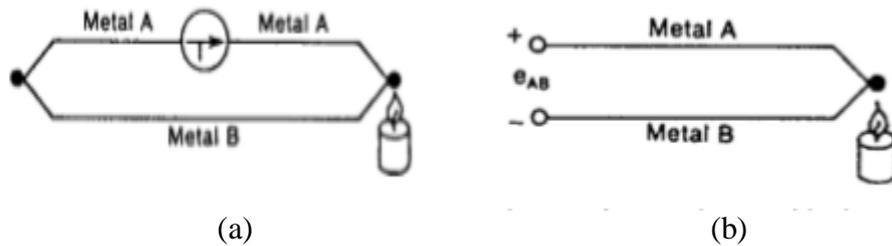
C'est une thermistance dont la résistivité baisse brusquement à partir d'un certain seuil de température. C'est un véritable commutateur de température. Ce type de thermistance est utilisé dans les alarmes de température, les détecteurs à infrarouges, les mesures des points de température spécifique, ... etc.

#### **A.2.2 Les thermocouples :**

Le thermocouple est un capteur thermique qui permet d'atteindre les températures les plus élevées. Il est facile à utiliser et sa constitution est simple. Il se présente sous la forme de deux conducteurs de natures différentes reliés entre eux par deux jonctions souvent appelées soudures.

**Fonctionnement :** Le thermocouple est un capteur qui mesure la température par l'intermédiaire d'une force électromotrice. Son fonctionnement est basé sur l'effet « Seebeck » dont le principe consiste à maintenir une des jonctions à une température constante et connue

et à utiliser l'autre jonction comme sonde de température. La tension délivrée par le thermocouple fournit une valeur en fonction de la température.



**Figure 2.3 :** Principe de fonctionnement d'un thermocouple

**Explication :** Lorsque deux fils, composés de métaux différents, sont raccordés à leurs extrémités et que l'une d'elles est chauffée, il se produit une circulation de courant continu dans le circuit. C'est l'**effet thermoélectrique**, Figure 2.3.a.

Si on coupe le circuit, la tension qui apparaît entre ces deux bornes est fonction de la température ainsi que de la nature des deux métaux, Figure 2.3.b.

En pratique, on utilise souvent des thermocouples constitués à partir de matériaux qui sont choisis de manière à ce que la variation de la tension de sortie en fonction de la température soit relativement linéaire. Ceci est traduit par la formule suivante :

$$V_s = \alpha(T_c - T_f) \quad (2)$$

où  $\alpha$  est le coefficient de Seebeck ;  $T_f$  est la température de référence et  $T_c$  est la température mesurée.

Selon le type des matériaux qui constituent les thermocouples, la gamme des températures exploitées s'étend depuis les très basses températures,  $T_{\min} = -270 \text{ }^\circ\text{C}$ , qui sont atteintes pour le couple Cuivre/Or-Cobalt jusqu'à des températures très élevées ( $T_{\max} = 2700 \text{ }^\circ\text{C}$ ) pour le couple Tungstène-Rhénium5%/Tungstène-Rhénium26%. Pour ce dernier type de thermocouple, il est clair que les températures de travail dépassent, et de beaucoup, les limites maximales d'utilisation des résistances thermométriques (1400 °C environ) [1].

### A.2.3 Les pyrocapteurs :

La mesure de la température, dans ce type de dispositif, repose sur le principe de la détection de la quantité du rayonnement infrarouge irradiée par l'objet de mesure. Un matériau à effet pyro-électrique est souvent utilisé car, une fois soumis à une radiation infrarouge, il l'absorbe et s'échauffe ce qui entraîne une modification de sa polarisation mesurable par la variation de la tension aux bornes d'un condensateur associé.

Les pyrocapteurs ont un champ d'application propre dans lequel ils sont irremplaçables. Citons, à titre d'exemple, (i) le contrôle des températures très élevées auxquelles un capteur de contact serait vite détérioré ; (ii) le contrôle des objets qui sont sous tension ou bien encore qui sont placés dans un champ magnétique ou électromagnétique ; (iii) Mesure sur une cible de très petites dimensions où un thermocouple fausserait le résultat par prélèvement des calories.

L'avantage que présente le pyrocapteur par rapport aux autres capteurs de température est qu'il est très rapide en mesure avec un temps de réponse allant de quelques ms à une ou deux secondes pour les plus lents d'entre eux. En outre, il ne faut pas oublier que la mesure de la température est effectuée à distance. Ce critère est considéré dans certaines applications comme étant un facteur très déterminant. En effet, il n'y a guère d'autres solutions lorsqu'il s'agit de mesurer la température dans les installations à très haut risque (toxicité, radioactivité, très forte chaleur, ...).

Il existe plusieurs types de pyrocapteur parmi lesquels nous trouvons :

- Les pyrocapteurs à radiation totale,
- Les pyrocapteurs à radiation partielle dite « monochromatique »,
- Les pyrocapteurs à disparition de filament,
- Les pyrocapteurs bicolores (ou bichromatiques).

Suivant leurs utilisations, les pyrocapteurs peuvent être portatifs ou à poste fixe. Ces derniers sont plus précis.

## **Partie B : Régulation numérique**

### **B.1. Introduction**

Le terme de régulation est utilisé lorsqu'on recherche à éliminer des perturbations non souhaitées afin de garder, par exemple, une température constante ou encore une pression, un débit ou une hygrométrie.

La régulation est l'action de régler automatiquement une grandeur physique de sorte qu'elle conserve constamment sa valeur ou, tout au moins, rester proche de la valeur désirée et ce, quelles que soient les perturbations qui peuvent survenir.

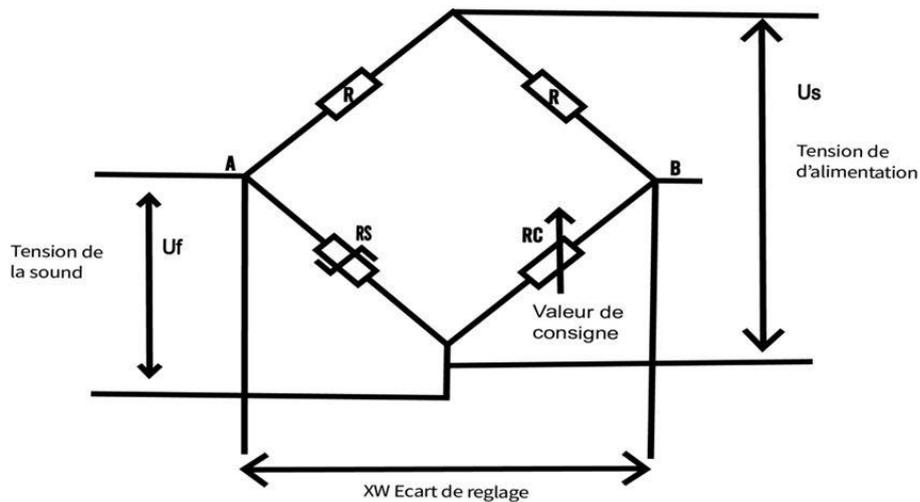
A ce propos, les capteurs mesurent en permanence la grandeur à réguler puis transmettent ces informations à l'unité de contrôle. Celle-ci compare cette mesure à la valeur désirée (la consigne) stockée en mémoire. Finalement, suivant un algorithme préprogrammé, le régulateur va transmettre des ordres aux actionneurs (électrovannes, volets, moteurs, etc.), afin de corriger les erreurs et ramener la grandeur mesurée à la sortie du système vers la valeur de la consigne [4].

### **B.2. La régulation :**

Il existe essentiellement deux manières de réguler une grandeur physique dans un processus quelconque et cela en fonction de la nature des signaux mis en jeu : la régulation analogique et la régulation numérique.

#### **B.2.1 Régulation analogique :**

Un régulateur analogique compare la valeur réelle à la valeur de consigne et détermine à partir de cet écart la variation de la grandeur de réglage.



**Figure 2.4 :** Principe de la régulation analogique concrétisée au moyen d'un pont de Wheatstone

Cette comparaison peut être, par exemple, accomplie à l'aide d'un pont de Wheatstone. Ce dernier est constitué par quatre résistances branchées comme il est indiqué à la figure 2.4. Deux résistances fixes ( $R$ ) ont la même valeur tandis que les deux autres sont des résistances variables : la résistance sonde ( $R_s$ ) et le potentiomètre ( $R_c$ ) pour le réglage de valeur de consigne.

Lorsque le système est en équilibre (c'est-à-dire lorsque le potentiel au nœud A est égal à celui du nœud B ; soit :  $V_A - V_B = 0$ ), la résistance de consigne  $R_c$  est alors égale à la résistance de la sonde  $R_s$  (l'équilibre est établi lorsque  $R/R_s = R/R_c$  et donc  $R_s = R_c$ ).

Supposons que la résistance  $R_s$  change de valeur, la tension  $U_f$  change aussi de valeur engendrant ainsi l'apparition d'une tension d'écart  $X_W$  : l'équilibre du pont est donc rompu. Pour revenir à l'équilibre ( $V_A = V_B$ ), il suffit alors de faire varier la valeur de la résistance  $R_c$  de manière à ce que les potentiels aux nœuds A et B soient, de nouveau, égaux et donc  $X_W = 0$ .

Cet écart doit suivre sans retard et de façon continue (et donc de manière analogique) les variations de la résistance aux bornes de la résistance sonde.

Ce type de régulation, dit régulation analogique, est appelé à disparaître et ne peut guère convenir que pour des applications de loisirs ou à faible coût. Un nouveau type de régulateur, dit régulateur numérique, a supplanté le premier et lui prend des parts de marché de plus en plus importantes dans tous les domaines d'application.

### **B.2.2 Régulation numérique :**

Depuis l'apparition et le développement des systèmes informatiques, construits à base des circuits microprocesseurs et microcontrôleurs, leur utilisation dans le domaine de la commande et de la régulation des systèmes industriels ne cesse de croître régulièrement.

Ce développement résulte essentiellement de la souplesse dans la réalisation des régulateurs numériques : la mise au point et le réglage consistent principalement à déterminer les

coefficients d'une équation dite équation récurrente, qui constitue le cœur d'un programme de calcul exécuté en boucle par un processeur. Le coût de développement et de maintenance d'un tel régulateur est donc nettement plus avantageux que la réalisation de cartes analogiques spécifiques, nécessaires à la réalisation de régulateurs analogiques [5].

En effet, la programmation des systèmes numériques leur offre une supériorité évidente par rapport aux systèmes analogiques dans la mesure où elle les rend "intelligents". D'un autre côté, la régulation numérique assure des performances jusqu'ici impossible à réaliser en instrumentation analogique parmi lesquelles nous pouvons citer, à titre d'exemple :

- Une facilité de transmission.
- Une souplesse d'emploi.
- Une meilleure surveillance.
- Une économie d'énergie.

### B.3. Principe de fonctionnement d'un régulateur numérique :

Dans un système de régulation numérique (Direct Digital Control ou DDC en anglais), les logiques d'automatisme ainsi que les fonctions de régulation sont toutes exécutées par un micro-ordinateur dont le cœur n'est autre que le circuit microprocesseur.

Les signaux d'entrées et de sorties sont généralement des signaux analogiques. Le calculateur ne sachant traiter que les grandeurs binaires, ces signaux (analogiques) doivent donc être transmis sous forme binaire au calculateur. Ceci est assuré par un circuit intégré spécialisé CAN (Convertisseur Analogique Numérique).

Dans le même ordre d'idées, une opération inverse est donc également nécessaire pour les signaux de sortie du calculateur qui sont de type binaire. Ces signaux logiques sont donc convertis, au moyen d'un autre circuit intégré spécialisé CNA (Convertisseur Numérique Analogique), afin de retrouver des signaux analogiques qui seront destinés aux organes de réglage dont la nature est linéaire (analogique).

En résumé, le régulateur analogique a donc été remplacé par trois organes distincts : Le Convertisseur Analogique Numérique, le calculateur et le Convertisseur Numérique Analogique. La figure 2.5 illustre le schéma de principe d'un régulateur numérique. Ce dernier est simplement constitué de :

- L'unité centrale (UC), contenant les mémoires ainsi que le programme de calcul, supervise la régulation du procédé (surveillance et calcul de l'erreur de décalage).

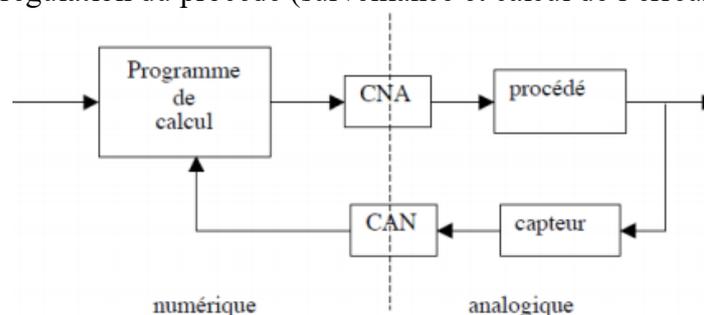
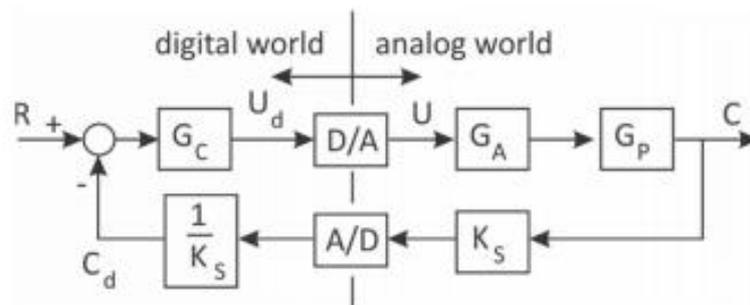


Figure 2.5 : Structure générale d'une régulation numérique [6]

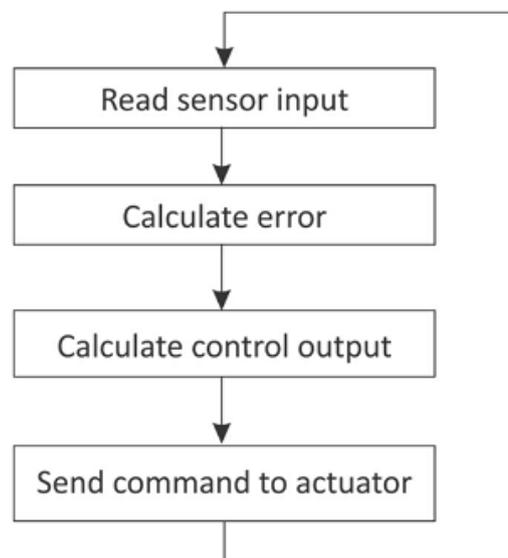
- Les cartes d'entrées/sorties (CNA et CAN) assurent la liaison entre le processeur et les appareils périphériques (actionneurs et capteurs reliés au procédé).
- Les périphériques composés des organes d'entrées (capteurs) et des organes de sortie (actionneurs, terminal) permettent la connexion de ce système avec le monde extérieur.

Le capteur, l'actionneur ainsi que le processus à surveiller représentent les dispositifs analogiques qui manipulent des grandeurs continues, en l'occurrence ici, la valeur à contrôler "C", figure 2.6, qui est détectée par le capteur, modélisé ici par un simple gain "Ks",



**Figure 2.6 :** Boucle de contrôle, montrant la frontière entre le monde extérieur (analogique) et le monde numérique à l'intérieur d'un système programmé [6]

A ce stade de l'opération, l'algorithme qui supervise la régulation du processus est alors lancé, figure 2.7. Il procède à une comparaison entre la grandeur de sortie mesurée "C" et la valeur de la consigne souhaitée "R". S'il y a un écart entre ces deux grandeurs, l'algorithme détermine alors la correction à introduire dans cette boucle de régulation et envoie finalement cette correction "Ud" à l'actionneur après l'avoir convertie en une grandeur analogique (généralement une tension) par le convertisseur N/A.



**Figure 2.7 :** Un régulateur numérique fait tourner un programme informatique en boucle afin d'assurer la régulation d'un paramètre du processus à une valeur précise [6]

#### B.4. Propriétés de la régulation numérique :

La régulation numérique offre de nombreux avantages mais recèle néanmoins quelques inconvénients :

#### **B.4.1 Avantages :**

- Grande souplesse liée à la possibilité de modifications des programmes.
- Pratique : Elle permet la gestion des séquences de régulations complexes.
- Economie dans l'investissement : Gestion de plusieurs processus indépendants les uns des autres au moyen d'un même régulateur.
- Télésurveillance : Possibilité de mettre des modems pour commander ou interroger le système à distance.
- Economie d'énergie : Permet l'économie de l'énergie (un seul poste de contrôle).
- Conditions de sécurité améliorée : L'accès aux systèmes est protégé.
- Encombrement réduit et câblage simplifié.
- Peu de pièces en mouvement donc peu d'usure.
- L'application peut être répartie sur plusieurs régulateurs, chacun ayant une tâche différente.
- La régulation numérique par rapport à la régulation analogique est plus coûteuse mais se révèle nettement plus économique lors d'une extension du système.

#### **B.4.2 Inconvénients :**

- Lenteur accrue engendrée par le temps de calcul et le temps sollicités par les scrutations.
- Erreurs possibles dans la conversion analogique numérique.
- Alourdissement introduit dans les boucles simples en raison des opérations de conversion analogique/numérique et numérique/analogique.
- Matériel plus coûteux par rapport à une technologie analogique pour des régulations simples.

## **Partie C : Conversions Analogique/Numérique (CAN) et Numérique/Analogique (CNA)**

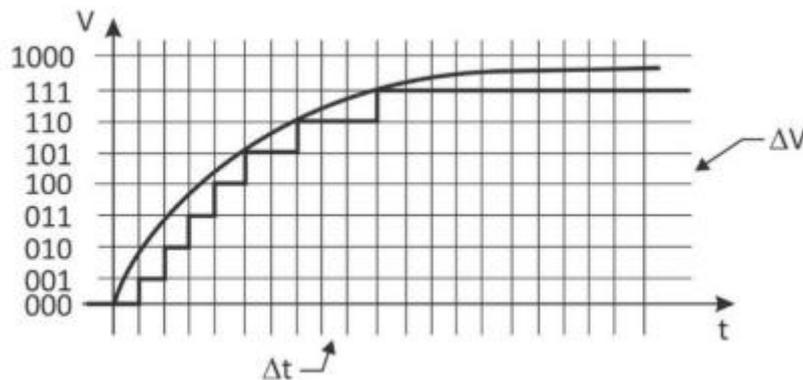
### **C.1. Introduction :**

A cause des avantages qu'il présente par rapport à l'analogique, l'électronique numérique a pris une importance de plus en plus accrue dans le domaine de l'électronique d'une manière générale. Ceci est dû, d'abord, aux énormes progrès technologiques enregistrés au niveau des circuits intégrés qui deviennent de plus en plus denses et complexes. D'autre part, les circuits intégrés numériques offrent une excellente immunité au bruit. Ils sont relativement plus faciles à mettre en œuvre dans un montage électronique et sont insensibles aux phénomènes de dérives de la température contrairement aux circuits intégrés analogiques.

