

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Mention Électronique  
Spécialité Automatique.

présenté par

LAZAR Amat Ellah Noussaïba

---

# Régulation de la température et humidité à l'intérieur d'un incubateur avicole

---

Proposé par : Mr B.KAZED

Année Universitaire 2016-2017

## Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma très chère et douce mère Djamila, mon très cher et  
affectueux père Abd elhakim*

*À tous mes proches de la famille LAZAR particulièrement mes  
frères, sans oublier la famille AFFOUN, mes chères tentes et  
chers oncles.*

*Spécial dédicace mon frère Mohamed Essedik qui m'a beaucoup  
aider, ma tante Amina, son mari Nesreddine, et leur fille  
Meriem*

*À tous mes amis et mes collègues de l'Université et spécialement  
mes amis du club MEGATRONIC pour leurs encouragements et  
leur précieux soutien...*

*Spécial dédicaces B.O Brahim qui m'a aider en partie  
électronique sans oublier T.Fella, B.Sara...*

*Merci à tous*

---

## Remerciements

---

*Je tiens à remercier tout d'abord mon promoteur, Professeur B.KAZED, pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance.*

*Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude.*

*Je voudrais également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques.*

*Ainsi que les enseignants de département d'électronique et en particulier, l'équipe de l'automatique qui ont contribué à ma formation en Master, sans oublier tous les enseignants de l'université SAAD DAHLEB de Blida.*

*Merci à tous...*

---

## **Le but du travail**

L'objectif principale de ce projet est de trouver un modèle mathématique qui exprime le système considéré pour faciliter l'obtention d'une loi de commande afin d'asservir le processus pour maintenir la température et l'humidité à ses valeurs définies.

Cet objectif consiste essentiellement à améliorer l'outil de production et la production elle-même, vu le besoin et la demande du produit au marché.

---



---

## ملخص

في هذا العمل، سنتحدث في الرابط الأول الحضانة وحاضنات بنظرة العامة، ثم في الرابط الثاني، سوف نقوم بذكر المواد المستخدمة لصناعة هذه الحاضنة (النظام). في المركز الثالث، وسوف نقوم بتحديد هوية ونمذجة نظام الناتجة. وأخيراً، في الربط الثالث، سوف نقوم بحل هذا النظام مع وحدة تحكم التي تسمح له بالبقاء في القيم المحددة.

**كلمات المفاتيح:** الهوية؛ النمذجة. التنظيم.

---

## Résumé

Dans ce travail, on va parler en 1<sup>er</sup> lieu sur l'incubation et les incubateurs en vue générale, puis en 2<sup>ème</sup> lieu, on va mentionner le matériel utilisé pour réaliser cet incubateur (système).

En 3<sup>ème</sup> lieu, on va faire une identification et une modélisation du système résultant. Enfin, en 3<sup>ème</sup> lieu, on va régler ce système avec un régulateur qui lui permet de rester à ces valeurs définies.

**Mots clés :** identification ; modélisation ; régulation.

---

## Abstract

In this work, we are going to speak in 1st linker on the incubation and the incubators in sight general, then in 2nd place, we are going to mention the material used to realize this incubator (system).

En 3rd place, we are going to make an identification and a modelling of the resultant system. Finally, in 3rd place, we are going to settle this system with a regulator which allows him to stay in these defined values.

**Keywords:** identification; modelization; Regulation.

---

## Listes des acronymes et abréviations

T : température.

°C : degré Celsius.

RH: relative humidity.

TWI: Two Wire Interface.

I<sup>2</sup>C: Inter Integrate Circuit.

SDA: Serial Data Line.

SCL: Serial Clock Line.

ACK: acknowledge.

R/W: Read/Write.

Mhz: Méga hertz.

PWM : Pulse Wilde Modulation.

V : volt.

mA: milli Ampère.

KB : kilo bits.

LED: Light Emitting Diode.

CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor.

s: second.

N.cm : Newton. Centimètre.

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor.

SISO: Single Input Single Output.

MIMO : Multi Input Multi Output.

$\Theta$  : Téta.

$\varphi$  : Phi.

$\epsilon$  : epsilon.

CNA : convertisseur numérique analogique.

CAN : convertisseur analogique numérique.

MC O/R : moindres carrées ordinaires/récurrents.

ARM A/AX : auto récursif à moyenne ajusté/étendue.

PWM :Pulse Width Modulation.

# Table des matières

DEDICACES.

REMERCIEMENTS.

BUT DE TRAVAIL.

RESUMES.

LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS.

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX.

INTRODUCTION GENERAL ..... 1

## CHAPITRE 1 : Généralités

1.1. Introduction .....	2
1.2. Types d'incubation .....	2
1.2.1.type naturelle .....	2
1.2.2.type artificielle .....	3
1.2.3.Type mixte .....	3
1.3. L'incubation artificielle .....	3
1.3.1.Principe de l'incubation artificielle .....	3
1.3.2.Les modèles d'incubateurs artificiels .....	4
a. Les incubateurs statiques .....	4
b. Les incubateurs dynamiques .....	4
1.4. Paramètres agissent sur l'incubation artificielle .....	5
1.4.1. La température .....	5
1.4.2.L'humidité .....	6
1.4.3. L'aération .....	6
1.4.4.Le retournement d'œufs .....	6
1.5. Les étapes d'incubation d'œufs .....	7
1.5.1.Tri et désinfection des œufs .....	7
1.5.2.Stockage des œufs .....	7
1.5.3.Préchauffage et incubation des œufs .....	8
1.5.4.Mirage des œufs .....	8
1.5.5.Eclosion des œufs .....	9
1.6. Conclusion .....	10

## CHAPITRE 2 : Description du matériel utilisé

2.1. introduction.....	11
------------------------	----

Partie mécanique .....	11
Partie électronique .....	12
2.2. le bus I2C "Inter Integrate Circuit" .....	12
2.2.1. caractéristique du bus.....	12
2.2.2.Principe de fonctionnement .....	12
2.3. La carte ARDUINO UNO .....	13
2.3.1.Synthèse des caractéristiques de l'Arduino.....	15
2.3.2.Le cœur de la carte "l'ATMega328 .....	15
2.4. Le plan mémoire.....	17
2.4.1.La mémoire programme.....	17
2.4.2.La mémoire des données.....	17
2.4.3.La mémoire mort.....	17
2.5. Les entrées/sorties .....	17
2.5.1.Les broches numériques .....	17
2.5.2.Les entrées analogiques .....	18
2.6. Le capteur SHT-75 .....	19
2.6.1.Caractéristiques techniques.....	19
2.6.2.Principe de fonctionnement.....	20
a. Alimenter le capteur.....	20
b. Envoi d'une commande.....	20
c. Liste des commandes du sht-75.....	20
d. Principe de mesure de l'humidité relative et la température.....	21
2.7. Moteur 919D801 :1 de retournement .....	21
2.8. Autres accessoires nécessaires.....	22
2.8.1. L'IGBT .....	22
2.8.2.L'optocoupleur.....	23
2.8.3.Le pont H L6203.....	23
2.8.4.Régulateur L7812C.....	25
2.9. Réalisation de circuit du système.....	25
2.10. Photos de l'incubateur.....	27
2.11. Conclusion.....	28
<b>CHAPITRE 3 : Identification du système</b>	
3.1. Introduction.....	29
3.2. Généralités sur l'identification.....	29

3.3. Généralités sur la modélisation.....	29
3.3.1.Modèle d'identification non-paramétrique.....	31
a. Réponse harmonique.....	31
b. Réponse indicielle.....	32
3.3.2.Modèle d'identification paramétrique.....	32
a. Méthode paramétrique graphique (déterministe).....	32
b. Méthode paramétrique statistique (stochastique).....	32
3.3.3.L'identification paramétrique.....	33
a. L'acquisition des entrées/sorties .....	33
b. Le choix de la complexité du modèle.....	33
c. L'algorithme d'identification.....	33
d. L'estimation des paramètres du modèle.....	37
e. La validation du modèle identifié.....	37
3.4. Manipulation sur Matlab.....	38
3.4.1.Réponse indicielle.....	38
3.4.2.Réponse à un signal aléatoire.....	39
3.4.3.Identification des paramètres du modèle.....	41
3.4.4.Validation du modèle.....	44
3.5. Conclusion.....	46

#### **CHAPITRE 4 : Commande numérique du système**

4.1. Introduction.....	47
4.2. Définition et généralités sur la commande.....	47
4.2.1.Le signal de contrôle 'PWM' .....	49
4.2.2.Le régulateur PID.....	51
4.2.3.Description des actions du PID.....	51
4.3. Etude expérimentale.....	54
4.3.1. Le choix des paramètres du régulateur PID.....	54
4.3.2.Manipulation avec différentes périodes d'échantillonnage .....	57
4.4. Manipulation sur système .....	58
4.5. Conclusion.....	61
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>62</b>

#### **BIBLIOGRAPHIE**

#### **ANNEXES**

## Liste des figures

<b>Figure 1.1.</b> Une poule couveuse.....	2
<b>Figure 1.2.</b> Exemple d'un incubateur.....	3
<b>Figure 1.3.</b> Couveuse classique.....	4
<b>Figure 1.4.</b> Une couveuse dynamique.....	5
<b>Figure 1.5.</b> Tri et désinfection des œufs.....	7
<b>Figure 1.6.</b> L'opération de mirage.....	9
<b>Figure 1.7.</b> Sortie des poussins.....	9
<b>Figure.2.1</b> Exemple d'échange d'information.....	13
<b>Figure.2.2</b> la carte ARDUINO UNO.....	14
<b>Figure.2.3.</b> Les pins du l'ATMega328.....	16
<b>Figure.2.4.</b> Le SHT75.....	19
<b>Figure.2.5.</b> Condition de démarrage de transmission.....	20
<b>Figure.2.6.</b> Schémas symbolique du transistor IGBT.....	22
<b>Figure.2.7.</b> Schémas symbolique de l'optocoupleur.....	23
<b>Figure.2.8</b> Schémas du pont H.....	24
<b>Figure.2.9.</b> Le pont H L6203.....	24
<b>Figure.2.10.</b> Schéma équivalent de l'L7812.....	25
<b>Figure.2.11.</b> Schéma circuit de puissance.....	26
<b>Figure.2.12.</b> Schéma de la carte d'interface.....	27
<b>figure.3.1</b> Organigramme de différents types de modélisation.....	31
<b>Figure.3.2.</b> schémas explicatif du calcul d'erreur.....	35
<b>Figure.3.3.</b> Estimation des paramètres.....	37
<b>Figure.3.4.</b> Réponse indicielle du système avec $T_e=2s$ .....	38
<b>Figure.3.5.</b> réponse indicielle pour différentes périodes d'échantillonnages.....	39
<b>Figure 3.6.</b> Réponse à une excitation aléatoire.....	40
<b>Figure.3.7.</b> variation de la température.....	40
<b>Figure.3.8.</b> variation de l'humidité.....	41
<b>Figure 3.9.</b> Le toolbox d'identification.....	41
<b>Figure 3.10.</b> L'importation des données.....	42
<b>Figure3.11.</b> Sortie réelle et sortie estimée (température).....	43

<b>Figure.3.12.</b> Sortie réelle et sortie estimée (humidité).....	43
<b>Figure.3.13.</b> L'analyse résiduelle (température).....	44
<b>Figure.3.14.</b> L'analyse résiduelle (humidité).....	45
<b>Figure.3.15.</b> Réponse indicielle du modèle (température).....	45
<b>Figure.3.16.</b> stabilité dans le plan Z du modèle (température).....	46
<b>Figure.4.1.</b> Principe de régulation.....	48
<b>Figure.4.2.</b> Fonctionnement boucle ouvert. ....	49
<b>Figure.4.3.</b> Fonctionnement en boucle fermé.....	49
<b>Figure.4.4.</b> Signal PWM asymétrique.....	50
<b>Figure.4.5.</b> Signal PWM symétrique.....	50
<b>Figure.4.6.</b> Schéma fonctionnel d'un système.....	51
<b>Figure.4.7.</b> schéma fonctionnel du régulateur P.....	52
<b>Figure 4.8.</b> Réponse indicielle du régulateur P .....	52
<b>Figure.4.9.</b> schéma fonctionnel du régulateur I.....	53
<b>Figure 4.10.</b> Réponse indicielle du régulateur I.....	53
<b>Figure.4.11.</b> schéma fonctionnel du régulateur D.....	54
<b>Figure 4.12.</b> Réponse indicielle du régulateur I.....	54
<b>Figure.4.13.</b> Correcteur PID en boucle fermée.....	54
<b>Figure.4.14.</b> block du PID discrète.....	55
<b>Figure.4.15.</b> signal de consigne et signal réglée (température).....	56
<b>Figure.4.16.</b> signal de consigne et signal réglée (humidité).....	57
<b>Figure.4.17.</b> Manipulation sur système de chauffage.....	57
<b>Figure.4.18.</b> Manipulation sur système de l'humidité.....	58
<b>Figure.4.19.</b> Signal de commande (PWM).....	59
<b>Figure.4.20.</b> Signal de sortie pour une consigne $U_c=37.7$ .....	59
<b>Figure.4.21.</b> Signal de commande (PWM).....	60
<b>Figure.4.22.</b> Signal de sortie pour une consigne $U_c=45$ .....	60
<b>Figure.4.24.</b> Signal de sortie pour une consigne $U_c=60$ .....	61

## Liste des tableaux

<b>Tableau.2.1.</b> Caractéristiques de l'ARDUINO UNO.....	15
<b>Tableau.2.2.</b> Caractéristiques de l'ATMega328.....	16
<b>Tableau.2.3.</b> Liste des commandes du SHT-75.....	20
<b>Tableau.2.4.</b> caractéristiques du moteur 919D.....	22



# Introduction générale

---

Avec La croissance démographique que le monde avait connue au cours du ce dernier siècle, l'être humain a commencé de penser à développer le secteur industriel pour satisfaire aux besoins humains. Le développement de l'industrie de la volaille au cours des années est absolument remarquable et l'évolution des incubateurs artificiels n'est pas moins extraordinaire, afin de faire face à un marché de plus en plus concurrentiel et conditionné par des normes de qualité sévères.