Les grandeurs que nous souhaitons réguler (pression, volume, lumière, température, ...) sont souvent de type analogique. Le calculateur ne sachant traiter que les grandeurs binaires, nous avons donc besoin de systèmes d'acquisition et de conversion de données qui doivent assurer l'interface entre le monde réel dont les grandeurs présentent des variations continues et le monde numérique des calculateurs qui travaillent dans le mode binaire sur des grandeurs discrètes. A noter que le système de conversion des données constitue le dernier domaine où l'analogique reste encore d'actualité.

La courbe de la figure 2.8 montre un exemple typique de la conversion d'un signal analogique en un signal numérique [6]. Notons ici que seulement 8 points, dont les coordonnées sont  $(V_i ; t_i)$ , ont été utilisés pour représenter l'évolution du signal continu (qui suit une loi de type

exponentielle). Parmi ces huit points, seuls quatre points coïncident avec les points réels de la courbe : le point de départ (0, 0) ainsi que les trois derniers points.



**Figure 2.8** : Conversion analogique numérique d'un signal [6]

Si nous souhaitons une résolution meilleure, on doit augmenter le nombre de bits réservés pour exprimer les ordonnées  $V_i$  et les abscisses  $t_i$ . Avec 10 bits par exemple, on obtient  $2^{10}$  combinaisons (soit 1024 paliers) différentes pour exprimer les valeurs des ordonnées améliorant ainsi la résolution du signal.

## C.2 Les types de conversion

Les systèmes de conversion sont de deux types : la Conversion Analogique-Numérique (CAN) et la Conversion Numérique-Analogique (CNA).

### C.2.1 La Conversion Analogique-Numérique (CAN) :

Le convertisseur analogique numérique est l'élément de base pour chaque ensemble d'acquisition. En effet, il permet de transmettre au système programmé l'information qu'il reçoit sous forme numérique avec une précision et une résolution données.

Le choix du CAN le mieux adapté à une application particulière est assujéti à plusieurs paramètres parmi lesquels nous citons :

- La résolution,
- La précision,
- L'alimentation,
- L'étendue du signal d'entrée et
- La vitesse de conversion.

Deux types de CAN existent : Le CAN à intégration et le CAN à réaction. Ils sont les plus utilisés.

### C.2.2 La Conversion Numérique-Analogique (CNA) :

Est l'opération qui consiste à transformer une valeur binaire (et donc numérique) en une tension ou un courant proportionnels à cette valeur numérique. C'est par l'intermédiaire des circuits intégrés CNA que les calculateurs donnent des ordres ou transmettent des informations vers le monde extérieur analogique.

Les circuits CNA sont utilisés dans un grand nombre de domaines : tels que la visualisation, la synthèse de la parole, le contrôle des processus, ... etc. Ils jouent également un rôle très

important dans les CAN, car beaucoup de circuits CAN comportent un ou plusieurs circuits CNA.

La plupart des circuits CNA sont de type parallèle : En clair, cela veut dire que tous les bits du mot d'entrée agissent en même temps sur les différents circuits constituant le CNA. Ce n'est qu'au bout d'un certain temps, appelé temps d'établissement, que le signal analogique de sortie est disponible et donc utilisable.

## **Partie D : Les systèmes à microprocesseurs**

### **D.1 Introduction :**

Les progrès constants de la technologie réalisés dans le domaine des semi-conducteurs à la fin des années 60 a vu le développement rapide de la microélectronique. La complexité des circuits intégrés (le nombre de transistors intégrés sur une seule puce de silicium double tous les dix-huit mois) ne cessant de croître, cela a abouti à la création des premiers processeurs intégrés au début des années 70. Cette révolution conjuguée avec la fusion des technologies de l'informatique et de l'électronique ont ouvert d'innombrables champs d'applications aux circuits intégrés en général et à la famille des circuits processeurs en particulier qui ont vus s'ouvrir des horizons très divers qui vont de l'industrie de l'armement et de l'aérospatial jusqu'aux télécommunications en passant par le génie biomédical, l'éducation, l'audiovisuel, la domotique, l'automobile, l'agriculture, ... et tout type d'ingénierie. Au final, pratiquement toutes les industries et toutes les économies mondiales sont devenues aujourd'hui de plus en plus dépendantes des technologies des microprocesseurs que ce soit pour le stockage, le transfert, la récupération ou le traitement des informations.

### **D.2 Étude de faisabilité :**

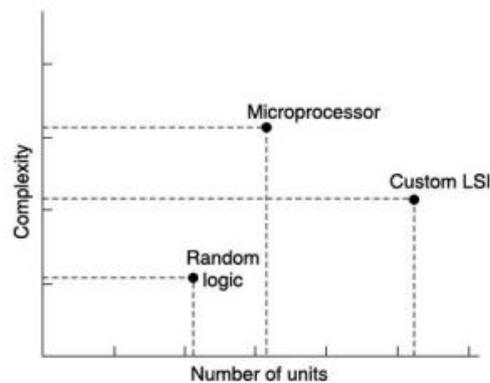
La question fondamentale que nous devons nous poser lorsque nous entamons la conception d'une application dédiée à la gestion automatique d'un processus quelconque est : ***Avons-nous réellement besoin d'un microprocesseur ?***

L'étude de faisabilité fournit le contexte du développement de ce produit dans son environnement réel. Ainsi, lors de cette étude, on doit au préalable envisager diverses autres approches (solutions) concurrentielles comme l'achat tout simplement (!) de ce système (clé en main) et sa modification éventuelle pour les exigences particulières de l'application ou bien encore la conception du système dans toutes ses dimensions depuis le circuit imprimé (niveau composant) jusqu'aux opérations de tests de fonctionnement finals (débogage).

Au cas où nous optons pour la seconde solution, on doit alors sélectionner un niveau de technologie particulier (du plus simple au plus complexe et donc plus cher) en fonction de la disponibilité de l'expertise nécessaire au niveau de l'entreprise pour exploiter et entretenir le produit fini. L'on ne doit pas oublier finalement lors de cette sélection de tenir également compte des analyses des coûts-temps nécessaires pour la mise au point finale de ce produit.

Ce sont là autant d'interrogations que le concepteur doit prendre en considération avant l'entame d'une solution spécifique. Il faut donc éviter de sélectionner le microprocesseur juste par fantaisie ! Malgré l'attrait du microprocesseur, dans de nombreux cas, une solution matérielle pourrait être meilleure et moins chère.

La figure 2.9 explique succinctement les différents choix alternatifs mis à la disposition du concepteur d'un système pour l'aider dans sa décision.



**Figure 2.9 :** Les différents choix alternatifs disponibles pour la conception des systèmes [7]

- Si le système n'est pas complexe et si le nombre d'unités produites est petit, la logique câblée sera la plus appropriée.
- Le circuit intégré spécifique à l'application (ASIC) conviendra à un grand nombre d'unités mais avec une complexité moindre.
- La conception basée sur un microprocesseur est un compromis entre la logique câblée et les circuits ASIC personnalisés.

La conception basée sur un microprocesseur peut, au départ, sembler plus chère que la solution ASIC ou celle à base de logique câblée, car le coût initial élevé de l'application est tiré vers le haut en raison de la nécessité de développement du logiciel nécessaire à l'application. Toutefois, le coût initial pourrait être compensé par des composants peu nombreux et peu chers ce qui rendrait, en définitive, la solution du microprocesseur moins coûteuse sur une certaine gamme de volumes de production et plus particulièrement si l'application est appelée à subir des modifications en termes d'extension et/ou modification de ses caractéristiques.

### D.3 Logique câblée ou Logique programmée ?

Comparativement à une solution programmée, la logique câblée peut se révéler meilleure si les caractéristiques de l'application à concevoir coïncident avec les paramètres de la liste suivante :

- Les fonctions à remplir sont simples (expression de la fonction logique de sortie minimale).
- Un nombre minimal d'entrées et de sorties.
- Le système ne fait appel qu'à une seule fonction de sortie à la fois (bien qu'il puisse y avoir plusieurs entrées). Autrement dit, le système logique engendre une seule expression à plusieurs variables.
- Un petit système sur mesure à concevoir.
- Un fonctionnement à grande vitesse est nécessaire.

Corrélativement, les microprocesseurs seront plus avantageux lorsqu'un ou plusieurs des éléments suivants sont applicables :

- Des entrées multiples sont nécessaires.
- Un grand nombre de fonctions de sortie à faire exécuter.

- Un grand nombre d'état antérieurs de la sortie à prendre en compte.

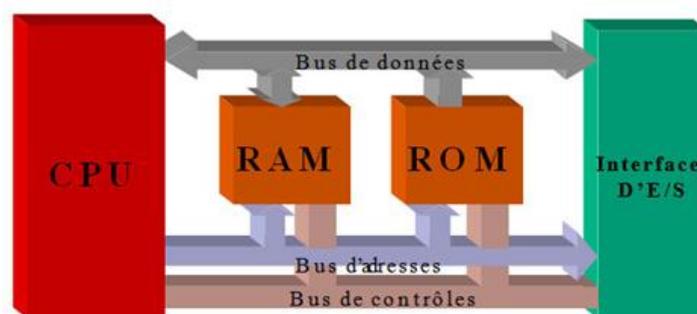
En outre, un autre avantage des solutions programmées (microprocesseur, microcontrôleur, processeur DSP, automate) par rapport à la logique câblée réside dans le domaine de la régulation. En effet, le contrôle de température d'un appareil de chauffage, par exemple, destiné à maintenir la température d'un réservoir à une valeur très précise, est très laborieux à réaliser avec la logique câblée et exigerait de nombreux circuits supplémentaires, tels que des comparateurs, des conditionneurs de signaux, des amplificateurs, etc. Néanmoins, le recours à une logique programmée ne poserait pas énormément de problèmes. D'un autre côté, la plupart des fabricants offrent des logiciels fin-prêts pour le réglage automatique des boucles de régulation PID. Par conséquent, ceci réduit considérablement le temps total nécessaire à la conception du programme complet pour la supervision du système.

Une fois, la logique câblée écartée en tant que solution, il reste à choisir parmi les différentes solutions programmées (à savoir, le système à microprocesseur, le microcontrôleur, le processeur DSP ou l'automate) celle qui convient le mieux.

Brièvement, nous pouvons rappeler que l'automate est choisi lorsque le nombre des périphériques à contrôler est très élevé (par milliers). Le microcontrôleur est retenu lorsque le nombre des périphériques utilisés dans l'application est réduit et que le programme de gestion n'est pas trop complexe. Le processeur de traitement de signal DSP est plutôt dédié aux applications complexes faisant intervenir des algorithmes adaptés au traitement du signal. Finalement, le microprocesseur étant à usage universel, il peut convenir de manière plus générale pour toute application hormis celles particulières où les autres processeurs le surpassent grâce à leurs caractéristiques propres.

#### D.4 Architecture d'un système à base de microprocesseur :

Un système à base de microprocesseur contient principalement les éléments suivants :



**Figure 2.10 :** Les éléments d'un système à microprocesseur [8]

- Un microprocesseur, représenté dans cette figure par une unité centrale de traitement des données (Central Processing Unit : CPU), assure le contrôle de tous les signaux qui circulent à l'intérieur du système à microprocesseur et en dehors de celui-ci.
- Un ensemble de mémoires vive et morte (RAM et ROM) pour la sauvegarde des données, des résultats et des programmes du système et des applications.
- Les circuits d'entrées/sorties qui garantissent l'interfaçage entre le microprocesseur avec les différents périphériques dans toute leur diversité.

A noter que les trois organes constituant le système microprocesseur sont interconnectés entre eux (comme il est montré dans la figure 2.10) et connectés également avec le monde externe au moyen de trois types de bus : bus de données, bus d'adresses et bus de contrôle [8].

### D.5 Le microprocesseur 8086 :

Le microprocesseur 8086 d'Intel est à la base des processeurs actuels (core Intel). En effet, tous les microprocesseurs postérieurs au 8086 se sont construits petit à petit en ajoutant à chaque fois de nouvelles fonctionnalités (mémoire cache, coprocesseur, mémoire virtuelle, ...) et en augmentant la taille des bus de données, des bus d'adresses, la fréquence de l'horloge du microprocesseur et le jeu d'instructions, mais en conservant toutefois la compatibilité entre le processeur en cours de commercialisation et celui qui le précède. Ainsi, cette compatibilité (dite compatibilité ascendante) est assurée jusqu'au microprocesseur 8086. C'est pour cette raison qu'un programme écrit pour un 8086 fonctionnera correctement sur les nouveaux ordinateurs équipés des tout derniers microprocesseurs. Toutefois, l'opération inverse à savoir, un programme écrit pour un processeur postérieur au 8086 ne peut être exécuté par ce dernier.

#### D.5.1 Brochage et signaux externes du 8086 :

Le 8086 est un circuit intégré dans un boîtier DIL de 40 broches comme le montre la figure 2.11 :

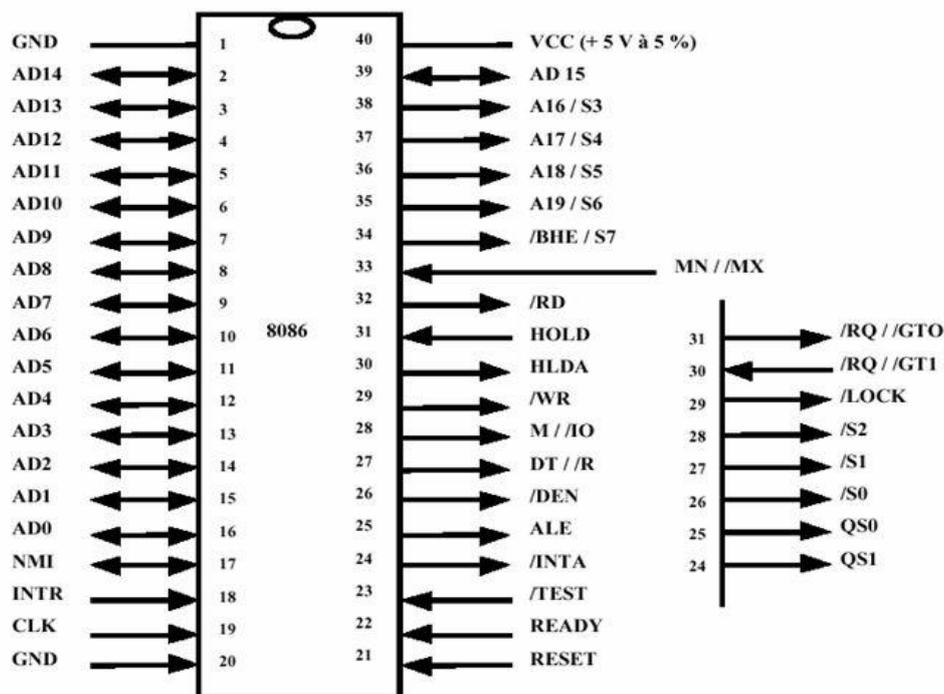


Figure 2.11 : Brochage et signaux externes du microprocesseur 8086 [9]

Le 8086 (développé en 1978 par la société Intel) est le premier microprocesseur de la famille x86. Il est équipé d'un bus de données de 16 bits et d'un bus d'adresses de 20 bits. Il est cadencé à des fréquences diverses selon plusieurs variantes : 5, 8 ou 10 MHz [9].

#### D.5.2 Architecture interne du 8086 :

Le microprocesseur est composé de deux unités internes distinctes : L'unité d'exécution (UE) et l'unité d'interfaçage avec le bus (UIB).

Le rôle de l'UIB est de récupérer les données et les instructions depuis les circuits mémoires externes pour les transmettre vers l'unité d'exécution. L'unité UIB assure donc l'interface physique entre le microprocesseur et le monde extérieur.

L'UE exécute les instructions qui lui sont transmises par l'UIB. On y trouve essentiellement l'unité de traitement arithmétique et logique (UAL) qui manipule des registres généraux de 16 bits [9].

Le schéma de la figure 3. 12 montre l'architecture interne du microprocesseur 8086. Précisons de suite que les processeurs actuels de la famille x86 traitent les informations de la même façon.

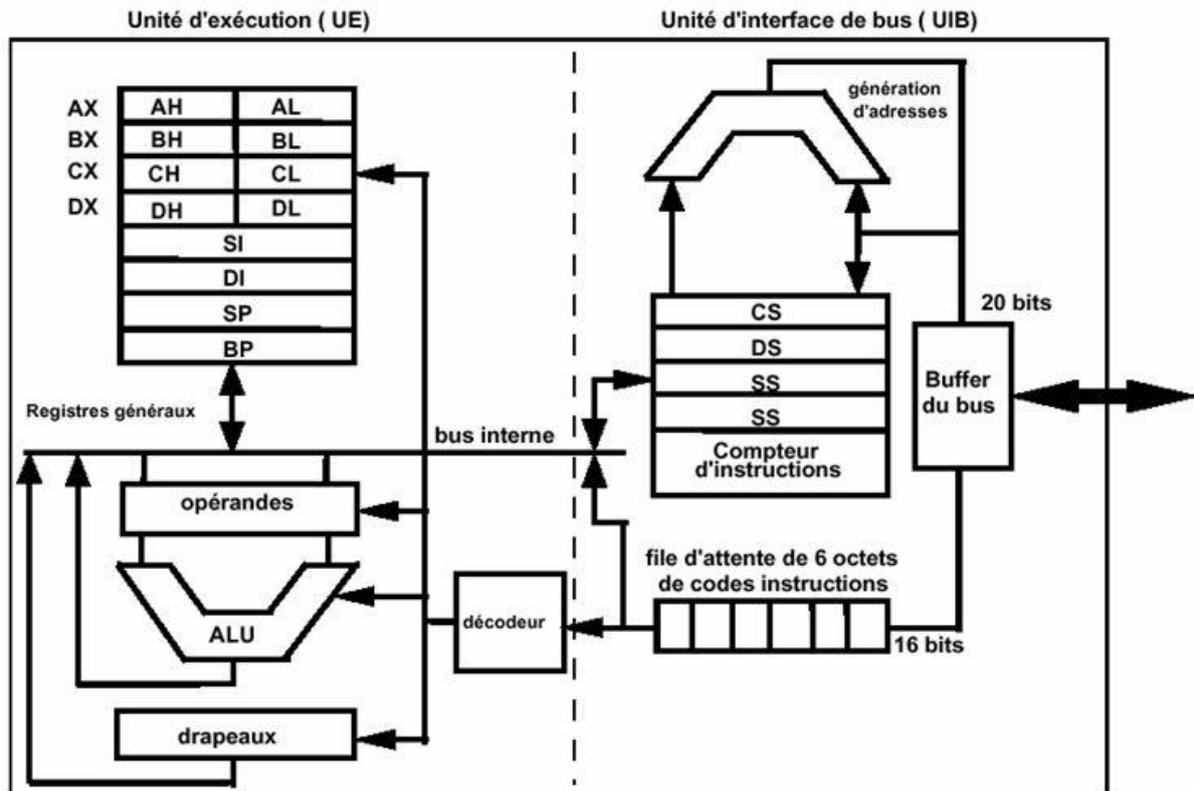


Figure 2.12 : Architecture interne du microprocesseur 8086 [9]

La figure 3.12 fait apparaître un schéma détaillé de l'architecture interne du 8086. On y retrouve essentiellement dans l'UE l'unité de calcul (UAL), quatre registres généraux AX, BX, CX et DX, deux registres d'index SI et DI, deux registres de base SP et BP ainsi que le registre d'état. De l'autre côté, la BIU comprend une unité de traitement pour le calcul des adresses, un registre pointeur d'instructions IP, quatre registres segments DS, CS, SS et ES et une pile de 6 octets (file d'attente).