En effet, les marchés des incubateurs ont été obligés de modifier et adapter leurs moyens de production. Actuellement, les incubateurs sont devenus très sophistiqués grâce au développement de l'électronique et l'automatisation des systèmes.

La température et l'humidité sont deux grandeurs indispensables et leurs régulations parfaites expliquent la réussite de ces machines.

Le système réalisé dans ce projet constitue essentiellement d'une petite chambre de 100×60×40 cm, la face inférieure est occupée d'une résistance chauffante et un ventilateur qui fait le retournement de l'air à l'intérieur de la couveuse, de plus la face supérieure est occupée de deux supports un pour le capteur et un pour le moteur de retournement des plateaux d'œufs et un ventilateur de renouvellement d'air. Et bien évidemment, la partie électronique comporte une carte de puissance, une carte d'interface, un contrôleur, un capteur et un moteur.

# **Chapitre 1 Généralités**

# Chapitre 1 Généralités

---

## 1.1. Introduction :

Dans l'industrie, la régulation de la température et de l'humidité est essentielle. En effet, le contrôle de ces deux grandeurs physiques avec une grande précision est important pour plusieurs secteurs.

Prenons comme exemple le domaine biologique, les serres pour la production artificielle des fruits et légumes, les chambres froides utilisées pour la conservation des produits agroalimentaire, et aussi l'incubation artificielle des œufs qu'on va étudier dans ce travail.

## 1.2. Les types d'incubation :

### 1.2.1. Type naturelle :

En fonction de sa taille, la poule peut couvrir 8 à 14 œufs. Elle commence la couvée lorsqu'elle a fini de pondre. Cette phase de couvaison se caractérise par une maintenance dans le nid, le retournement des œufs et une posture agressive lors d'une approche. En effet, la poule ne



**Figure 1.1.** Une poule couveuse.

quitte le nid que très brièvement pour s'alimenter et boire. En outre, elle a besoin du calme pour mener à bien la couvée. Pendant la couvée, elle fournit la température, l'humidité et la ventilation nécessaires au bon développement des œufs. L'éclosion intervient au bout de 21 jours d'incubation. Le taux d'éclosion varie selon plusieurs

facteurs. Ainsi, des études rapportent respectivement des taux d'éclosion qui varie entre 50% et 60%. Après l'éclosion, la poule prend soin de ses poussins en leur apprenant à rechercher la nourriture et les protège également des agressions extérieures. Les activités de couvain et d'élevage des poussins accroissent la longueur du cycle reproductif chez la poule locale de 58 jours pour atteindre environ 74 jours (16 jours de ponte et de constitution de la couvée + 21 jours d'incubation + 37 jours d'élevage des poussins = 74 jours). Cette situation constitue une limite à la productivité de la poule et l'incubation artificielle pourrait être une solution à envisager pour augmenter le rendement de la production. [1]

### 1.2.2. Type artificielle :

L'incubation artificielle est l'ensemble des opérations qui, à partir d'une quantité d'œufs pondus, permet d'obtenir le maximum de poussins viables au coût le plus bas possible. Cette technique utilise des incubateurs qui sont conçus pour régulariser



Figure 1.2. Exemple d'un incubateur

la chaleur, l'humidité, la ventilation et la rotation des œufs afin d'accomplir un développement embryonnaire normal.

La couveuse artificielle ou "l'incubateur" ne date pas d'aujourd'hui. En effet, depuis plusieurs siècles les Égyptiens construisaient ces machines. En Égypte ancienne ils s'appelaient "les Mammals". C'étaient de véritables constructions en maçonnerie comportant des fours chauffés à la bouse de chameau au-dessus desquels se trouvaient les chambres d'incubation. Un seul homme s'occupait d'un Mammal pouvant incuber plusieurs œufs. Il n'était pas rétribué mais tirait son bénéfice de sa production en livrant 80 poussins pour 100 œufs mis à couvrir. Actuellement presque tous les incubateurs fonctionnent à l'électricité, il existe d'autres modèles à pétrole et à gaz. [1]

### 1.1.3. Type mixte :

Ce dernier type d'incubation mix les deux classes citées ci-dessus, à savoir commencer cette incubation sous des poules et terminer dans la couveuse artificielle, ou bien l'inverse. [5]

## I.2.L'incubation artificielle :

### I.3.1. Principe d'incubation artificielle :

Le principe d'incubation est toujours le même : une enceinte étanche, généralement doublée de matériaux isolants « dans notre PFE on a utilisé des panneaux sandwich », Dans laquelle se trouve principalement une source de chaleur, une source d'humidité et accessoirement des orifices permettant le renouvellement progressif d'air. On peut également y trouver des mécanismes facilitant le retournement des œufs.

Il existe deux modèles d'incubateurs artificiels : les incubateurs à ventilation naturelle ou statique et les incubateurs à ventilation forcée ou dynamique où l'air est renouvelé par un ventilateur. [2]

### 1.2.2. Les modèles d'incubateurs artificiels :

#### a. Les incubateurs statiques :

Dans les couveuses statiques le chauffage s'effectue en haut. Pour des modèles électriques il s'agit d'une résistance chauffante tapissant la face inférieure du plafond, de même, il existe d'autres types qui utilisent des lampes classiques. Dans des modèles à gaz ou à pétrole, le chauffage se fait par une flamme permanente ou bien par l'intermédiaire d'un réservoir d'eau chaude.



**Figure 1.3.** Couvereuse classique.

Selon ses incubateurs, la température est toujours élevée en haut qu'en bas à cause de l'emplacement des sources de chaleur, et en plus l'air chaud se rassemble vers le sommet de l'enceinte fermée. Par conséquent, la température de la couveuse est de plus en plus basse en allant de haut vers le bas. C'est pour cela les œufs sont disposés sur un seul plateau sur le même niveau, pour bénéficier de la même température.

La température doit être fixée à 39°C, et elle est mesurée au sommet des œufs. De plus, le retournement des œufs cinq à sept fois par jour est nécessaire. [3]

**b. Les incubateurs dynamiques :**

Dans ce genre d'incubateurs, l'air intérieur est brassé par un ventilateur. Ce dernier doit être placé loin des œufs et des poussins naissants, et il doit être protégé par une grille pour ne pas les blesser. Il existe d'autres modèles où l'air est aspiré par un aspirateur de haut ou de bas puis le réinjecté à l'autre part après une phase de réchauffage et de filtrage. Par conséquent, la température est parfaitement uniforme dans l'ensemble de l'appareil. C'est pour



cela qu'on peut y mettre les plateaux d'œufs

**Figure 1.4.** Une couveuse dynamique

sur différents niveau. Dans ce type de couveuses, la température doit être réglée à 37,8°C ou 38°C, et elle est mesurée au sommet des œufs.