Examinons, à présent, brièvement le traitement des instructions par l'UE et l'UIB. Avec le microprocesseur 8086, le traitement des instructions se déroule comme suit :

- Extraction d'une instruction par l'UIB et son dépôt dans la file d'attente.
- Envoi de l'instruction vers l'UE pour son exécution.

Pendant le moment où l'UE exécute cette instruction, les bus de données et d'adresses externes ainsi que la BIU restent inactifs. Pour remédier à cet aléa et diminuer, par la même

occasion, le temps d'attente global, les ingénieurs d'Intel ont mis au point le procédé de prétraitement appelé aussi le traitement en mode pipe-line.

Cela consiste à profiter de ce court instant, pendant lequel l'UE exécute une instruction, pour que l'unité UIB extraie de la mémoire externe autant d'instructions que se peut. La BIU arrête le chargement de la file d'attente lorsque la pile est saturée (6 octets au maximum) ou bien que l'UE sollicite l'accès aux bus externes pour terminer l'exécution de l'instruction en cours.

Les instructions (qui doivent être traitées mais qui ne le sont pas encore) sont placées dans la file d'attente. Lorsque l'UE a fini de traiter l'instruction en cours, l'UIB lui transmet instantanément l'instruction suivante et entame ensuite l'extraction d'une nouvelle instruction à partir de la mémoire de programme pour combler l'emplacement libéré dans la file d'attente. Au final, l'UE est continuellement en activité.

### D.5.3 Les registres internes du 8086 :

Il existe plusieurs types de registres. Certains d'entre eux sont utilisés pour des opérations d'ordre général et sont accessibles, à tout moment, au programmeur au moyen du jeu d'instructions. Nous disons alors qu'il s'agit de registres généraux. D'autres registres ont des rôles bien plus spécifiques et ne servent qu'à un usage spécialisé [9]. Nous allons dans ce qui suit rappeler brièvement les rôles remplis par ces différents registres.

#### D.5.3.1 Les registres généraux :

Les registres généraux sont utilisés pour y faire exécuter tout type d'opérations arithmétiques et logiques. Comme le montre la figure 2.13, chacun de ces registres peut être scindé en deux registres distincts de 8 bits chacun [9].

	15	8 7	0
AX	AH		AL
BX	BH		BL
CX	CH		CL
DX	DH		DL

Figure 2.13 : Les registres à usage général

Le registre AX (accumulateur) : Est le registre qui est le siège à toutes les opérations arithmétiques et logiques. En outre, les opérations de traitement des chaînes de caractères se font dans ce registre, de même que les conversions en BCD du résultat d'une opération arithmétique (addition, soustraction, multiplication et la division).

Le registre BX (registre de base) : Est utilisé pour l'adressage des données situées dans une zone mémoire différente de la zone du programme.

Le registre CX (compteur) : Lors de l'exécution d'une boucle, on a souvent recours à un compteur de boucles pour compter le nombre des itérations. Le registre CX est généralement utilisé à cet effet. A noter, par ailleurs, que le registre CL sert exclusivement en tant que compteur du nombre de décalages et de rotations dans les instructions de décalage et de rotation.

Le registre DX : Est principalement utilisé pour l'extension à 32 bits des registres du 8086 afin de contenir soit le dividende soit les résultats des multiplications dans les instructions de

division ou de multiplication respectivement. En outre, le registre DX est prévu pour contenir le numéro d'un port d'entrée/sortie lors de l'adressage des interfaces d'E/S

### D.5.3.2 Les registres de base et d'index :

Ces registres sont plus spécialement adaptés au traitement des informations dans la mémoire. Ils sont en général munis de propriétés d'incrémentement et de décrémentement [9].

	15	0
Stack pointer	SP	
Base pointer	BP	
Source index	SI	
Destination index	DI	

**Figure 2.14 :** Les registres de base et d'index

Le Pointeur de pile (Stack Pointer SP) : Ce registre permet de pointer la pile afin d'y sauver des données ou des adresses selon le principe du "Dernier en Entrée Premier en Sortie" ou encore "LIFO" (Last In First Out) en anglais.

Le registre d'index SI (Source Index) : Permet de pointer une cellule mémoire. Il contient en général un décalage (offset) par rapport à une adresse de base fixe (contenue dans le registre DS). Il est également employé dans les instructions de chaîne de caractères. En effet, il est utilisé pour pointer le caractère de la chaîne "source".

Le registre d'index DI (Destination index) : Est un registre identique au registre SI à la différence près qu'il est exclusivement associé au registre ES pour pointer un caractère de la chaîne "destination" dans les instructions de chaîne de caractères.

Les pointeurs SP et BP (Stack Pointer et Base Pointer) : Pointent sur la zone pile. Ils sont combinés avec le registre SS pour calculer l'adresse effective dans la zone mémoire de la pile.

### D.5.3.3 Les registres segment :

Au nombre de quatre, le registre CS (Code Segment), le registre DS (Data Segment), le registre ES (Extra Segment) et le registre SS (Stack Segment) sont des registres de 16 bits chacun, figure 2.15. Ces registres sont chargés de pointer séparément le début de quatre zones mémoires distinctes (segments de mémoire) de 64 ko chacune appelées à contenir respectivement le programme, les données du programme, d'autres données supplémentaires et enfin les données de la pile.

	15	0
Code segment	CS	
Data segment	DS	
Stack segment	SS	
Extra segment	ES	

**Figure 2.15 :** Les registres de segment

Le registre CS (Code Segment) : Pointe le segment qui contient les codes des instructions du programme en cours. Si la taille du programme dépasse les 65 535 octets alors on peut partager le programme sur plusieurs segments (chacun ne dépassant pas les 64 ko). Ensuite, pour basculer d'une partie d'un programme à une autre, il suffit de changer la valeur du registre CS. De cette manière, on résout le problème des programmes très longs.

Le registre DS (Data Segment) : Pointe le début de la zone segment contenant les variables du programme. Bien entendu, si la taille des données dépasse 65 535 octets, on utilise le même artefact cité précédemment avec le changement, dans ce cas, de la valeur de DS.

Le registre ES (Extra Segment) : Est un registre des données supplémentaires. Il est utilisé par le microprocesseur lorsque l'accès aux autres registres est devenu difficile ou impossible pour modifier des données. De même, ce segment est utilisé pour le stockage des chaînes de caractères.

Le segment SS (Stack Segment) : Pointe le début de la zone segment contenant les données de la pile. La pile est une zone mémoire où l'on peut sauvegarder les contenus (adresses ou données) des divers registres du 8086 pour pouvoir ensuite les récupérer à la fin de l'exécution d'un sous-programme (Procédure) ou d'un programme d'interruption. En général, il est conseillé de ne pas modifier le contenu de ce registre car on risque alors de perdre des informations très importantes concernant l'historique du microprocesseur (et relatif au passage d'arguments entre le programme principal et le sous-programme).

#### D.5.3.4 Le registre Instruction Pointer IP :

Le registre Instruction Pointer IP (appelé aussi Compteur de Programme) est un registre à 16 bits, figure 3.16. Il contient l'adresse de l'emplacement mémoire où se situe la prochaine instruction à exécuter. Le registre IP est constamment modifié après l'exécution d'une instruction afin qu'il pointe l'instruction suivante [9].

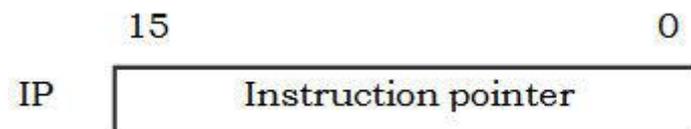


Figure 2.16 : Le registre Pointeur d'instruction

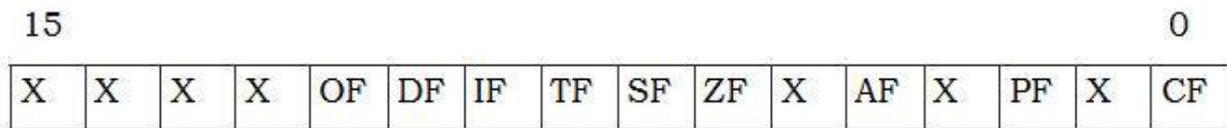
#### D.5.3.5 Le registre d'état (Flag register) :

Le registre d'état (registre à 16 bits) sert à contenir l'état de certaines opérations effectuées par le processeur. Par exemple, quand le résultat d'une opération est trop grand pour être contenu dans le registre destination (celui qui doit contenir le résultat de l'opération), un bit spécifique du registre d'état (appelé le bit CF) est mis à 1 pour indiquer ce dépassement [9].



Figure 2.17 : Le registre d'état

Le registre d'état du microprocesseur 8086 contient neuf bits d'état différents. L'octet faible du registre d'état contient les cinq bits d'état du microprocesseur 8085 (le prédécesseur du 8086) auxquels les ingénieurs d'Intel ont rajouté quatre nouveaux bits d'état. La figure 2.18 présente les bits d'état du 8086 :



**Figure 2.18** : Les bits d'état du registre d'état du 8086

CF (Carry Flag) : Indicateur de dépassement de la capacité du registre.

PF (Parity Flag) : Indicateur du nombre de bits égal à 1.

AF (Auxiliary Carry) : Indicateur d'un dépassement du bit 3 vers le bit 4.

ZF (Zero Flag) : Indicateur d'un contenu nul.

SF (Sign Flag) : Indicateur du signe du résultat.

TF (Trap Flag) : Bit d'état permettant au microprocesseur d'exécuter un programme en mode pas à pas.

IF (Interrupt Flag) : Bit d'état utilisé pour masquer une demande interruption ou bien l'autoriser.

DF (Direction Flag) : Incrémentation/Décrémentation du pointeur utilisé pour pointer la position d'un caractère d'une chaîne de caractères.

OF (Overflow Flag) : Indicateur d'un débordement sur le bit signe.

X : bit non utilisé (non significatif).

## D.6. Système à microprocesseur :

### D.6.1 Introduction :

Le microprocesseur tout seul ne peut pas faire grand-chose ; il a besoin de circuits connexes pour être opérationnel et utile. Outre le microprocesseur, un système à microprocesseur comprend également des circuits mémoires et des circuits d'entrées-sorties. A ces circuits intégrés semi-conducteurs, il faut ajouter des périphériques d'entrées (tels qu'un clavier, des interrupteurs et des capteurs analogiques ou numériques) et des périphériques de sorties (tels qu'un afficheur, des diodes LED ou bien même ... une soupape commandée par une tension). L'ensemble de tous ces circuits est appelé un système à microprocesseur.

Il faut préciser que les périphériques d'entrées et les périphériques de sorties sont aussi divers et innombrables que le sont les applications électroniques que l'on souhaite commander à l'aide d'un système programmable. D'où l'intérêt énormes des systèmes à microprocesseur. Aussi, avons-nous besoin de circuits d'entrées-sorties spécialisés afin d'assurer l'interfaçage entre le microprocesseur d'une part, et les différents périphériques dans toute leur diversité, d'autre part.

Les circuits d'entrées-sorties peuvent être spécialisés comme le contrôleur d'écran MC 6845, le contrôleur de disquettes  $\mu$ PD 765, ... ; ils peuvent être également à usage général comme l'interface parallèle programmable 8255, l'interface série asynchrone 8251, le contrôleur programmable d'interruptions 8259, le timer programmable 8253, ...

Ce dernier type de circuits d'E/S, qui sont à usage général, peuvent être utilisés dans des domaines aussi divers que le transport, l'agriculture, la surveillance, ..., etc. A ce propos,

nous allons passer brièvement en revue quelques-uns de ces circuits d'entrées-sorties à usage général et que nous rencontrons souvent dans les systèmes à commande programmée [7].

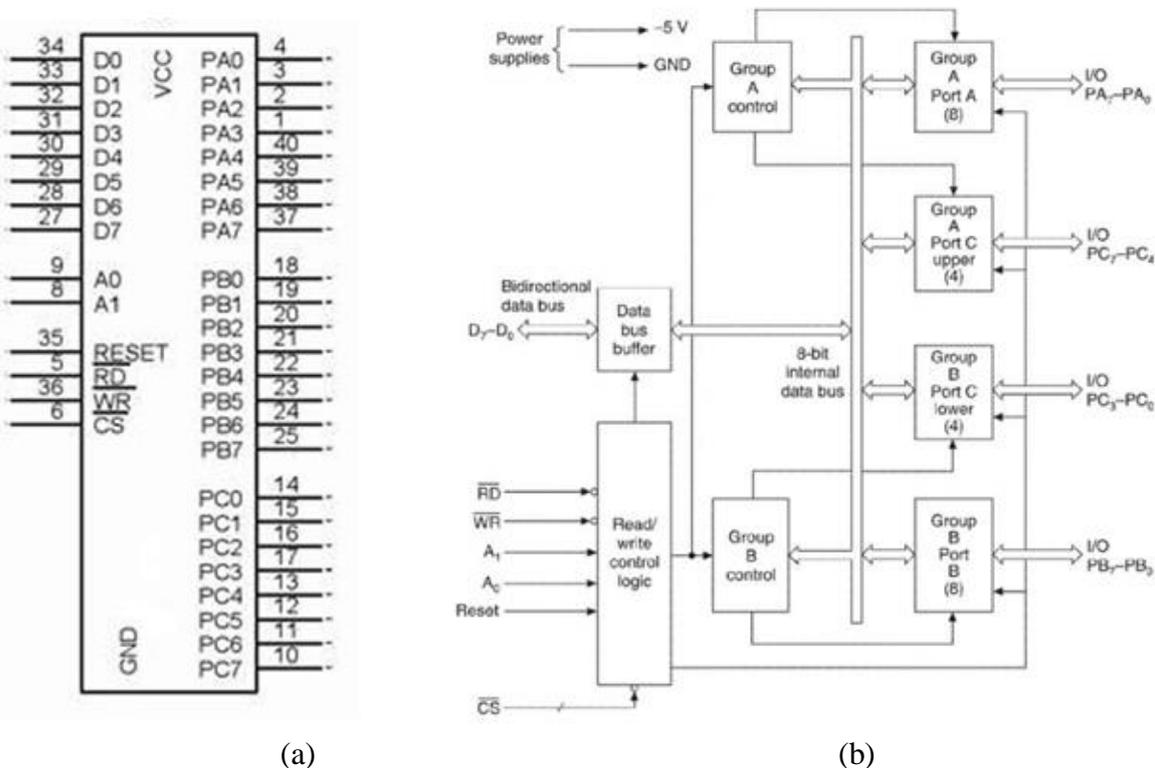
## D.6.2 Interface parallèle programmable 8255 :

### D.6.2.1 Présentation du circuit 8255 :

Appelé Périphérique Programmable Interface (PPI) en anglais. Comme son nom le suggère, ce circuit est programmable et permet d'interfacer divers types de périphériques avec le microprocesseur. La figure 2.19 (a) présente le brochage du circuit de l'interface parallèle 8255. C'est un circuit intégré à 40 broches dans un boîtier DIL en double rangées. Nous y trouvons :

- 24 lignes (PA<sub>0</sub>-PA<sub>7</sub> ; PB<sub>0</sub>-PB<sub>7</sub> et PC<sub>0</sub>-PC<sub>7</sub>) programmables soit en entrée soit en sortie.
- 8 lignes D<sub>0</sub>-D<sub>7</sub> du bus de données qui relie le 8255 au microprocesseur.
- RD, WR : Les signaux de commande de lecture et d'écriture dans les registres internes du 8255. Ils sont actifs au niveau bas.
- CS : Broche active au niveau bas, elle permet la sélection du boîtier 8255.
- A<sub>0</sub>-A<sub>1</sub> : Permettent la sélection de l'un des quatre registres internes du 8255.

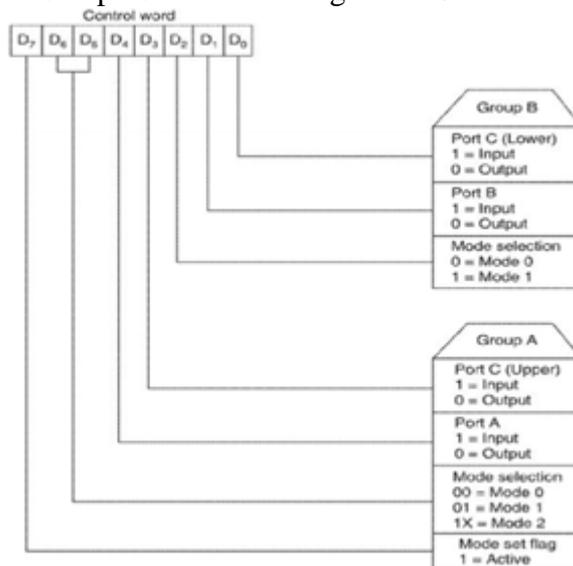
La figure 2.19 (b) montre le schéma interne du 8255. On retrouve sur la partie droite de ce schéma les 24 broches d'E/S (I/O en anglais) réparties sur trois ports: Port A, Port B et Port C de 8 bits chacun. Les 8 lignes du port A et du port B sont simultanément programmables soit en entrée soit en sortie. Tandis que le port C est scindé en deux parties : Le port C supérieur et le port C inférieur. Chacun de ces deux demi-ports sont programmables individuellement en entrée ou en sortie.



**Figure 2.19 :** Le circuit d'interface parallèle 8255A : (a) Brochage (b) Schéma fonctionnel [7]

Le 8255 dispose d'un quatrième registre interne (qui n'apparaît pas sur ce schéma) qui est relié à la logique électronique présente dans la partie gauche de ce schéma. Ce dernier registre, appelé registre de commande, est destiné à la programmation et à la configuration

des divers ports du 8255 soit en entrée soit en sortie. C'est à travers ce registre de contrôle que s'effectue le "dialogue" entre le microprocesseur et le circuit 8255 au moyen d'un mot de commande dont le format est représenté dans la figure 2.20.



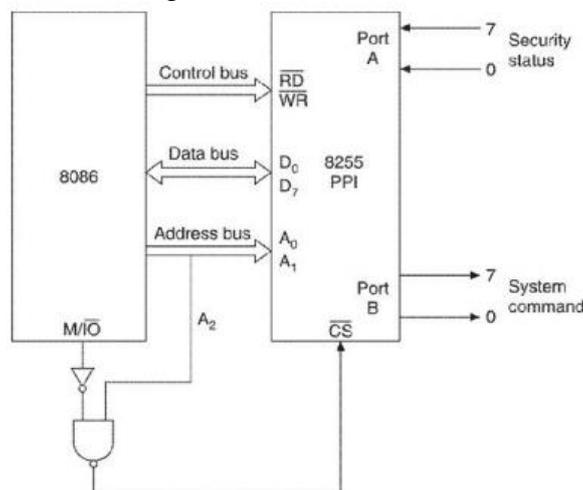
**Figure 2.20 :** Format du mot de contrôle du 8255 PPI [7]

Certains périphériques d'entrée-sortie nécessitent un mécanisme spécifique pour le transfert de données, (appelé protocole "handshaking" qui est un dialogue "balisé" dans lequel le microprocesseur et le circuit 8255 s'échangent des signaux de contrôle appropriés), qui génère une demande d'interruption à l'issue de ce protocole.

Il existe trois modes de fonctionnement (de programmation) pour les ports du 8255. Le premier mode (mode 0) est un mode de base dans lequel le microprocesseur récupère une donnée située dans un port relié à un périphérique d'entrée (ou transfère une donnée vers un port de sortie) de manière asynchrone. En clair, le microprocesseur lit ou écrit dans un périphérique à son propre rythme. Les deuxième et troisième modes (mode 1 et mode 2) utilisent le protocole handshaking [7, 10].

#### D.6.2.2 Interfaçage du 8255 :

Lorsqu'on souhaite commander un périphérique nécessitant des ports d'un seul octet ; dans ce cas, un seul boîtier Intel 8255 sera alors requis et son interfaçage avec le microprocesseur (en mode minimum) est illustré dans la figure 2.21.



**Figure 2.21 :** Interfaçage entre le 8086 (en mode minimum) et un seul boîtier 8255 [7]

Le périphérique de sortie que l'on veut contrôler est connecté au port B tandis que le port A reçoit les consignes nécessaires à son contrôle. Un seul octet ( $AD_0-AD_7$  ou bien  $AD_8-AD_{15}$ ) est suffisant pour gérer ce montage.

Dans le cas où l'on souhaite commander des périphériques nécessitant des données de 16 bits, l'emploi de deux boîtiers Intel 8255 devient alors nécessaire et c'est tout le bus de données de 16 bits du microprocesseur 8086 qui sera utilisé. La figure 2.22 montre un exemple de cet interfaçage.

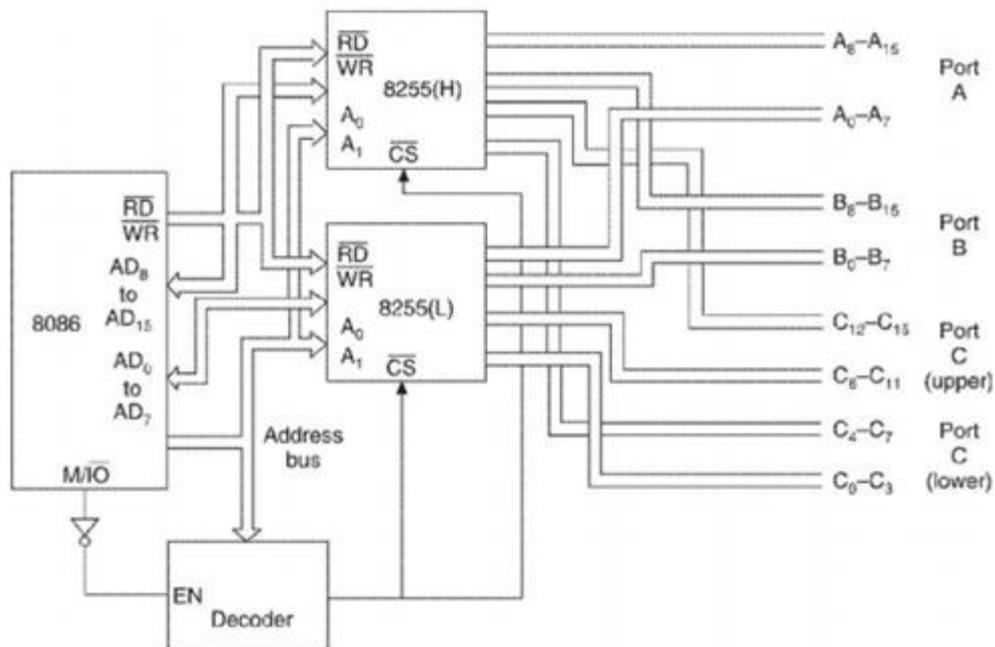


Figure 2.22 : Interfaçage entre le 8086 (en mode minimum) avec deux boîtiers 8255 [7]

Le bus de données du 8086 est scindé en deux groupes de 8 bits ( $AD_0-AD_7$  et  $AD_8-AD_{15}$ ). Chacun étant relié à un circuit 8255. Le décodeur d'adresses génère, quant à lui, le signal de sélection permettant d'activer simultanément les deux circuits 8255. En même temps, les lignes  $A_0$  et  $A_1$  du bus d'adresses du microprocesseur sont destinées à choisir un registre parmi les quatre registres internes de chaque circuit 8255.

### D.6.3 Circuit de temporisation programmable 8253/8254 :

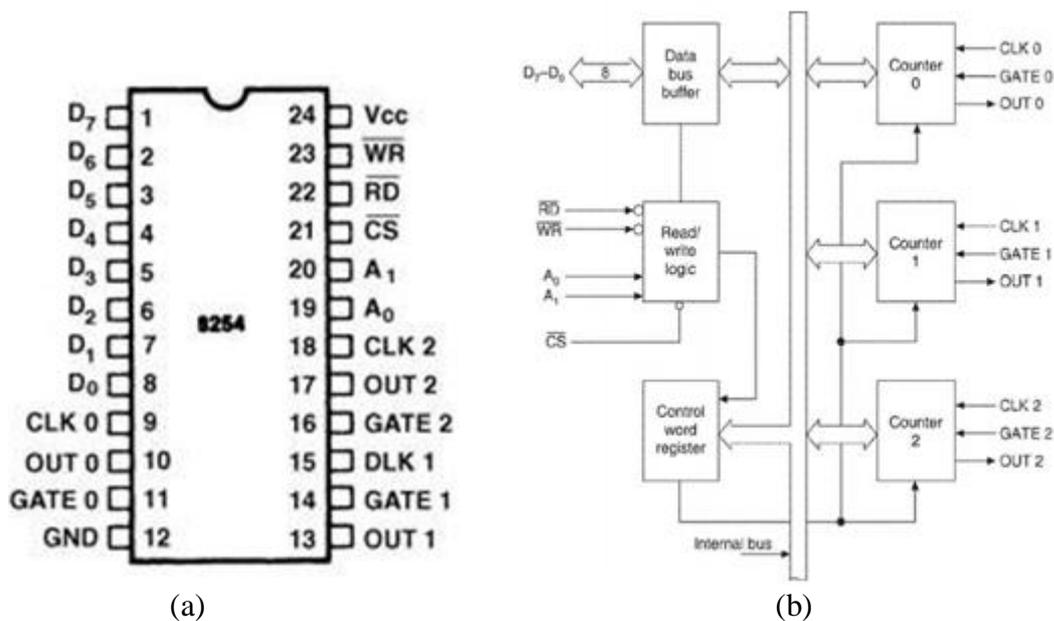
#### D.6.3.1 Présentation du circuit 8253/8254 :

L'une des exigences les plus courantes dans tout système micro-programmé est le besoin de génération de temporisations précises. A titre d'exemple, le processeur attend environ 5 ms (suite à l'appui sur une touche du clavier) avant de prendre en compte cette action en vue de s'assurer qu'il ne s'agit pas d'une fausse information (perturbations provoquées par des parasites quelconques).

Il est bien entendu possible de générer ce type de délais à l'aide d'un programme. Pour ce faire, l'approche logicielle la plus courante consiste à décrémenter le contenu d'un registre, préalablement initialisé à une valeur précise, jusqu'à ce qu'il devienne nul. La donnée d'initialisation dépend de la durée de la temporisation souhaitée. Néanmoins, cette solution n'est retenue que pour les petits systèmes qui n'exigent pas du microprocesseur des temps de calcul énormes qui risqueraient, sinon, de le saturer inutilement, voire de le faire planter !

A cet égard, les ingénieurs d'Intel ont mis au point des circuits pour générer des temporisations. Il s'agit, entre autres, des circuits 8253 et 8254. Ces deux circuits sont quasiment identiques hormis quelques différences dans leurs caractéristiques technologiques. La caractéristique la plus transcendante étant que le Timer 8253 est cadencé à une fréquence maximale de 2,6 MHz tandis que le 8254 est cadencé à une fréquence pouvant atteindre 10 MHz. La figure 2.23 (a) présente le brochage du circuit de temporisation 8254.

Ces deux circuits sont essentiellement des générateurs d'intervalles de temps programmables. A ce titre, le 8253/8254 dispose de trois compteurs programmables de 16 bits chacun, intégrés dans la même puce. Le schéma fonctionnel du 8253/8254 est illustré dans la figure 2.23 (b).



**Figure 2.23 :** Le circuit 8253/8254 (a) Brochage (b) Schéma fonctionnel [7]

Chaque compteur peut fonctionner soit en binaire soit en BCD et dispose de deux entrées (une entrée horloge CLK et une entrée de validation GATE) d'une part et une sortie (signal OUT) d'autre part. La fréquence d'horloge ne doit pas dépasser 2,6 MHz. L'entrée GATE est utilisée pour activer ou désactiver le comptage. A la fin du décomptage, la sortie OUT passe à l'état haut (ce signal est utilisé pour générer une demande d'interruption en direction du microprocesseur).

Le 8253/8254 présente six modes de fonctionnements distincts :

- Mode 0 : Envoi d'une demande d'interruption en fin de comptage.
- Mode 1 : Mode monostable (génération d'une impulsion unique).
- Mode 2 : Générateur de rythme (signal rectangulaire avec rapport cyclique variable).
- Mode 3 : Générateur d'un signal carré (signal d'horloge).
- Mode 4 : Déclenchement logiciel (par programme).
- Mode 5 : Déclenchement matériel.

#### D.6.3.2 Interfaçage du 8253/8254 :

Le circuit 8253 s'interface avec le microprocesseur 8086 en mode minimum comme cela est montré dans la figure 3.24. Le bus de données D<sub>0</sub>–D<sub>7</sub> du 8253 peut être relié soit à l'octet

faible du bus de données du microprocesseur AD<sub>0</sub>–AD<sub>7</sub> (comme cela est montré sur cette figure) soit à l'octet fort AD<sub>8</sub> –AD<sub>15</sub> [7].

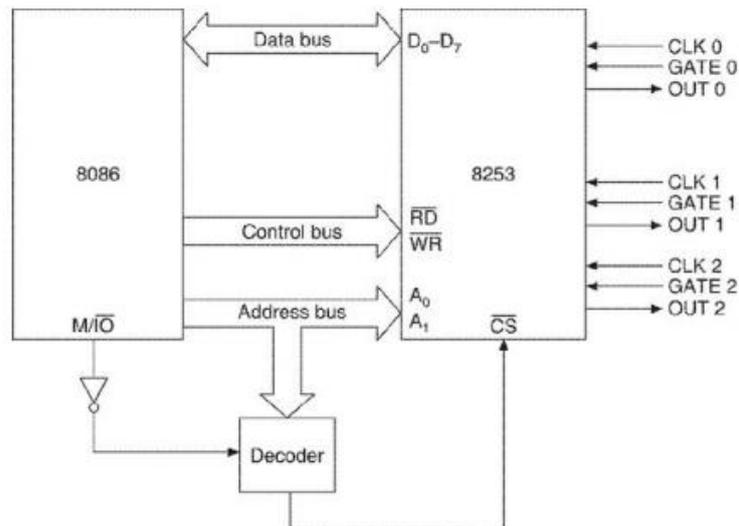


Figure 2.24 : Interfaçage du 8086 avec le 8253/8254 [7]

#### D.6.4 Exemple d'une application pilotée par un système à microprocesseur :

A titre d'illustration, nous présentons dans la figure 2.25 le schéma d'un montage, monté autour d'un système à microprocesseur, destiné à la supervision de la vente des billets pour le transport ferroviaire.

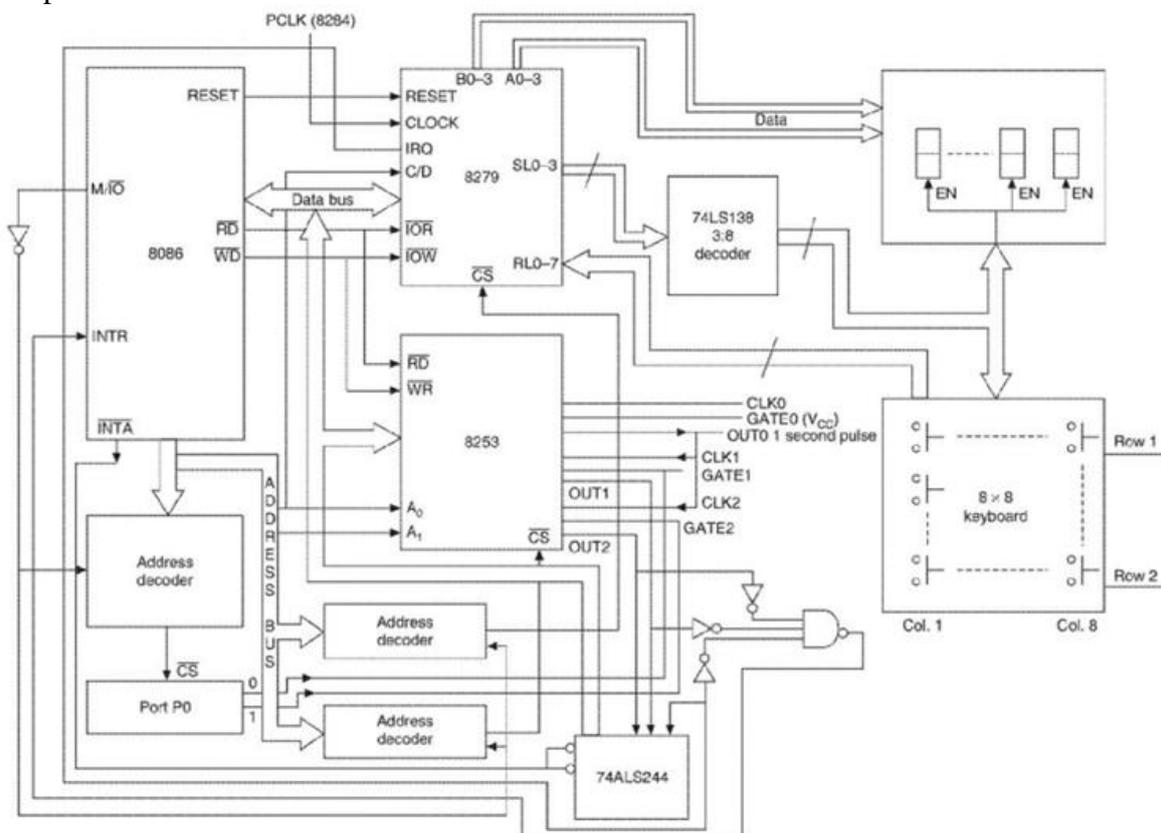


Figure 2.25 : Circuit électronique d'un compteur automatique de billets (à base d'un microprocesseur 8086 associé aux circuits 8253 et 8279) utilisé dans une station de train [7]

**Liste des références bibliographiques :**

- [1] Georges Asch et coll. ; Les capteurs en instrumentation industrielle ; 7 édition ; Dunod ; Paris ; 2006 - 2010 (p271).
- [2] <http://www.connexe.univ-brest.fr/lpo/instrumentation/05.htm> ; [En Ligne]; consulté le 26 juin 2020
- [3] Ounadjela Nadia et Mouffok Rafika ; Conception et réalisation d'un thermomètre et d'un régulateur de température (thermostat) ; Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en Physique ; Université Abou-bakr Belkaid ; Tlemcen.
- [4] Alaa-Eddine Bordjiba ; Conception et réalisation d'un régulateur PID numérique de température avec Arduino ; Master instrumentation ; Université 8 mai 45 Guelma ; Algérie ; juillet 2019.
- [5] Aous Walid & Seddaoui Ghiles ; Conception et réalisation d'un régulateur PID numérique à base d'un microcontrôleur PIC 16f877A ; Master Electronique Industrielle, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou ; Algérie ; 2014.
- [6] Digital PID Control <https://web.calpoly.edu/~fowen/me422/Chapter10.pdf> [En Ligne] ; consulté le 26 juin 2020.
- [7] Kirshan Kant. Microprocessors and Microcontrollers: Architecture, Programming and System Design 8085, 8086, 8051, 8096. Jaypee Institute of Information Technology noida: Kindl edition, 2012, 748p
- [8] Introduction sur les systèmes à base de microprocesseur [en ligne] <https://www.technologuepro.com/microprocesseur/introduction-systemes-base-microprocesseur.htm> ; consulté le 26 avril 2020
- [9] Le microprocesseur 8086 / 8088 [en ligne] <https://www.technologuepro.com/microprocesseur/microprocesseur-8086-8088.htm> ; consulté le 26 avril 2020
- [10] Interval Timer 8253-5 Datasheet <https://datasheetspdf.com/pdf/904022/IntelCorporation/8253-5/9> ; [En Ligne] ; consulté le 31 juillet 2020

## Chapitre 3 : Conception et Réalisations pratiques

### 3.1 Le cheminement des pensées dans la conception d'un projet :

Un projet peut être défini comme étant un système qui réalise une fonction donnée. En fonction des informations (appelées les entrées) qu'il reçoit, le système fournit les résultats (appelées les sorties) escomptés. Les entrées et les sorties sont appelées l'environnement du système. Ce système peut être lui-même divisé en un ensemble de systèmes interconnectés. Chacun de ces sous-systèmes réalisant une fonction propre. A noter que le projet-système, considéré au départ, peut lui-même fonctionner comme un sous-système d'un système encore plus vaste.