Notons que les modèles dynamiques sont plus techniques que les modèles statiques. [3]

**1.3. Paramètres agissant sur l'incubation artificielle :**

**1.3.1. La température :**

Le paramètre température joue un rôle très important pendant la régulation de l'incubateur artificiel. En effet, en cours d'incubation, les paramètres à considérer sont :

- un refroidissement de 20°C pouvant aller jusqu'à 12 heures.
- Il ne faut pas compenser un refroidissement par une élévation de température.
- On peut considérer notre couveuse comme fortement compromise si  $T=40^{\circ}\text{C}$
- Les surchauffes provoquent un développement anarchique des cellules et donnent des poussins déformés.
- Il est déconseillé d'atteindre une température de 44°C, parce qu'à partir de cette température les œufs sont à jeter. [4]

### **1.3.2. L'humidité :**

Les effets des paramètres de l'humidité de l'air ou humidité relative (RH) sur les résultats d'incubation sont importants, ces paramètres sont :

- L'œuf perd beaucoup d'humidité à travers les pores de sa coquille, donc il faut éviter la déshydratation des œufs en contrôlant l'humidité dans la couveuse.
- L'humidité assure le bon développement de l'embryon mais également facilite le bêcheage en rendant la coquille plus fragile.
- Pendant l'éclosion, le bon niveau d'humidité doit être maintenu. Si l'air est sec, les poussins se déshydratent rapidement et meurent.
- Les meilleurs résultats d'incubation sont obtenus avec une humidité relative à de 50 à 60% pendant les 18 premiers jours, et de 75% au plus pendant les trois derniers jours d'incubation. [4]

### **1.3.3. L'aération :**

L'œuf à couver est un être vivant qui respire, une bonne ventilation est donc nécessaire pour assurer le bon développement de l'embryon. La ventilation apporte de l'oxygène O<sub>2</sub> à l'embryon et élimine le dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> excédentaire. Le renouvellement d'air est réalisé par le réglage des trappes d'entrée et de sortie d'air au niveau des couveuses. En outre, la ventilation permet de régler la température et l'humidité dans la couveuse. [4]

### **1.3.4. Le retournement des œufs :**

- L'opération de retournement a pour but d'éviter le collage de l'embryon sur la coquille, d'éviter au maximum les positions anormales de l'embryon et de permettre également une meilleure répartition de la chaleur sur toute la surface des œufs.
- Le retournement des œufs s'effectue entre deux positions possibles ; 45 degré par rapport à la verticale
- Ce dernier doit s'effectuer au minimum sept fois par jour.
- Tout choc exagéré provoque la mort des embryons. [4]

## **1.4. Les Étapes d'incubation artificielle :**



### 1.4.1. Tri et désinfection des œufs :

Le tri a pour objectif d'obtenir un taux élevé de réussite à l'incubation. Les œufs à couvrir doivent être frais, propres, de poids convenable et sans anomalies de taille et de forme. Ainsi donc, les œufs présentant des anomalies de la coquille et des formes anormales sont à écarter. Les meilleurs résultats d'éclosion s'obtiennent avec des œufs âgés de 3 à 4 jours et de poids compris entre 30 et 70 g en fonction des races.



*Figure 1.5.* Tri et désinfection des œufs

Les œufs de 55 à 60 g éclosent mieux que ceux de 60 à 70 g. Cependant, ces œufs doivent être fécondés et provenus de poules saines et bien nourries. En effet, leur insuffisance alimentaire réduit la fertilité des œufs et augmente la mortalité embryonnaire.

La désinfection a pour but d'éliminer les impuretés et germes qui se trouveraient sur la coquille des œufs et qui pourraient compromettre les résultats d'éclosion. Cette opération doit être effectuée rapidement après la collecte des œufs. Toutefois, il est déconseillé de laver les œufs à l'eau sous peine d'éliminer la fine couche protectrice qui les recouvrent et les protègent des invasions microbiennes. Différentes méthodes de désinfection sont utilisées. Cette opération doit être réalisée dans une salle à une température de 22 à 26°C pendant 20 à 30 minutes. [2]

### 1.4.2. Stockage des œufs :

Après la désinfection, les œufs doivent être conservés dans un local aéré mais à l'abri des courants d'air, du soleil et des poussières. La durée de conservation des facultés d'éclosion des œufs dépend de la température de la pièce dans laquelle les œufs sont stockés avant l'incubation. Pour une température de stockage de 7 à 15°C, la conservation des facultés



d'éclosion est bonne pendant 6 jours. Ensuite, elle diminue progressivement à partir du début de la seconde semaine. La température de la salle de stockage doit être maintenue entre 17 et 18°C pour une durée de 3 à 4 jours.

Afin de limiter les pertes d'eau par évaporation qui aura pour effet d'abaisser le taux d'éclosion et la vitalité du poussin, l'humidité relative de la salle de stockage doit être maintenue entre 70 et 85%. Durant leur stockage, les œufs à couvrir sont placés dans une position pointe en bas pour un stockage de courte durée. Pour des durées de stockages supérieurs à 7 jours, un stockage pointe en haut permet de limiter les pertes d'éclosion dues au stockage. Aussi, il est recommandé de les retourner pendant le stockage afin d'éviter que le jaune adhère à la coquille. Les œufs ne doivent jamais être stockés directement sur le sol, mais sur des palettes en bois ou de préférence en plastique. [2]

#### **1.4.3. Préchauffage et incubation des œufs :**

Pour obtenir un bon taux d'éclosion, il est nécessaire de préchauffer les œufs avant leur mise en incubation. Ce procédé permet d'éviter un choc thermique aux œufs et également un démarrage plus rapide et plus homogène au développement des embryons. Un préchauffage compris entre 25°C et 28°C est préférable pendant une heure.

L'un des facteurs essentiels de la réussite de l'incubation est la régulation parfaite de la température, surtout pendant la première semaine. Pour les couveuses à ventilation naturelle, la température optimale doit être maintenue à 38,9°C lors des deux premières semaines d'incubation, et ramenée à 36,1°C à partir du 19<sup>ème</sup> jour d'incubation. Cela est dû au fait que les poussins produisent aussi de la chaleur. Pour les couveuses à ventilation forcée, la température idéale pour un meilleur développement de l'embryon et une éclosion optimale, est de 37,7°C ou 37,8°C. Cette température est déterminante également pour la croissance correcte du poussin après l'éclosion. Les basses températures retardent l'éclosion et ses effets sont très déconseillés par rapport aux températures élevées. [2]

#### **1.4.4. Mirage des œufs :**

Le mirage est une opération qui consiste à éclairer l'intérieur de l'œuf à l'aide d'un appareil appelé mireuse ou mire-œuf doté d'une source lumineuse. Le mirage est une opération très importante car il permet de détecter les œufs clairs (non fécondés), les



permet le transport des poussins sur de grandes distances et pendant plusieurs jours sans qu'il faille les nourrir ou les abreuver. [2]

### **1.5. Conclusion :**

L'incubation naturelle reste le plus actif mais ça donne une production trop faible. En effet l'incubation artificielle est recommandée pour satisfaire et servir le besoin de la population.

Le bon fonctionnement de ses couveuses est basé sur la bonne régulation de température et d'humidité. Les pertes en productions expliquent les erreurs de réglages de ces deux paramètres.

Pour produire une couveuse compétente et capable à donner un rendement approprié, il faut bien choisir les éléments électroniques telle que le capteur, le contrôleur...etc. Dans le chapitre II on va présenter notre matériel utilisé dans la production de cette couveuse.