Lorsqu'on commence l'étude d'un projet, le concepteur doit définir les fonctions qui doivent être exécutées par les différentes parties du système. Dans le cas d'un projet qui nécessite une programmation, le concepteur doit alors évaluer l'apport coût/rendement de la partie matérielle et celui de la partie logicielle. En effet, la sélection d'une configuration matérielle particulière peut fortement influencer la conception du logiciel. Bien que l'adoption de logiciels en lieu et place du matériel réduise certainement le coût du système, la structure cohérente du matériel ne doit pas être compromise.

A ce propos, la mise en œuvre de fonctions matérielles simples peut souvent aider considérablement dans la réduction de la complexité du logiciel. Il y a certains seuils au-delà duquel le développement de logiciels devient très complexe et coûteux. A titre d'exemple, si le logiciel augmente légèrement de plus de 1 kilo-octet ou si le nombre de lignes d'E/S impliquées dans la fonction à réaliser dépasse celles qui sont disponibles sur la carte, dans ces conditions, une puce mémoire complète et/ou un circuit d'E/S supplémentaires doivent être rajoutés, conduisant ainsi à l'augmentation du coût global du matériel [1].

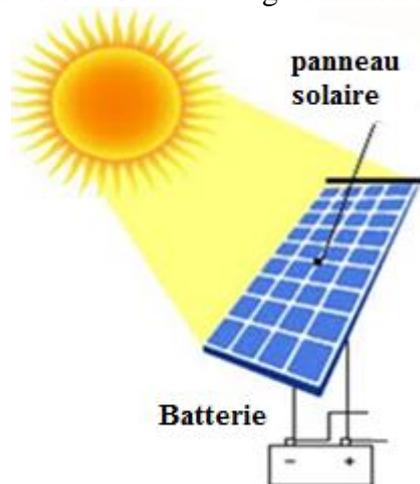
Du reste, il faut savoir que le recours à d'autres circuits intégrés connexes et spécifiques demeure incontournable et nécessaire. Vouloir, par exemple, commander numériquement un processus quelconque nécessite l'utilisation de ces circuits. En effet, un système programmé utilise des valeurs binaires ; mais dans le monde physique, tout est analogique. La température, la pression, l'humidité et la vitesse sont quelques exemples de grandeurs physiques avec lesquelles nous traitons tous les jours et que nous souhaiterions contrôler. En conséquence, le système de commande numérique impliquerait son interfaçage, d'une part, avec des circuits de conversion analogique/numérique pour l'acquisition des données et d'autre part, avec des circuits de conversion numérique/analogique pour le transfert des ordres de commande vers le processus.

Dans ce chapitre, nous décrivons les différentes étapes de conception que nous avons suivies dans le but de réaliser un système de contrôle de température des panneaux solaires, à savoir : l'étude de la problématique, la proposition d'une solution matérielle et logicielle, le choix des composants les mieux adaptés (qui a été placé en annexe pour ne pas trop alourdir ce chapitre), et nous terminerons finalement ce chapitre avec les résultats des tests de simulation.

### 3.2 Problématique du projet :

Le panneau solaire, comme nous le savons tous, récupère une partie du rayonnement du soleil auquel il est exposé et le convertit ensuite en énergie électrique grâce au phénomène photovoltaïque. Outre l'électricité produite, cette conversion d'énergie est malheureusement

accompagnée d'une production (en pure perte) d'une chaleur qui est propagée dans la structure engendrant par la même occasion une augmentation de la température des panneaux.



**Figure 3.1** : Equipements pour la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique

Si nous considérons la fiche technique d'un panneau solaire commercial [2] (voir la fiche technique en annexe), nous constaterons que le panneau solaire délivre une puissance maximale de 315 W/h dans les conditions STC (Standard Test Conditions) à savoir un éclairement de  $1000\text{W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$  (pour de plus amples informations, voir § 5.4.4.6). En termes plus clair, le constructeur assure que son panneau solaire est efficace pour produire 315 W/h lorsque la température du panneau solaire est de  $25^\circ\text{C}$ . Mais qu'advient-il à cette puissance lorsque la température de ces panneaux s'élève à des valeurs plus importantes. Cette situation, rappelons-le, est la réalité quotidienne vécue par ces équipements !

Là encore, la fiche technique qui accompagne le kit solaire révèle que la puissance fournie diminue d'une quantité de  $-0,43\%$  pour toute élévation de la température de  $1^\circ\text{C}$ , ce qui correspond à une perte de  $1,35\text{ W/h}$ . Dans ces conditions, si nous considérons que la température des panneaux monte jusqu'à  $75^\circ\text{C}$  (cette valeur est très réaliste, compte tenu du fait que la structure qui supporte les panneaux est métallique), la perte de puissance s'élèverait alors à  $67,73\text{ W/h}$ , ce qui correspond à  $21,5\%$  de la puissance totale fournie. Cette quantité est loin d'être négligeable. Elle représente plus du cinquième de la puissance utile garantie par le constructeur des panneaux (à la température de  $25^\circ\text{C}$  !).

Ce calcul simple nous révèle combien il est crucial de concevoir un système de refroidissement qui doit maintenir la température des cellules photovoltaïques dans la gamme de  $20$  à  $25^\circ\text{C}$  afin de tirer, au maximum, profit de la conversion photovoltaïque.

### **3.3 Système de refroidissement des panneaux solaires :**

Le refroidissement des panneaux solaires est une étape d'une grande importance parmi les différentes étapes de la conception d'un système solaire [3]. En effet, ce procédé a l'aptitude de réduire le coût global de l'énergie solaire de deux manières :

Premièrement, le refroidissement peut améliorer la production électrique des panneaux solaires (augmentation du rendement de la production).

Deuxièmement, la chaleur évacuée par le système de refroidissement peut être récupérée et réutilisée pour un autre usage domestique ou industriel.

### 3.4 Description du projet :

L'objectif principal de ce projet est de développer un système de réduction de la température pour des panneaux solaires en vue d'atteindre une efficacité photovoltaïque élevée et une durée de vie accrue pour les panneaux par leur maintien à une température plus basse.

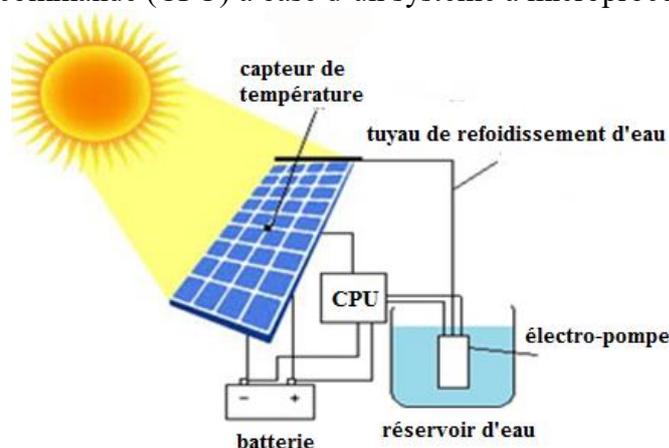
Pour ce faire, un capteur de température, placé à la surface d'un panneau, permet de recueillir la température des cellules photovoltaïques et transmet ensuite ce signal au microprocesseur afin que celui-ci procède aux divers traitements nécessaires [3, 4].

Néanmoins, la mesure de cette température étant de type analogique, nous avons besoin d'un circuit de conversion analogique-numérique CAN afin de présenter cette mesure dans un format de données compréhensible pour le microprocesseur. D'autre part, ce dernier n'étant pas uniquement sensé surveiller ce processus, il est constamment entrain de contrôler d'autres processus (des dizaines d'autres panneaux solaires, par exemple, parce que la conversion photovoltaïque sollicite dans certaines applications des centaines de panneaux, voire des milliers pour générer une quantité d'énergie électrique suffisante), nous avons besoin d'un circuit d'entrées-sorties parallèles qui nous permettrait de gérer efficacement de nombreux périphériques.

Une fois le traitement du microprocesseur achevé, à savoir, l'évaluation de la valeur de la température et sa comparaison avec les températures-seuils consignées dans le programme, ce dernier doit alors décider s'il y a lieu de faire appel au système de refroidissement, auquel cas, le microprocesseur enverra alors un signal à une électrovanne afin de mettre en marche le refroidissement des panneaux. Là aussi, nous avons également besoin de l'interface d'entrées-sorties parallèles afin de relier le microprocesseur avec un relais pour commander cette électrovanne.

La figure 3.2 récapitule une représentation d'un montage type du système de conversion photovoltaïque. En résumé, pour construire ce montage, il nous faut :

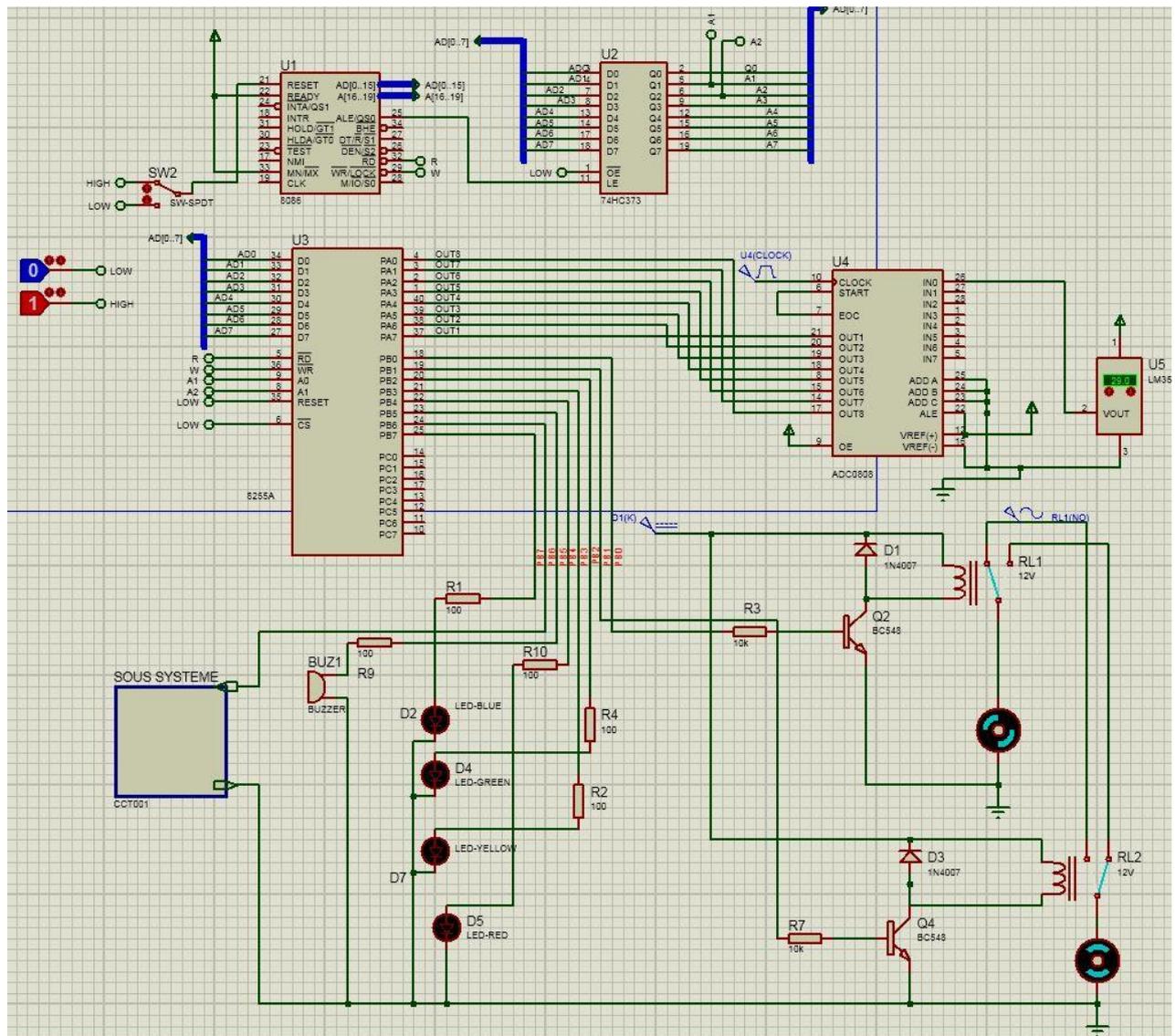
- un panneau solaire,
- un capteur de température,
- un réservoir d'eau,
- des tuyaux de refroidissement d'eau,
- une électrovanne (de commande de l'électropompe),
- un circuit de puissance pour la commande de l'électropompe et
- une unité de commande (CPU) à base d'un système à microprocesseur.



**Figure 3.2 :** Montage expérimental type d'un système de conversion photovoltaïque



Finalement, la figure 3.4 montre le schéma électronique complet que nous avons, par ailleurs, utilisé lors de la simulation pour vérifier le bon fonctionnement de ce montage.



**Figure 3.4 :** Schéma électronique complet du circuit de contrôle et de régulation de la température des panneaux solaires

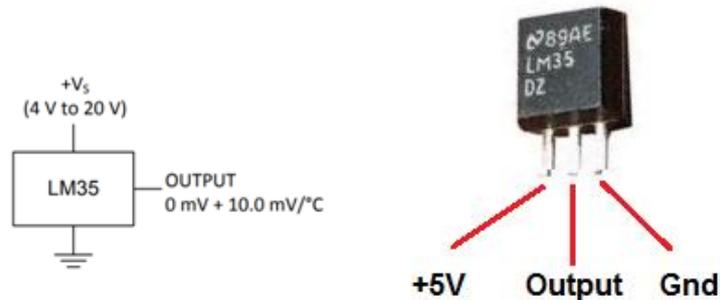
### 3.5 Description détaillée du montage électronique :

Le schéma électronique complet du montage de conversion photovoltaïque est composé de plusieurs fonctions électroniques distinctes et complémentaires. En premier lieu, il y a le circuit d'acquisition et de lecture de la température. Ce signal, qui est de type analogique, est ensuite transformé en un signal numérique figure 3.5. Ce dernier est alors récupéré par l'interface d'E/S parallèle, figure 3.6. Après coup, il est réorienté vers le circuit de verrouillage, où il est réservé jusqu'à sa prise en compte par le microprocesseur, figures 3.7 et 3.8. Là, le microprocesseur compare cette valeur avec les valeurs de consigne, qui ont été préalablement préprogrammées, et envoie un signal de commande au circuit de contrôle des électropompes afin de refroidir, si nécessaire, le panneau solaire figures 3.9 et 3.10.

### 3.5.1 Connexion du capteur de température LM35 avec le CAN

Afin de mesurer la température, nous avons fait appel à un capteur de température très populaire, le LM35, qui produit une tension qui varie en fonction de la température. Ainsi, il fournit 0 V pour 0°C, 250 mV pour 25 °C, et un maximum de 1 volt pour 100 °C. Pour simplifier, sa tension de sortie  $V_{out}$  augmente de 10 mV chaque fois que la température augmente de 1°C [5, 6].

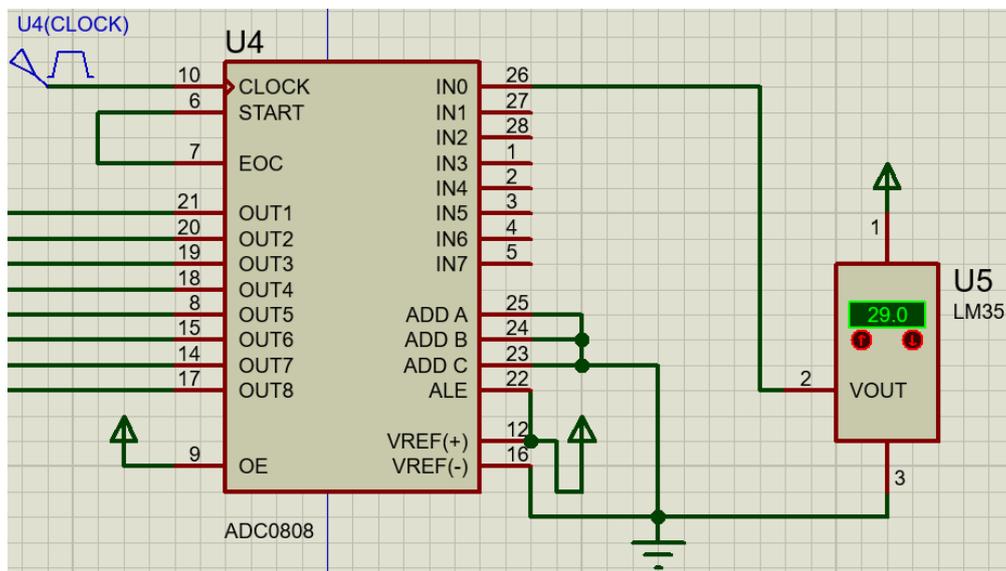
Il se présente sous forme d'un composant à trois broches : deux broches pour l'alimentation ( $V_s$  et GND) et une broche de sortie  $V_{out}$  (Output), figure 3.5.



**Figure 3.5 :** Brochage et aspect externe du capteur de température LM35

La valeur mesurée par le capteur étant de type analogique, nous utilisons un convertisseur analogique-numérique ADC 0808 pour mettre le signal mesuré dans un format numérique adéquat pour le microprocesseur.

Ainsi à la sortie du CAN (OUT1-OUT7), nous obtenons une valeur binaire sur 8 bits équivalente à l'amplitude du signal analogique injecté sur l'entrée IN0, figure 3.6. Notons que le circuit CAN dispose, en tout, de huit entrées analogiques distinctes dont la sélection est assurée par trois broches d'adresses ADD A, ADD B et ADD C. Les broches d'adresses de sélection ont été reliées à la masse dans la mesure où nous avons utilisé l'entrée analogique IN0 (dont l'adresse est : ADD A = 0, ADD B = 0 et ADD C = 0) [7].



**Figure 3.6 :** Interfaçage du capteur de température LM35 avec le CAN 0808

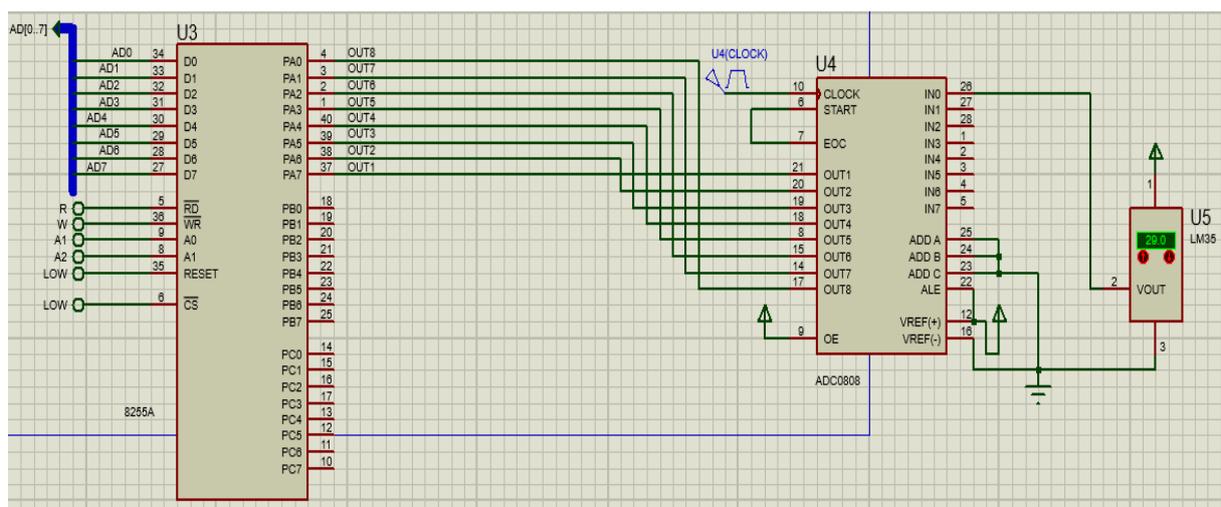
Ci-dessous nous présentons maintenant un tableau qui regroupe le brochage des deux circuits LM35 et ADC 0808 ainsi que leurs connexions.

Broches de l'ADC 0808 [N° de la broche]	Broches du LM 35 [N° de la broche]	Observations
IN0 [26]	OUT [2]	IN0 et OUT reliées ensemble. Acquisition de la température
ADD A [25], ADD B [24] et ADD C [23]	GND [3]	Ces broches à relier à la masse. Sélection de l'entrée analogique IN0
VREF(-) [16]		Ces broches à relier à la masse
VREF(+) [12], OE [9], ALE [22]	VCC [1]	Ces broches à relier au + 5V

**Tableau 3.1 :** Brochage du capteur de température LM35 et du CAN 0808

### 3.5.2 Connexion du circuit CAN avec le circuit d'E/S parallèles

L'interface parallèle 8255 dispose de trois ports d'entrées-sorties (Port A, Port B, Port C) qui peuvent être programmés indépendamment l'un de l'autre [8]. Ainsi dans notre montage, le port A est programmé en entrée afin de récupérer l'information binaire (la valeur de la température écrite sur 8 bits) depuis la sortie du circuit CAN, figure 3.7. Cette donnée y reste jusqu'à ce que le microprocesseur procède à la lecture de ce port.



**Figure 3.7 :** Interfaçage du convertisseur CAN 0808 avec le circuit d'E/S parallèle 8255

Faisons remarquer que la broche START (signal d'entrée de début de conversion) et la broche EOC (signal de sortie de fin de conversion) sont reliées ensemble. Cela autorise le circuit ADC 0808 à effectuer des opérations de conversion continues dès la mise sous tension du montage. Le temps moyen de conversion typique de l'amplitude d'une tension continue (ici, la température) en un signal binaire présent sur les sorties OUT1-OUT7 est approximativement de 100 ms. La fréquence du signal d'horloge CLOCK peut varier de 0 à 1280 kHz, la fréquence typique généralement utilisée est de 640 kHz.

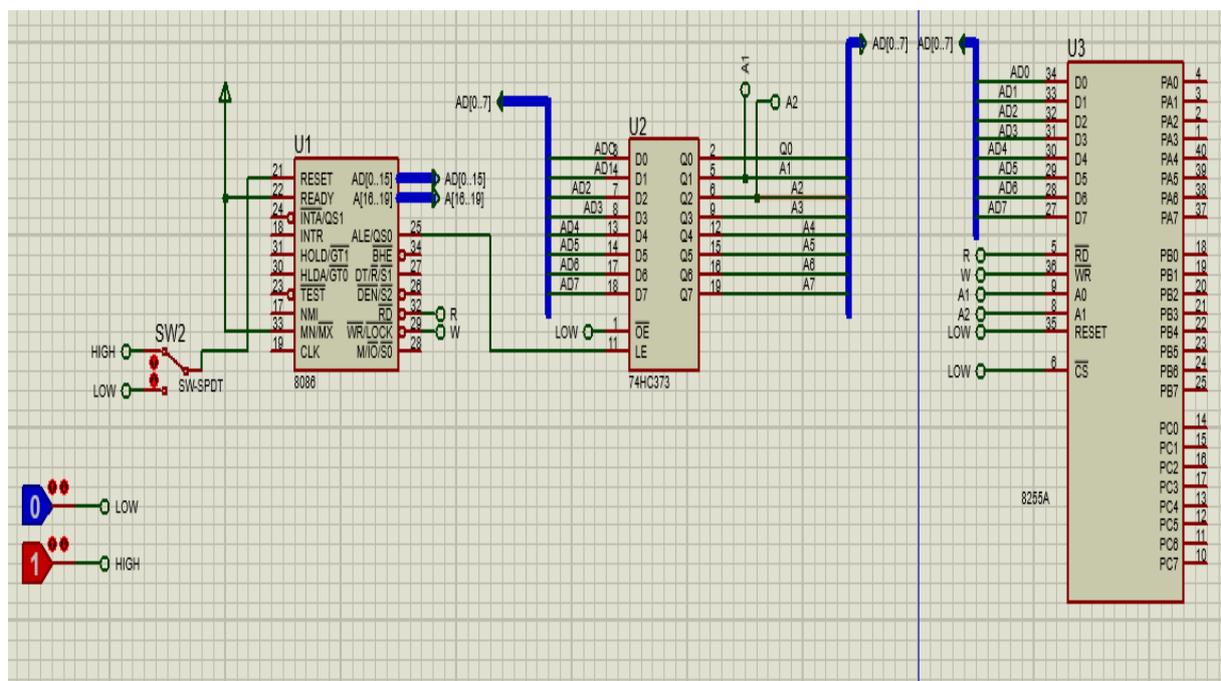
Ci-dessous nous présentons maintenant un tableau qui regroupe le brochage des deux circuits ADC 0808 et PPI 8255A ainsi que leurs connexions.

Broches de l'ADC 0808 [N° de la broche]	Broches du PPI8255A [N° de la broche]	Observations
OUT1 [21]	PA7 [37]	OUT1 et PA7 reliées ensemble
OUT2 [20]	PA6 [38]	OUT2 et PA6 reliées ensemble
OUT3 [19]	PA5 [39]	OUT3 et PA5 reliées ensemble
OUT4 [18]	PA4 [40]	OUT4 et PA4 reliées ensemble
OUT5 [8]	PA3 [1]	OUT5 et PA3 reliées ensemble
OUT6 [15]	PA2 [2]	OUT6 et PA2 reliées ensemble
OUT7 [14]	PA1 [3]	OUT7 et PA1 reliées ensemble
OUT8 [17]	PA0 [4]	OUT8 et PA0 reliées ensemble

**Tableau 3.2 :** Brochage du CAN 0808 et du circuit d'E/S parallèle 8255

### 3.5.3 Connexion du microprocesseur avec le circuit d'E/S parallèles

Le microprocesseur 8086 est employé pour gérer le contrôle de la température des panneaux solaires. Etant donné que le système à microprocesseur est de configuration simple (monoprocasseur), le microprocesseur doit être configuré dans le mode minimum (broche MN/MX portée au niveau haut), figure 3.8.



**Figure 3.8 :** Brochage des circuits : Le microprocesseur 8086 – le circuit de verrouillage 74HC373 – le circuit d'E/S 8255

D'un autre côté, le bus de données du microprocesseur n'est pas directement relié à l'interface parallèle 8255. En réalité, ces deux circuits sont reliés l'un à l'autre via un circuit tampon, le circuit verrouillage 74HS373, qui sert justement de registre-verrou pour y maintenir la donnée stable jusqu'à sa prise en compte par le microprocesseur 8086.

Parallèlement, les lignes multiplexées AD0 et AD1 du microprocesseur (fonctionnant en tant que lignes d'adresses) sont reliées aux broches A0 et A1 du 8255 afin de sélectionner l'un de ses registres internes à savoir : le port A, le port B, le port C ou le registre de commande.

Quant au bus de données du microprocesseur, il est relié aux broches d'entrées du circuit 74HS373. Tandis que les broches de sorties de ce circuit sont connectées au port A du 8255. A travers ces lignes de données, la valeur numérique de la température mesurée est transmise vers le microprocesseur. Notons que ce même bus sert, à un autre moment du programme, pour transmettre des ordres vers les électropompes via le port B de l'interface parallèle.

Ci-dessous nous présentons maintenant un tableau qui regroupe le brochage de trois circuits : le microprocesseur Intel 8086, le circuit de verrouillage 74HC373 et enfin le circuit d'E/S 8255A ainsi que leurs diverses connexions.

Broches du 8086 [N° de la broche]	Broches du 74HC373 [N° de la broche]	Broches du 8255A [N° de la broche]	Observations
<u>RD</u> [32]		<u>RD</u> [5]	<u>RD</u> (du 8086) et <u>RD</u> (du 8255) sont reliés ensemble : Lecture des ports du 8255.
<u>WR/LOCK</u> [29]		<u>WR</u> [36]	<u>WR</u> (du 8086) et <u>WR</u> (du 8255) sont reliés ensemble : Ecriture dans les ports du 8255
		<u>CS</u> [25] et RESET-LOW [6]	Broches à relier à la masse. Le 8255 est toujours activé.
AD (0..15)		A0 [9] et A1 [8]	A0 et A1 (8255) à relier à AD0 et AD1 du 8086 : Adressage des registres internes du 8255
	D0-D7 [3-16]	D0-D7 [27-34]	Verrouillage du contenu du Port A dans le circuit 74373
	<u>OE</u> -Low [1]		<u>OE</u> =0, les sorties du circuit 74373 sont toujours validées ; mais elles restent bloquées tant que LE <sub>74373</sub> (= ALE <sub>8086</sub> ) = 0
ALE/QS0 [25]	LE [11]		ALE et LE à relier ensemble : Activation (LE = 1) du 74373 par le 8086 (ALE = 1) pour la lecture des données
AD (0..15)	D0-D7		Bus de données AD (0..7) du 8086 à relier à D0-D7 (74373)
RESET-Low [21]			Ces broches à relier à la masse. Le 8086 ne doit pas être réinitialisé (état haut) qu'en cas de besoin

**Tableau 3.3** : Brochage des circuits : Circuit 8086 - Circuit 74HC373 - Circuit 8255  
(RD signifie que cette broche est active sur un niveau logique bas)

### 3.5.4 Connexion du microprocesseur avec le circuit de commande de l'électrovanne

L'objectif principal assujéti à ce circuit est le contrôle et la commande automatique des électropompes qui sont en charge du refroidissement de notre système matérialisé par un panneau photovoltaïque lorsque sa température dépasse un certain seuil préfixé.

Pour ce faire, le circuit de refroidissement programmable est constitué d'un réservoir d'eau, de conduites de refroidissement d'eau qui relient le panneau solaire au réservoir d'eau. La circulation de l'eau dans les conduites est assurée par deux électropompes qui fonctionnent selon un schéma spécifié par le programmeur et que nous expliciterons ultérieurement.

Le circuit de commande pour la fermeture ou l'ouverture du circuit des électropompes est géré par le microprocesseur 8086. Il s'agit d'un circuit composé d'une interface d'E/S parallèles, de deux transistors NPN de puissance [10], de deux moteurs électropompes et de deux relais qui font office de circuits d'isolation galvanique entre le microprocesseur (circuit de faible puissance) et les moteurs (circuits de forte puissance).

La mise en marche/arrêt des moteurs (électropompes) dépend des températures consignées dans le programme et définies par l'utilisateur. Ainsi, différentes plages de température ont été choisies. Chaque intervalle de température correspond à un mode de fonctionnement spécifique.

- Lorsque la température  $T > 25^{\circ}\text{C}$ , seule l'électropompe EP1 fonctionne. Au même moment, une diode LED de couleur verte est activée : **Fonctionnement normal**.
- Lorsque la température  $T > 35^{\circ}\text{C}$ , les deux électropompes EP1 et EP2 fonctionnent simultanément. Au même moment, une diode LED de couleur jaune est activée : **Fonctionnement anormal**, mais qui n'est pas encore critique.
- Lorsque la température  $T > 45^{\circ}\text{C}$ , les deux électropompes EP1 et EP2 fonctionnent simultanément. Au même moment, une diode LED de couleur rouge est activée : **Fonctionnement critique**.
- Lorsque la température  $T > 60^{\circ}\text{C}$ , les deux électropompes EP1 et EP2 fonctionnent simultanément. Outre l'allumage de la diode LED de couleur rouge et l'activation d'une alarme sonore, nous prévoyons l'activation d'un circuit de puissance connexe (qui n'apparaît pas sur le schéma de ce montage) qui fait tourner le panneau photovoltaïque, loin des rayons solaires directs : **Fonctionnement dangereux**.

La figure 3.9 montre le circuit de commande de l'électropompe EP1 seule (température enregistrée inférieure à  $35^{\circ}\text{C}$ ). Il est constitué d'un simple transistor BC548 qui fonctionne en Tout ou Rien et qui commande l'ouverture ou la fermeture d'un relais. A l'état de repos, le relais est normalement ouvert.

Lorsque ce transistor Q2 reçoit sur sa base un niveau logique haut (délivré par le microprocesseur via la ligne PB0, programmée en sortie), il est alors saturé. Subséquemment, son collecteur se trouve porté à la masse (interrupteur fermé) laissant ainsi circuler un fort courant collecteur qui traverse la bobine du relais provoquant par la même occasion la fermeture du relais. Par voie de conséquence, l'électropompe EP1 est activée permettant à l'eau de circuler dans les conduites pour faire baisser la température du panneau solaire.

D'un autre côté, lorsque le transistor reçoit sur sa base un niveau logique bas, il se trouve alors dans un état bloqué (interrupteur ouvert). En conséquence, le courant collecteur devient nul. La bobine du relais n'étant plus alimentée, le champ magnétique de la bobine disparaît brusquement ce qui engendre l'ouverture du relais. L'électropompe EP1 est alors arrêtée : l'eau cesse de circuler dans les conduites du panneau solaire.

Simultanément à la mise en marche ou l'arrêt de l'électropompe EP1, une diode de couleur verte (qui n'apparait pas sur la figure 3.9 mais qui apparait clairement sur la figure 3.10) est activée ou désactivée. L'allumage ou l'extinction de la diode verte est assurée par le microprocesseur par l'intermédiaire de la ligne PB2 du circuit 8255. Lorsque PB2 est porté à un potentiel haut (+ 5 volt), la diode verte s'allume. Sinon, elle reste éteinte.

Finalement, faisons remarquer qu'une diode standard D1 (diode de roue libre) a été montée en parallèle avec le relais afin de protéger le transistor contre les surintensités qui sont générées par la disparition brutale du champ magnétique dans le relais lors de son ouverture.

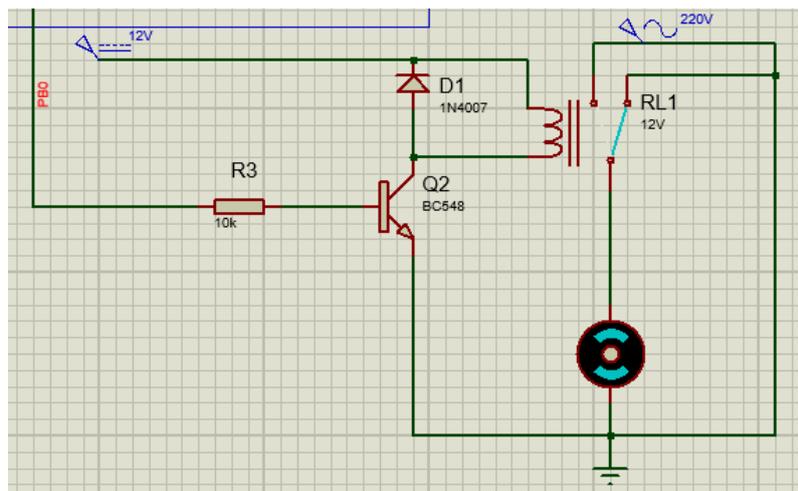


Figure 3.9 : Commande de l'électrovanne EP1

La figure 3.10 représente le circuit général de commande des deux électropompes EP1 et EP2. Conformément au cahier des charges établi précédemment, les deux électropompes fonctionnent simultanément lorsque la température enregistrée dans le panneau solaire dépasse 35°C. Dans ces conditions, les deux transistors Q2 et Q4 reçoivent simultanément un niveau logique haut sur leur base par l'intermédiaire des broches PB0 et PB1 du circuit 8255.

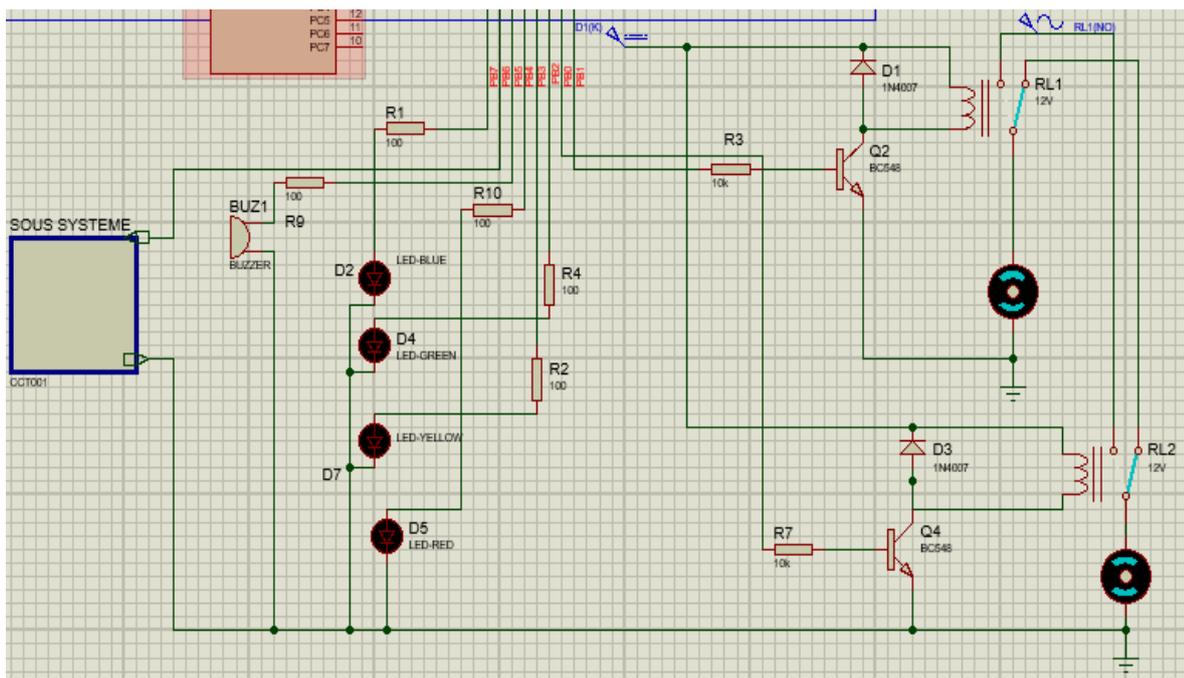


Figure 3.10 : Commande des deux électrovannes EP1 et EP2

Nous avons prévu dans le cahier des charges l'utilisation de deux autres diodes LED (jaune et rouge) qui doivent fonctionner pendant des régimes spécifiques (régime de fonctionnement "anormal" ou "critique" du système photovoltaïque). Ainsi, la diode LED jaune est activée, via la broche PB3 du circuit 8255, lorsque la température du panneau solaire est comprise entre 35°C et 45°C. D'un autre côté, la diode LED rouge est activée, via la broche PB4 du circuit 8255, lorsque la température du panneau solaire dépasse 45°C.