## **Chapitre 2 Description du** **matériel utilisé**

## Chapitre 2 : description du matériel utilisé

---

### 1.1. Introduction :

L'incubateur est une chambre conditionnée ayant deux paramètres essentielles de conditionnement qui sont : la température et l'humidité ; ces deux paramètres sont les paramètres les plus influant sur le couvage des poussins et pour le contrôle de ces deux paramètres on a été obligé de concevoir et réaliser un espace dans lequel on peut varier ces paramètres selon les conditions demandés. Pour cela il nous a fallu réaliser la partie mécanique puis la partie électronique et finalement la partie automatique.

#### Partie mécanique :

Dans cette partie le matériel utilisé est :

- Les parois en panneau sandwich : ce sont deux plaques métalliques de fine épaisseur superposés variant de 0.3 à 0.5 mm entre les quelles une mousse isolante les sépare pour éliminer le plus que possible le transfert de chaleur entre l'espace conditionné et l'extérieur.
- Des tôles de profil en L (ou bien cornière) en inox pour l'assemblage des parois. Ces cornières assemblent les parois par des rivets de 5mm de diamètre accès pour réaliser un incubateur plus volumétrique que celui utilisé dans notre projet.
- Une portière de même matériau est fixée par des pommelles métalliques et un verrou.
- L'étanchéité entre la portière et l'incubateur est assuré par joint d'étanchéité en caoutchouc collé sur la bordure de la portière.

- Le mécanisme pivotant fixe à l'intérieur de l'incubateur actionné par un moteur donnant le système manivelle-bielle qui assure le mouvement oscillatoire du mécanisme. Le mécanisme est constitué par 5 plateaux porteurs d'œufs de superficie  $40 \times 30 \text{ mm}^2$  puis sont fixés par 4 tiges sur les 4 coins et séparé entre eux d'une distance égale environ 10 à 12 cm pour assurer le passage d'aire conditionnés.
- Et tout autre organe électronique nécessaire est additionné dans et à l'extérieur de la chambre.

### Partie électronique

#### 2.1. Le bus I<sup>2</sup>C "Inter Integrate Circuit" :

Le bus I<sup>2</sup>C est un bus qui permet d'établir une connexion série synchrone entre deux ou plusieurs composants. Ce qui le différencie par rapport à d'autres bus, c'est sa diversité aux niveaux de ses utilisations. En effet, il existe une multitude de périphériques utilisant ce bus, de manière software (à travers des logiciels).

Le but d'utiliser ce dernier est de réduire le nombre de fils utilisés. On peut attribuer à ce bus le nom TWI. [6]

##### 2.2.1. Caractéristiques du bus :

C'est un bus de type série, synchrone et il fonctionne sur un système bidirectionnel half-duplex, c'est à dire que ce bus a besoin de trois fils pour fonctionner, les informations transitent dans les deux sens sur un même fil mais dans des temps différents.

Les trois fils sont :

- Le SDA (Serial Data Line) : c'est la ligne où passe les données dans les deux sens.
  - Le SCL (Serial Clock Line): c'est la ligne où passe le signal d'horloge pour la synchronisation.
  - La masse : c'est une ligne qui doit être commune à tous les équipements.
- Ce Bus fonctionne sur une base de maître et esclave, les données transitent exclusivement à la demande du maître vers tous les esclaves.
  - Le SCL est gérée par le maître.

- Le SDA est piloté par celui qui envoie l'information : le maître ou l'esclave. [6]

### 2.2.3. Principe de fonctionnement :

Un exemple type d'échange entre le maître et l'esclave :

Cela commence par un bit de Start, puis l'adresse du composant esclave, suivi du bit de lecture ou écriture mis à zéro (R/W=0). L'esclave répond au maître par un bit d'acquittement (ACK) puis peut demander une pause. Une fois la pause terminée, le maître envoie les données puis reçoit un bit d'acquittement ou de non-acquittement envoyé par l'esclave, il peut alors demander une pause. Le maître envoie un bit de restart, puis désigne le même esclave avec cette fois le bit d'écriture ou lecture à un (R/W=1), le maître devient alors récepteur et l'esclave émetteur. L'émetteur envoie alors une série de données, toujours suivies d'un bit d'acquittement envoyé par le maître. Une fois le dialogue terminé, le maître envoie un bit de non-acquittement pour terminer l'échange ainsi qu'un bit de stop à tous les esclaves.

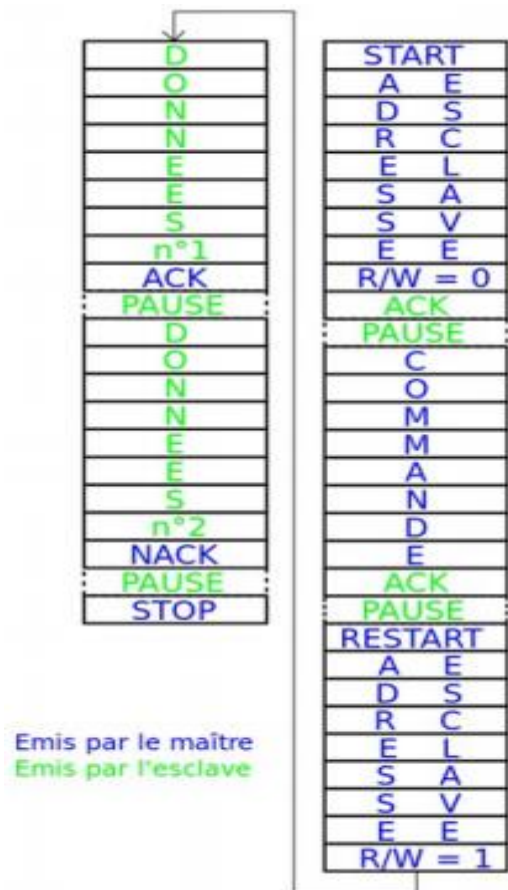


Figure.2.1 Exemple d'échange d'information

Pour plus de détails voir le protocole I<sup>2</sup>C [Annexe A](#).