En tout état de cause, nous prévoyons finalement le démarrage d'un système auxiliaire (non étudié dans ce mémoire) qui consiste dans la commande de l'orientation du panneau solaire par un moteur pas-à-pas en les faisant tourner loin des rayons solaires incidents. Ce mode de fonctionnement, qui est risqué pour les cellules photovoltaïques, est enclenché dès que la température dépasse 60°C. Au-delà de cette température, les deux électropompes EP1 et EP2 fonctionnent à plein régime, la diode LED rouge est allumée une alarme sonore (Buzzer) est enclenchée.

Outre les diodes LED verte, jaune et rouge, nous avons inséré également dans le montage une diode LED de couleur bleue qui sera activée dès la mise sous tension du montage. Elle avertit ainsi l'opérateur que le circuit de régulation de la température du panneau solaire est en service ! La diode LED bleue est commandée via la broche PB7 du 8255.

Notons en dernier lieu que la diode D3 joue le même rôle que la diode D1 pour la protection du transistor Q4.

Ci-dessous nous présentons maintenant un tableau qui regroupe le brochage du circuit d'interface parallèle 8255A avec les composants du circuit de puissance de commande des électropompes.

Lignes du Port B du 8255A	Circuit de puissance	Observations
PB0	Q2 (Transistor de puissance) contrôle le relais N°1	Le 8086 commande la marche et l'arrêt de EP1 via la ligne PB0 du 8255
PB1	Q4 (Transistor de puissance) contrôle le relais N°2	Le 8086 commande la marche et l'arrêt de EP2 via la ligne PB1 du 8255
PB2	LED Verte	Allumage et extinction de la LED Verte par le 8086 via la ligne PB2 du 8255
PB3	LED Jaune	Allumage et extinction de la LED Jaune par le 8086 via la ligne PB3 du 8255
PB4	LED Rouge	Allumage et extinction de la LED Rouge par le 8086 via la ligne PB4 du 8255
PB5	Buzzer	Mise en marche et Arrêt de l'alarme sonore par le 8086 via la ligne PB5 du 8255
PB7	LED Bleue	Allumage et extinction de la LED Bleue par le 8086 via la ligne PB7 du 8255

**Tableau 3.4 :** Interfaçage du Port B du 8255 avec le circuit de commande des électropompes

### **3.6 Partie logicielle :**

#### **3.6.1 Introduction :**

Comme nous l'avons déjà mentionné et expliqué dans le paragraphe 3.5.4, un cahier des charges a été établi en vue de contrôler, en temps réel, le refroidissement du panneau solaire afin de maintenir sa température dans une gamme susceptible de fournir le maximum de puissance possible tout en minimisant les pertes dues à l'échauffement des panneaux.

Dès lors que la conception du système à microprocesseur a été finalisée, l'étape suivante a consisté à traduire ce cahier des charges en un organigramme qui permet de faciliter d'une part l'écriture du programme dans le langage assembleur et d'autre part de rendre a posteriori la lecture ultérieure de ce programme facile pour quiconque souhaiterait la réadaptation du programme ou sa maintenance.

Dans l'étape ultime, nous avons traduit cet organigramme en un langage assembleur, compréhensible par le microprocesseur 8086 ou tout autre processeur postérieur au 8086, en raison de la compatibilité ascendante garantie par le fabricant Intel pour tous ces processeurs fabriqués postérieurement au microprocesseur 8086.

#### **3.6.2 Organigramme complet relatif à la régulation de la température d'un panneau photovoltaïque :**

Le schéma de la figure 3.11 présente l'organigramme correspondant à la gestion automatique du refroidissement du panneau solaire par le microprocesseur 8086. Après les diverses initialisations des différents registres impliqués dans la gestion de ce programme, nous distinguons quatre parties dans le programme qui sont responsables du refroidissement standard (une seule électropompe en marche) ou du refroidissement intense (deux électropompes en marche) en fonction de la valeur de la température mesurée à la surface du panneau photovoltaïque.

#### **3.6.3 Programme relatif à la régulation de la température d'un panneau photovoltaïque :**

Le programme relatif à la commande du refroidissement du panneau solaire est présenté dans les pages suivantes. Il est la traduction conforme de l'organigramme présenté ci-dessus dans la figure 3.11.

#### **3.6.4 Simulation du programme :**

Les résultats obtenus lors de la simulation du programme sont très satisfaisants et répondent fidèlement aux spécifications du cahier des charges.

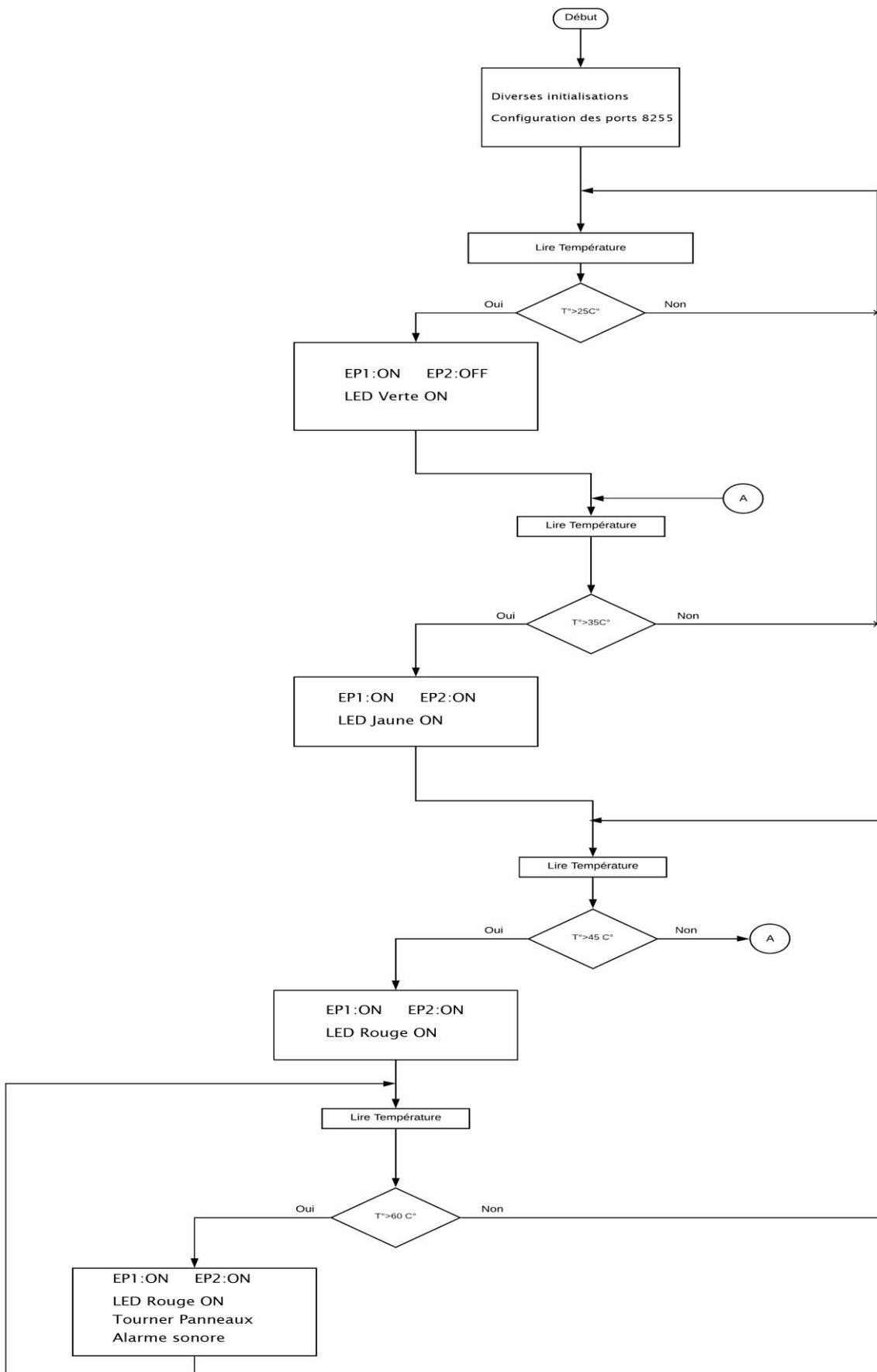


Figure 3.11 : Organigramme dédié à la régulation de la température d'un panneau PV

```

; Initialisations
DATA SEGMENT
PORTA EQU 0FFC0H ; PORTA address
PORTB EQU 0FFC2H ; PORTB address
PORTC EQU 0FFC4H ; PORTC address
CTL EQU 0FFC6H ; Control port address
CTL_BYTE EQU 10011000b ; 8255 control reg.
DEC_TEMP DB 00H
SET_TEMP DB 00H
ADC_VAL DB 00H
COUNT1 DB 25
COUNT2 DB 35
COUNT3 DB 45
COUNT4 DB 60
PRE_TEMP DB 00H
DATA ENDS

; Début du segment du programme
CODE SEGMENT
ASSUME CS:CODE,ES:DATA
MOV AX,DATA
MOV ES, AX
ORG 0000H
START :
MOV AL, CTL_BYTE ; 8255
; CTL_BYTE = 98h = 10011000B donc :
; PA input et mode 0, PCh input, PB output et mode 0, PCI output;
MOV DX, CTL ;
OUT DX, AL ;
CALL Main_prog
Main_prog: ;read temp and conv T= (T1/256)*500 T1=out of adc
MOV DX ,PORTA
IN AL, DX
MOV AH,00H
MOV CX,1F4H
MUL CX
MOV CX,100H
DIV CX
MOV SET_TEMP , AL

CALL TEMP_CONTL1

JMP Main_prog

TEMP_CONTL1: ;COMP Valeur de temp avec valeur de COUNT
    MOV AL,COUNT1
    CMP AL,SET_TEMP
    JL TURN_ON_M1
    JMP RELAY_OFF

RELAY_OFF: ; turn off ep1,ep2,LED blue ON
    MOV DX,PORTB

```

```
MOV AL,10000000B
OUT DX,AL
JMP Main_prog
```

```
TURN_ON_M1: ; turn on relay 1
MOV DX,PORTB
MOV AL,05H
OUT DX,AL
JMP TEMP_CONTL2
```

```
TEMP_CONTL2:
MOV DX,PORTA
IN AL,DX
MOV AH,00H
MOV CX,1F4H
MUL CX
MOV CX,100H
DIV CX
```

```
MOV SET_TEMP, AL
```

```
MOV AL,COUNT2
CMP AL,SET_TEMP
JL TURN_ON_M1M2
JMP Main_prog
```

```
TURN_ON_M1M2: ; turn on ep1,ep2,LED jaune
```

```
MOV DX,PORTB
MOV AL,00001011B
OUT DX,AL
JMP TEMP_CONTL3
```

```
TEMP_CONTL3 :
MOV DX,PORTA
IN AL,DX
```

```
MOV AH,00H
MOV CX,1F4H
MUL CX
MOV CX,100H
DIV CX
```

```
MOV SET_TEMP, AL
```

```
MOV AL,COUNT3
CMP AL,SET_TEMP
JL TURN_ON_M1M2LED
JMP TEMP_CONTL2
```

```
TURN_ON_M1M2LED: ; turn on ep1,ep2,LED rouge
```

```
MOV DX,PORTB
MOV AL,00010011B
OUT DX,AL
JMP TEMP_CONTL4
```

```
TEMP_CONTL4 :
MOV DX ,PORTA
IN AL,DX
```

```
MOV AH,00H
MOV CX,1F4H
MUL CX
MOV CX,100H
DIV CX
```

```
MOV SET_TEMP , AL
```

```
MOV AL,COUNT4
CMP AL,SET_TEMP
JL TURN_PV
JMP TEMP_CONTL3
```

```
TURN_PV : ; (ep1,ep2,LED rogue,buzzer) ON
MOV DX,PORTB
MOV AL,01110011B
OUT DX,AL
JMP TEMP_CONTL4
```

```
CODE ENDS
END START
```

**Liste des références bibliographiques :**

- [1] Kirshan Kant; Microprocessors and Microcontrollers: Architecture, Programming and System Design 8085, 8086, 8051, 8096. Jaypee Institute of Information Technology Noida: Kindle Edition, 2012.
- [2] <http://fortuneenergy.net/content/SW315mono.pdf> ; consulté le 12/08/2020
- [3]Improvement of Power Output from Solar Panel Using Water Cooling System  
[https://www.researchgate.net/publication/312525173\\_IMPROVEMENT\\_OF\\_POWER\\_OUTPUT\\_FROM\\_SOLAR\\_PANEL\\_USING\\_WATER\\_COOLING\\_SYSTEM](https://www.researchgate.net/publication/312525173_IMPROVEMENT_OF_POWER_OUTPUT_FROM_SOLAR_PANEL_USING_WATER_COOLING_SYSTEM)  
[En Ligne] consulté le 19/08/2020
- [4] Temperature Control system using 8086 ; [En Ligne] consulté le 19/08/2020  
<http://jntuimplab.blogspot.com/2008/01/temperature-control-system-using-8086.html>
- [5] Mesurer une température avec un capteur LM35 et une carte Arduino/Genuino  
<https://www.carnetdumaker.net/articles/mesurer-une-temperature-avec-un-capteur-lm35-et-une-carte-arduino-genuino/> [En Ligne] consulté le 26/06/2020
- [6] LM35 Precision Centigrade TemperatureSensors [Data sheet] [En Ligne] ; consulté le 26/06/2020 ; <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>
- [7] 74HC373; 74HCT373 Octal D-type transparent latch; 3-state [Data sheet] [En Ligne] ; [https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74HC\\_HCT373.pdf](https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74HC_HCT373.pdf); consulté le 29/08/2020
- [8] <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/66100/INTEL/8255A.html> ; consulté le 12/09/2020.
- [9] ADC0808/ADC0809 8-Bit  $\mu$ P Compatible A/D Converters with 8-Channel Multiplexer;  
<http://www.ti.com/sc/docs/stdterms.htm> ; [Data sheet] [En Ligne]; consulté le 10/09/2020
- [10] [http://www.datasheetcatalog.com/datasheets\\_pdf/B/C/5/4/BC548.shtml](http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/B/C/5/4/BC548.shtml) ; [Data sheet] [En Ligne] ; consulté le 01/09/2020.

## Conclusions et Perspectives

La température de la cellule photovoltaïque est l'un des paramètres les plus importants qui impactent fortement sur le rendement électrique du panneau solaire. En effet, les études montrent que le rendement en puissance diminue de manière significative lorsque la température du panneau croît. A cet égard, nous avons jugé utile d'orienter le thème de notre mémoire de fin d'études dans l'étude de cette problématique et à réfléchir aux moyens qui nous permettraient de diminuer éventuellement les effets nuisibles de la température sur le rendement photovoltaïque. A ce propos, nous avons décidé de concevoir et étudier un dispositif qui assurerait automatiquement une régulation de la température dans une gamme de valeurs non préjudiciables pour les panneaux solaires. L'automatisation de la régulation numérique a été confiée à un système programmable piloté par un microprocesseur 8086.

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons organisé la planification de ce projet selon trois axes successifs et complémentaires. La première partie de ce projet traite de la problématique afin de mettre en exergue les avantages tangibles de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque ainsi que les limites inhérentes à ce type d'énergie. Ainsi, nous avons abouti à la conclusion que la chaleur était l'un des problèmes les plus graves qui limitent les performances des panneaux solaires. Nous avons identifié dans la deuxième partie du projet les différents composants qui, combinés entre eux, aboutissent à un dispositif complet qui répondrait aux spécifications imposées par le cahier des charges. Une fois que nous avons arrêté nos choix sur les différents composants, nous avons construit notre montage électronique. Ceci constitue l'aspect purement matériel du projet qui a été ensuite suivie par la mise au point du programme de pilotage. Finalement, nous avons terminé le projet par des essais de simulation. Le montage électronique, l'écriture du programme ainsi que les tests de simulation constituent la troisième et dernière partie de notre projet de fin d'études.

Après de longs mois pénibles mais fructueux, nous sommes effectivement arrivés et avec succès au terme de cette étude. Certes, nous avons rencontré de nombreux problèmes lors de cette conception, c'était prévisible. Néanmoins, nous sommes arrivés à les résoudre au fur et à mesure.

Le résultat final est, de notre point de vue, très satisfaisant : un dispositif qui répond théoriquement parfaitement, lors de la simulation, à différents contextes d'utilisation. Toutefois, des améliorations sont nécessaires et restent à faire. Tout d'abord, la matérialisation concrète du projet nécessite l'appropriation d'un panneau solaire, l'installation d'un réservoir d'eau et de ses conduites d'eau. Cela constitue en lui-même un projet qui est loin d'être négligeable. Un autre aspect de ce projet, tout aussi important, est l'étude de différents types de refroidissement (divers gaz) ensuite leurs essais tout en faisant appel à des connaissances théoriques solides dans le domaine de la thermodynamique. Finalement, nous pensons que ce projet peut être complété du point de vue électronique par une autre application qui consiste en la conception d'un dispositif du contrôle de l'orientation des panneaux solaires à base d'un moteur pas-à-pas piloté par un système programmable.