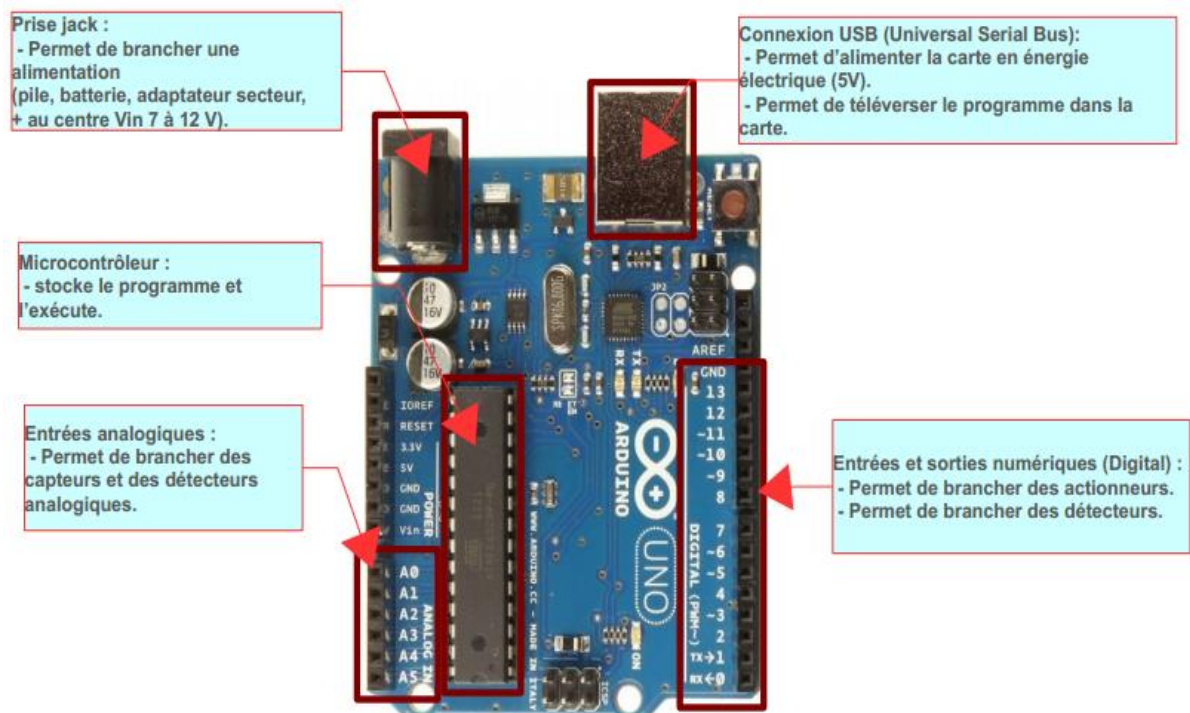
### 2.3. La carte ARDUINO UNO :

Une carte Arduino Uno est une petite carte électronique (5,33 x 6,85 cm<sup>2</sup>) équipée d'un microcontrôleur ATmega328. Le microcontrôleur permet à partir des événements détectés par des capteurs, de programmer et commander des actionneurs ; la carte Arduino est donc une interface programmable, dont la programmation peut être réalisée en langage Arduino.

L'intérêt principal des cartes ARDUINO est leur facilité de mise en œuvre. ARDUINO fournit un environnement de développement s'appuyant sur des outils open source. Le chargement du programme dans la mémoire du microcontrôleur se fait de façon très simple par port USB. [13]

La carte Arduino Uno dispose essentiellement de :

- 14 broches numériques d'entrées/sorties (dont 6 peuvent être utilisées en sorties PWM (largeur d'impulsion modulée)).
- 6 entrées analogiques.
- Un quartz 16Mhz.
- Une connexion USB.
- Un connecteur d'alimentation jack.
- Un connecteur ICSP (In-Circuit Serial Programming)
- Un bouton de réinitialisation (reset).



**Figure.2.2** la carte ARDUINO UNO



### 2.3.1. Synthèse des caractéristiques de l'ARDUINO :

Microcontrôleur	ATmega328
Tension de fonctionnement	5V
Tension d'alimentation (recommandée)	7-12V
Tension d'alimentation (limites)	6-20V
Broches E/S numériques	14 (dont 6 disposent d'une sortie PWM)
Broches d'entrées analogiques	6 broches
Intensité maximum disponible par broche E/S (5V)	40 mA
Intensité maxi disponible pour la sortie 3.3V	50 mA
Intensité maxi disponible pour la sortie 5V	Fonction de l'alimentation utilisée - 500 mA max, si le port USB est utilisé seul
Mémoire Programme Flash	32 KB (ATmega328)
Mémoire SRAM (mémoire volatile)	2 KB (ATmega328)
Mémoire EEPROM (mémoire non volatile)	1 KB (ATmega328)
Vitesse d'horloge	16 MHz

**Tableau.2.1** Caractéristiques de l'ARDUINO UNO

### 2.3.2. Le cœur de la carte " ATmega 328 " :

Le microcontrôleur utilisé sur la carte Arduino UNO est un ATmega328 disponible en boîtier DIP (Dual Inline Package), c'est un microcontrôleur ATMEL de la famille AVR 8bits. Ses principales caractéristiques sont :

La mémoire	FLASH = mémoire programme de 32Ko RAM = données (volatiles) 2Ko EEPROM = données (non volatiles) 1Ko
Nombre de ports	3ports : PortB, PortC, PortD (soit 23 broches en Input/Output).
Les timers	Timer0 et Timer2 (comptage 8 bits). Timer1 (comptage 16bits). Chaque timer peut être utilisé pour générer 2 signaux PWM.
Gestion bus I2C	le bus est exploité via les broches SDA(PC5)/SCL(PC4).
Convertisseur analogique /numérique	Analog to Digital Converter (résolution 10bits) = 6 entrées multiplexées ADC0(PC0) à ADC5(PC5)
Port série (USART)	émission/réception série via les broches TXD(PD1)/RXD(PD0)
Comparateur Analogique	broches AIN0(PD6) et AIN1 (PD7)
Watchdog	Timer programmable.

Tableau.2.2 Caractéristiques de l'ATMega328 [14]

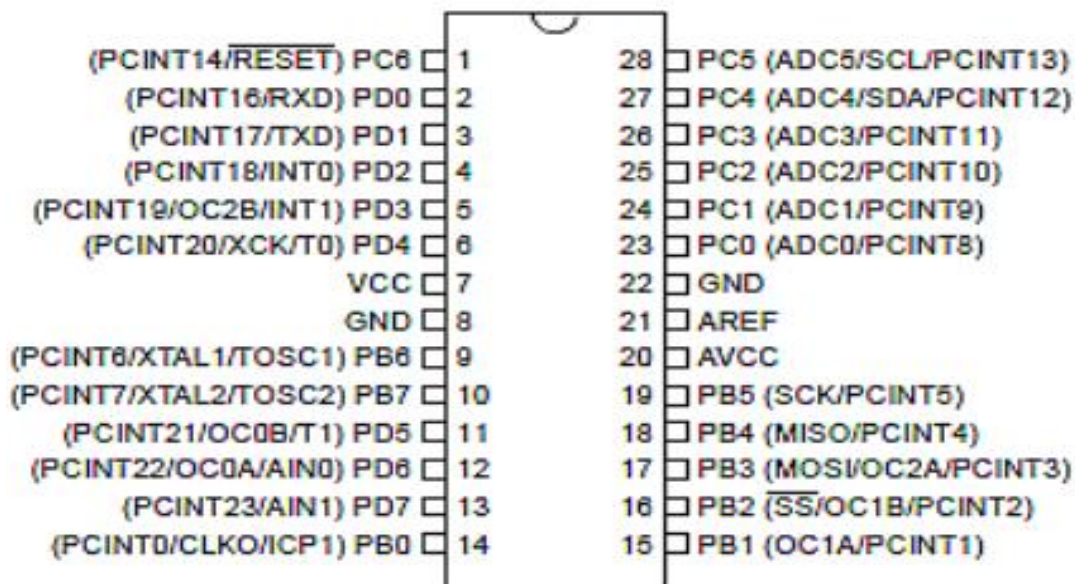


figure.2.3. Les pins du l'ATMega328 [14]

Pour plus de détails sur l'ATMega328 voir Annexe B.

## 2.4. Le Plan Mémoire :

Trois types de mémoire sont utilisés dans l'ATMEGA, la mémoire programme FLASH, la mémoire de donnée SRAM et la mémoire morte de type EEPROM.

### 2.4.1. La mémoire programme :

La mémoire programme de type FLASH permet de stocker et de faire fonctionner le microcontrôleur, elle contient 32 Ko de programme. Le nombre d'écriture sur cette mémoire est 10 Ko, largement suffisant pour la majorité des applications.

### 2.4.2. La mémoire des données :

La mémoire des données contient 32 registres de travail, 64 registres de commande et une mémoire SRAM (Static Random Access Memory) pour les variables du programme de 2Ko pour l'ATMEGA 328.

### 2.4.3. La mémoire morte :

La mémoire morte de type EEPROM (Electrical-Erasable Programmable Read-Only Memory) est une mémoire programmable est effaçable électriquement l'accès à cette mémoire contiendra la configuration du programme et les données importantes qui seront sauvé pendant l'absence de courant électrique. La taille de l'EEPROM contenu dans l'ATMega328 est 1Ko. [14]

## 2.5. Les Entrées / Sorties :

### 2.5.1. Les broches numériques :

Chacune des 14 broches numériques de la carte UNO (numérotées de 0 à 13) peut être utilisée soit comme une entrée numérique, soit comme une sortie numérique, en utilisant les instructions pinMode(), digitalWrite() et digitalRead() du langage Arduino. Ces broches fonctionnent en 5V. Chaque broche peut fournir ou recevoir un maximum de 40 mA d'intensité et dispose d'une résistance interne de "rappel au plus" (pull-up) (déconnectée par défaut) de 20-50 KOhms. Cette résistance interne s'active sur une broche en entrée à l'aide de l'instruction digitalWrite (broche, HIGH).

De plus, certaines broches ont des fonctions spécialisées :

- **Communication Série** : Broches 0 (RX) et 1 (TX). Utilisées pour recevoir (RX) et transmettre (TX) les données séries. Ces broches sont connectées aux broches correspondantes du circuit intégré ATmega328 programmé en convertisseur USB vers la communication série de la carte.
- **Interruptions Externes** : Broches 2 et 3. Ces broches peuvent être configurées pour déclencher une interruption sur une valeur basse, sur un front montant ou descendant, ou sur un changement de valeur.
- **Impulsion PWM (largeur d'impulsion modulée)** : Broches 3, 5, 6, 9, 10, et 11. Fournissent une impulsion PWM 8 bits à l'aide de l'instruction `analogWrite()`.
- **SPI (Interface Série Périphérique)** : Broches 10, 11, 12, 13. Ces broches supportent la communication SPI (Interface Série Périphérique) disponible avec la librairie pour communication SPI. Les broches SPI sont également connectées sur le connecteur ICSP (Interface Connector Série Périphérique).
- **I<sup>2</sup>C** : Broches 4 (SDA) et 5 (SCL). Supportent les communications de protocole I2C (ou interface TWI, disponible en utilisant la librairie `Wire/I2C`).
- **LED** : Broche 13. Il y a une LED incluse dans la carte connectée à la broche 13. Lorsque la broche est au niveau haut, la LED est allumée, lorsque la broche est au niveau bas, la LED est éteinte. [14]

### 2.5.2. Entrées analogiques :

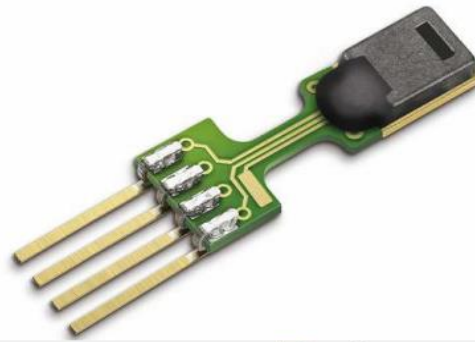
La carte Uno dispose de 6 entrées analogiques (numérotées de 0 à 5), chacune pouvant fournir une mesure d'une résolution de 10 bits (c-à-d sur 1024 niveaux soit de 0 à 1023) à l'aide de la très utile fonction `analogRead()` du langage Arduino. Par défaut, ces broches mesurent entre le 0V (valeur 0) et le 5V (valeur 1023), mais il est possible de modifier la référence supérieure de la plage de mesure en utilisant la broche AREF et l'instruction `analogReference()` du langage Arduino. [13]

## 2.6. Le capteur SHT-75 :

Un capteur est un transducteur capable de transformer une grandeur physique en une autre grandeur électrique (tension) utilisable par l'homme par le biais d'un instrument approprié.

Le SHT75 est un capteur numérique de température et d'humidité relative en boîtier SIP (Single Inline Package) 4 broches. Ce capteur intègre des éléments de capteur

**SENSIRION**  
THE SENSOR COMPANY



*figure.2.4.* Le SHT75

et de traitement de signaux dans un format compact. Offre une sortie numérique entièrement calibrée. Un élément de capteur capacitif unique est utilisé pour mesurer l'humidité relative, tandis que la température est mesurée par un capteur à bande interdite. La technologie CMOS appliquée, garantit une excellente fiabilité et une stabilité à long terme. Le SHT75 est couplé à un convertisseur A/N 14 bits et à un circuit d'interface série. Cela permet une qualité supérieure des signaux, un temps de réponse rapide et une insensibilité aux perturbations externes. L'interface série 2 fils et la régulation de tension interne permet une intégration au système particulièrement aisée. Du fait de sa taille compacte et de sa faible consommation, le SHT75 constitue le choix idéal pour les applications les plus exigeantes comme dans notre projet.

### 2.6.1. Caractéristiques techniques :

- Précision d'humidité relative de  $\pm 1.8\%RH$ .
- Faible consommation et excellente stabilité à long terme.
- Résolution d'humidité relative de  $0.05\%RH$  (12 bits).
- Résolution de température de  $0.01^{\circ}C$  (14 bits).
- Précision de température de  $\pm 0.3^{\circ}C$ .
- Plage d'humidité relative de 0% à 100 % RH.
- Temps de réponse d'humidité relative de 8s.

- Gamme de température de -40°C à 123.8°C.
- Temps de réponse de température de 5 à 30s.
- Gamme de tension d'alimentation de 2.4 à 5.5V. [15]

### 2.6.2. Principe de fonctionnement :

#### a. Alimenter le capteur :

Dans un premier temps, le capteur est alimenté à l'alimentation choisie tension VDD. Le taux de vitesse pendant la mise sous tension ne doit pas tomber en dessous de 1V / ms. Après la mise sous tension, le capteur a besoin de 11ms pour aller à l'état de sommeil. Aucune commande ne doit être envoyée avant ce temps.

#### b. Envoi d'une commande :

Pour lancer une transmission, une séquence de démarrage de transmission doit être émise. Il consiste à abaisser la ligne DATA tandis que SCK est élevé, suivi d'une faible impulsion sur SCK et en augmentant les Données lorsque SCK est encore haut.