## **Annexe A : Exemple des spécifications d'un panneau photovoltaïque : SolarWorld Pro-Series SW 315**

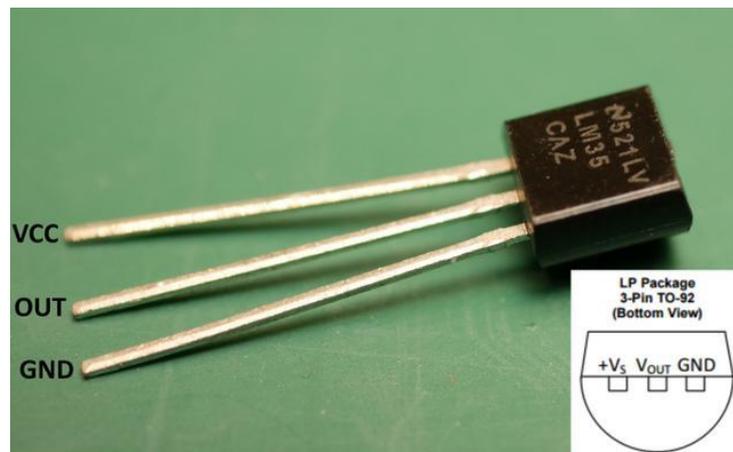
Lien internet :

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi8kdmpn\\_vrAhVQ4YUKHcigCb8QFjAAegQIBBAB&url=http%3A%2F%2Ffortuneenergy.net%2Fcontent%2FSW315mono.pdf&usg=AOvVaw03TkZP5dfvNVpHNFKCzUDU](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi8kdmpn_vrAhVQ4YUKHcigCb8QFjAAegQIBBAB&url=http%3A%2F%2Ffortuneenergy.net%2Fcontent%2FSW315mono.pdf&usg=AOvVaw03TkZP5dfvNVpHNFKCzUDU)

## Annexe B : LM 35 - Le capteur de température

Le LM35 est un capteur analogique de température fabriqué par l'entreprise [Texas Instruments](#). Il est toujours considéré dans les applications de l'électronique comme étant un choix incontournable en raison de ses nombreux avantages : sa précision, son faible prix, sa simplicité d'utilisation, sa bonne fiabilité, ...

Ce capteur est capable de mesurer des températures dans une gamme qui s'étend de  $-55^{\circ}\text{C}$  à  $+150^{\circ}\text{C}$ .



**Figure 5.1:** Aspect externe du capteur LM 35 et son brochage

**N.B.** Les versions grand public sont capables de mesurer des températures dans une gamme entre  $-40^{\circ}\text{C}$  et  $+110^{\circ}\text{C}$ .

Les gammes de températures classiques en électronique sont les suivantes :

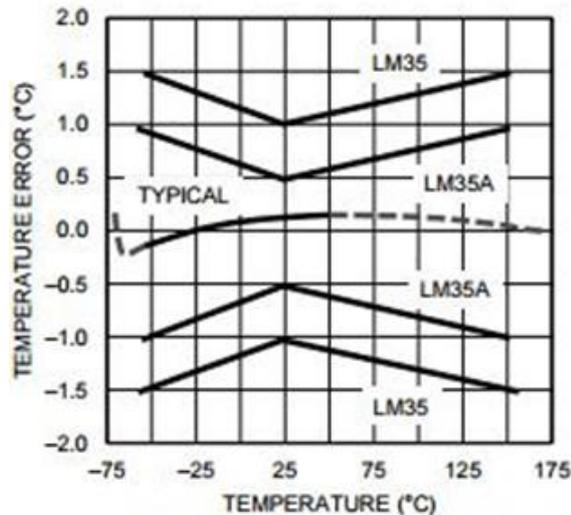
- Grand public :  $0^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$
- Industrie :  $-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$
- Militaire :  $-55^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$

### 1- Les caractéristiques positives du LM 35 :

On peut citer quelques caractéristiques du capteur LM35 :

- Le capteur de température LM35 peut tolérer des températures assez extrêmes (jusqu'à  $-55^{\circ}\text{C}$  /  $+150^{\circ}\text{C}$ ).
- Un aspect essentiel, qui a rendu le capteur LM35 si populaire, est sa caractéristique de pré-calibration à la sortie de l'usine. Il est ainsi calibré en degrés Celsius au moment de sa fabrication. Ce qui implique que son utilisateur n'a absolument rien à faire pour calibrer le LM 35, celui-ci est déjà prêt dès qu'il est sorti de son emballage.
- Ce capteur offre un signal de sortie analogique proportionnel à la température. En conséquence, il suffit de mesurer la tension de la sortie de ce composant pour en déduire la température. La tension croît de  $10\text{mV}$  à chaque fois que la température augmente de  $1^{\circ}\text{C}$ .
- La précision garantie par le fabricant est de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  à  $25^{\circ}\text{C}$  et  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$  à  $-55^{\circ}\text{C}$  ou  $+150^{\circ}\text{C}$  pour la version la moins précise, ce qui est largement suffisant pour la plupart des applications.

La version plus précise du LM35 (nommée "LM35A") a une précision garantie de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  à  $25^{\circ}\text{C}$  et  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  à  $-55^{\circ}\text{C}$  ou  $+150^{\circ}\text{C}$ .



**Figure 5.2** Courbes de précision d'un capteur LM35

- Le LM35 est un capteur linéaire, par exemple, moins de  $1^{\circ}\text{C}$  d'erreur sur la gamme entre  $55^{\circ}\text{C}$  à  $+150^{\circ}\text{C}$ . Dans la mesure où chaque degré Celsius correspond à  $10\text{mV}$  et que la sortie du capteur est parfaitement linéaire, dans ce cas, la conversion de la valeur de la température sera très simple.
- Pour en finir avec les points positifs, le capteur LM35 fonctionne avec une tension d'alimentation entre 4 volts et 30 volts, ce qui laisse pratiquement le choix vaste à l'utilisateur pour l'employer dans tout montage qu'il soit numérique ou analogique.

## 2- Les caractéristiques négatives du LM 35 :

Abordons à présent les points négatifs :

- Le capteur LM35 ne fonctionne pas en dessous d'une tension d'alimentation de 4 volts.  
**N.B.** Le capteur LM35 peut être utilisé avec une entrée analogique  $3,3\text{ volt}$ , car  $150^{\circ}\text{C} = 1,5\text{V}$ . Cependant, une alimentation de  $5\text{ V}$  reste obligatoire pour que le capteur puisse fonctionner correctement.
- Le capteur LM35 nécessite une alimentation négative pour mesurer des températures en dessous de  $0^{\circ}\text{C}$ . La sortie est proportionnelle à la température, par conséquent  $-10^{\circ}\text{C}$  équivaut à  $-0,1\text{ volt}$ . De ce fait, une alimentation simple de  $5\text{ V}$ , ne permet que la mesure des températures positives seulement.

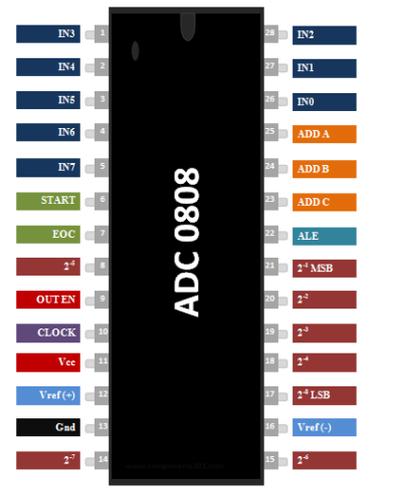
### Liste des références bibliographiques :

- Mesurer une température avec un capteur LM35 et une carte Arduino/Genuino ; [En Ligne] consulté le 26/06/2020 ; <https://www.carnetdumaker.net/articles/mesurer-une-temperature-avec-un-capteur-lm35-et-une-carte-arduino-genuino/>.
- LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors ; [Data sheet] [En Ligne] consulté le 26/06/2020

## Annexe C: ADC0808 IC Datasheet



ADC0808 IC



ADC0808 Pinout

### ADC0808 Pin Configuration

Pin Number	Pin Name	Description
1 to 5, 27, 28	Analog Channel 1 to 5	These 7 pins are the input pins for Analog voltage(sensor)
6	START	This is an input pin which is made high to start conversion
7	End of Conversion (EOC)	This is an output pin which goes high once the conversion is over
8,14,15,18,19,20,21	Output ( $2^{-1}$ to $2^{-7}$ )	Output digital pins which gives the result of the ADC conversion
9	OUT EN	Has to be made high to get output on output pins
10	CLOCK	Has to be given clock signals (0V-5V) 20Mhz approx.
11	Vcc	Powers the IC typically with 5V
12	V ref(+)	Reference voltage pin, typically +5V is used normally
13	Ground	Connect to ground of the circuit
16	Vref(-)	Vref is connected to ground normally
22	Address Latch Enable(ALE)	This pin is should be temporarily made high to select ADC channel
23,24,25	ADD A, ADD B, ADD C	These three pins are used to select the channel

### ADC0808 Features

- Easy to interface with all Microprocessors or works Stand alone.

- Eight channel 8-bit ADC module
- Can measure up to 8 Analog values seamlessly
- On chip Clock not available, external Oscillator is needed (Clock)
- Digital output various from 0 to 255, Operating power is 15mW, conversion time 100us
- When  $V_{ref} = 5V$ , for every 19.53mV of analog value there will be rise of one bit on digital side (Step size)
- Available in 28-pin PDIP, SOIC packages

**Note:** Complete Technical Details can be found at the **ADC0808 datasheet** given at the end of this page.

### ADC0808 Equivalent ICs:

ADC0804, ADC modules

### Where to use a ADC0808

The **ADC0808 IC** is a commonly used ADC module for projects where an external ADC is required. It is a 28-pin Eight channel 8-bit ADC module. Meaning it can measure up to eight ADC value from 0V to 5V and the precision when voltage reference ( $V_{ref}$  –pin 9) is +5V is 19.53mV (**Step size**). That is for every increase of 19.53mV on input side there will be an increase of 1 bit at the output side.

This IC is very Ideal to use with Microprocessors like Raspberry Pi, Beagle bone etc. Or even to use as a standalone ADC module. Every **ADC module** requires a clock to function; this IC requires an external clock pulse to work. Hence, if you are looking for a ADC module with a decent resolution of 8-bit that could measure up to 8 channels then this IC is for you.

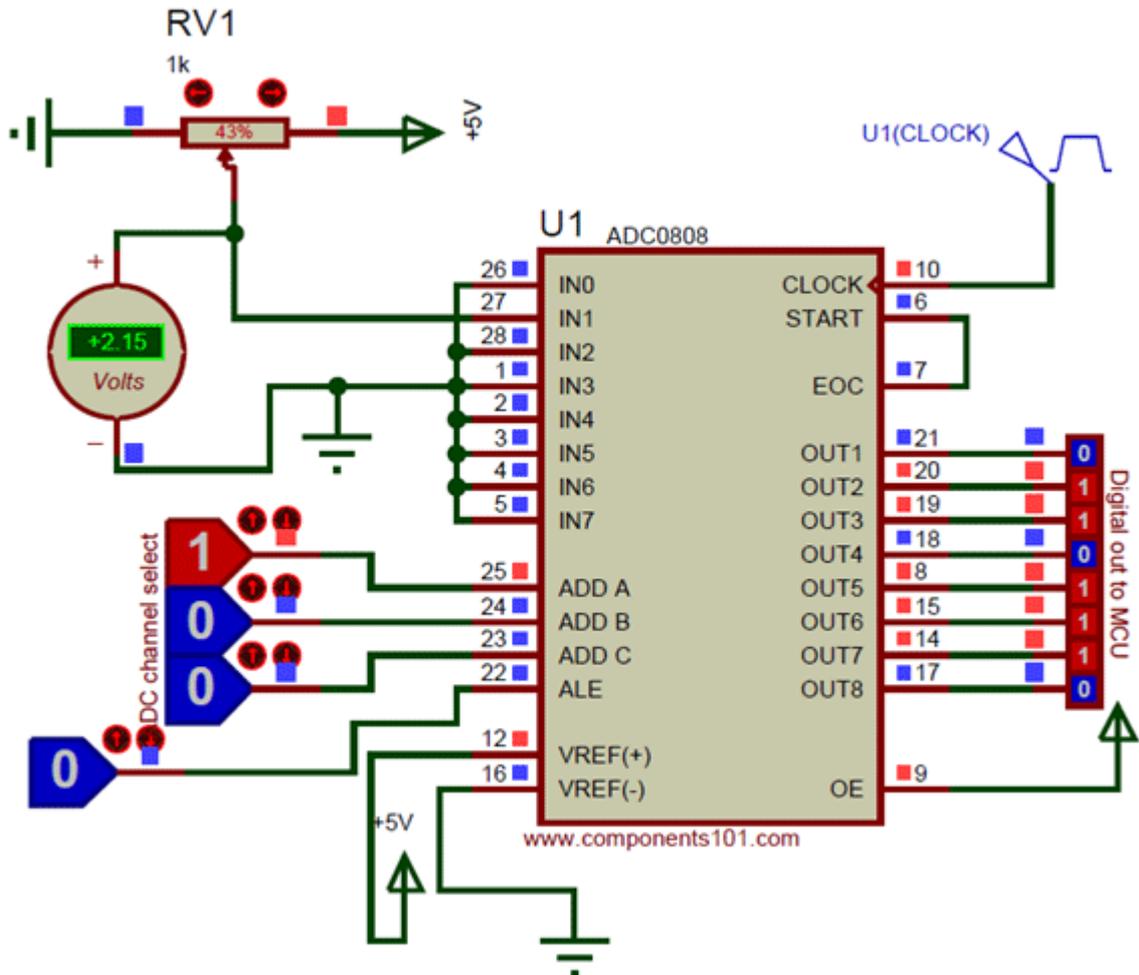
### How to use ADC0808

Since the **ADC0808 IC** can measure up to eight Analog voltage and also does not have an internal clock slightly requires more components to make it work compared to its predecessor ADC0804. The IC can be powered by +5V. The  $V_{ref+}$  and the Output enable should also be supplied +5V to obtain the output. Powering the  $V_{ref+}$  with +5V will make the IC operate with a step size of 19.53mV. The external clock should be connected to clock pin, this can either be an oscillator circuit or can just be a pulse generated from a MCU/MPU.

The right input analog voltage can be given to pins from IN1 to IN7, but the IC can read the voltage of only one channel at a time. This channel selection can be done with the pins **ADD A**, **ADD B** and **ADD C**. These three bits have to be set as shown in the table below to access the respective analog channel. Once the channel is set it should be enabled by making the Address latch enabled (ALE) pin to go high momentarily.

SELECTED ANALOG CHANNEL	ADDRESS LINE		
	C	B	A
IN0	L	L	L
IN1	L	L	H
IN2	L	H	L
IN3	L	H	H
IN4	H	L	L
IN5	H	L	H
IN6	H	H	L
IN7	H	H	H

The digital output will be obtained from the pins  $2^{-1}$  (OUT 1) to  $2^{-8}$  (OUT 8) and the analog voltage should be connected to Vin(+) pin as shown in the circuit. Also note that another end of the voltage source (sensor/module) should also be grounded to the circuit for the ADC conversion to work. Now, for the ADC Conversion to start we have to make the START pin go high as soon as the EOC pin goes high. This can either be done through program or we can simply connect the EOC pin with START pin as shown in the circuit below.



In the above circuit a potentiometer is used to feed in a variable voltage of 0V to 5V to the IN1 pin and the present Voltage is read using a voltmeter. To read the voltage from channel one we have to set A=1 and B=0 and C=0 according to the table below, this can be done using an I/O pin of a MPU/MCU. As we can see in the image the voltage value is 2.15V and the resulting binary value is 01101110. Let us see how this binary value can be converted to Analog value, since we will need it while programming/designing.

Binary Value = **01101110**

$$\text{Converting to Decimal} = (0 \times 128) + (1 \times 64) + (1 \times 32) + (0 \times 16) + (1 \times 8) + (1 \times 4) + (1 \times 2) + (0 \times 1) \\ = 110$$

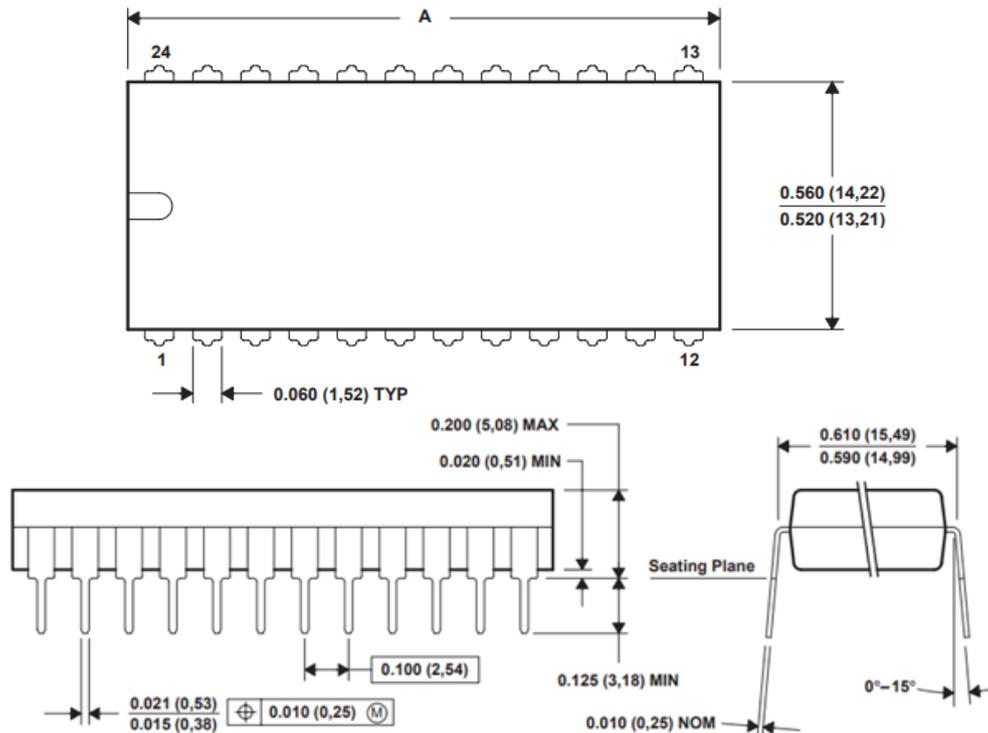
$$\text{Analog Voltage} = \text{Decimal Value} \times \text{Step size} \\ = 110 \times 19.53\text{mV} \\ = 2.14\text{V}$$

The obtained value is 2.14V and the measured voltage is 2.15V which are very much close. So this is **how we use an ADC0808 IC**.

### Applications

- Operates With Any 8-Bit ( $\mu$ P) Processors or as a Stand-Alone Device
- Can measure up to eight channel hence can be used for complex projects
- Available in smaller packages for its performance, hence used in portable electronics.
- Widely used with Raspberry Pi, Beagle Bone and other MPU development platforms
- Interface to Temp Sensors, Voltage Sources, and Transducers

### 2-D Model (PDIP)



<https://components101.com/adc0808-pinout-features-datasheet>