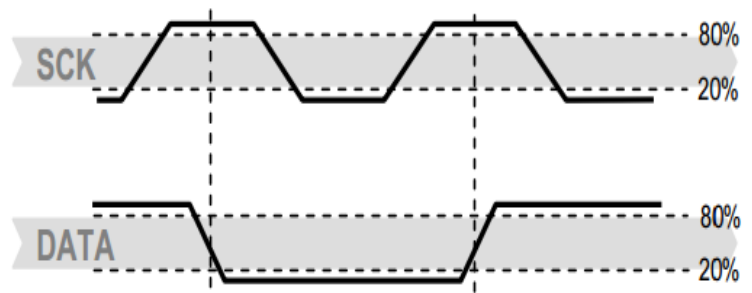


Figure.2.5. Condition de démarrage de transmission

#### c. Liste des commandes du SHT-75 :

Commande	Code de commandement
Réservé 0000x	0000x
Mesurer la température	00011
Mesurer l'humidité relative	00101
Lire Statut Enregistrer	00111
Enregistrement d'état d'écriture	00110
Réservé	0101x-1110x
La réinitialisation logicielle	11110

Tableau.2.3. Liste des commandes du SHT-75.

### d. Principe de mesure de l'humidité relative et la température :

Après avoir émis une commande de mesure ('00000101' pour Humidité relative, '00000011' pour la température). Le contrôleur doit attendre que la mesure soit terminée. Ceci prend un maximum de 20 à 320 ms pour une mesure de 8 à 14 bits. Le temps varie selon la vitesse de l'oscillateur interne et peut être inférieur à 30%. À Signaler l'achèvement d'une mesure, le SHT75 tire Ligne de données faible et entre en mode veille. Le contrôleur doit Attendre ce signal prêt du DATA avant de redémarrer SCK à Lire les données. Les données de mesure sont stockées, le contrôleur peut donc continuer avec d'autres tâches jusqu'à la lecture.

Les deux octets de données de mesure et l'octet de CRC checksum (facultatif) sera alors transmise. Le microcontrôleur doit reconnaître chaque octet en tirant la ligne de data LOW. La communication se termine après le bit d'acquiescement ACK des données CRC. Si la somme de contrôle CRC n'est pas utilisée, Le contrôleur peut mettre fin à la communication après la donnée de mesure LSB en maintenant ACK élevé. Le dispositif retourne automatiquement en mode Veille après la mesure, la communication est terminée.

Pour garder l'auto-chauffage en dessous de 0,1 ° C, SHT75 ne devrait pas être actif pendant plus de 10% du temps, par exemple : maximum une mesure par seconde à une précision de 12 bits Doit être faite.

Pour plus de détails sur le SHT-75 voir (datasheet) Annexe C.

### 2.7. Moteur 919D801:1 de retournement :

Ce moteur est conçu pour lourds applications industrielles et le modèle de cet appareil robuste dispose d'une haute puissance, trois pôles avec moteur coussinets en bronze fritté. La boîte de vitesses tout en acier comporte des paliers en bronze de sortie, permettant à la haute transmission de couple à partir du moteur à transmettre par la boîte de vitesses. [7]

Le moteur est monté sur un support en acier de 1 mm d'épaisseur plaqué. Dans notre projet on va utiliser ce dernier pour faire retourner les plateaux des œufs.

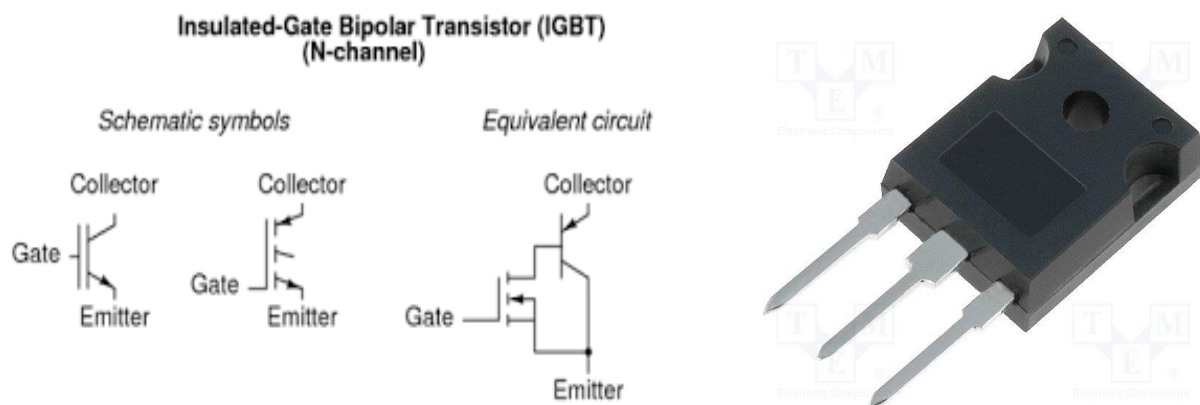
Fabricant Code partie	919D801 :1
Tension d'alimentation	DC 4,5 V – 15 V
Vitesse de rotation	20 t/min à 12 V
Consommation à vide	- 0,45 A à 6 V - 0,52 A à 12 V
Consommation en charge	- 2,10 A à 6 V - 2,85 A à 12 V
Le couple	60 N.cm
Diamètre de l'axe	6 mm
Longueur de l'axe	15 mm

**Tableau.2.4.** caractéristiques du moteur 919D [16]

## 2.8. Autres accessoires nécessaires :

### 2.8.1. L'IGBT :

Le transistor bipolaire à grille isolée IGBT est un dispositif semi-conducteur de la famille des transistors, qui est utilisé comme interrupteur électronique unidirectionnel en tension et en courant, utilisé principalement dans les montages de l'électronique de puissance. EN effet, il peut faire passer une tension maximale de 900V ( $V_{CE(sat)}$ ) et un courant de 28A ( $I_C$ ) avec une tension de commutation de 15V ( $V_{GE}$ ).



**Figure.2.6.** Schémas symbolique du transistor IGBT



Plus de détails techniques voir [Annexe D](#).

### 2.8.2. L'optocoupleur :

Un photocoupleur, ou optocoupleur, est un composant électronique capable de transmettre un signal d'un circuit électrique à un autre, sans qu'il y ait un contact galvanique entre eux. Un optocoupleur repose sur une LED et un phototransistor ou une photodiode. Lorsqu'on fait passer un courant dans la LED. Elle brille (elle émet de l'infrarouge) dans un boîtier bien hermétique à la lumière. La lumière émise par la LED est captée par le phototransistor qui devient alors transmetteur. On peut donc transmettre un courant électrique sans contact électrique. Dans son principe, l'optocoupleur fait les conversions successives : courant électrique - lumière infrarouge - courant électrique. [7]



Figure.2.7. Schémas symbolique de l'optocoupleur

### 2.8.3. Le pont H L6203 :

Le L6203 est un driver pont complet pour les applications de commande moteur, Il est possible d'activer la rotation d'un moteur à l'aide des transistors de puissance. Ces transistors peuvent fonctionner à des tensions d'alimentation jusqu'à 52V et des courants importants jusqu'à 5A et à des vitesses de découpage élevées. [7]

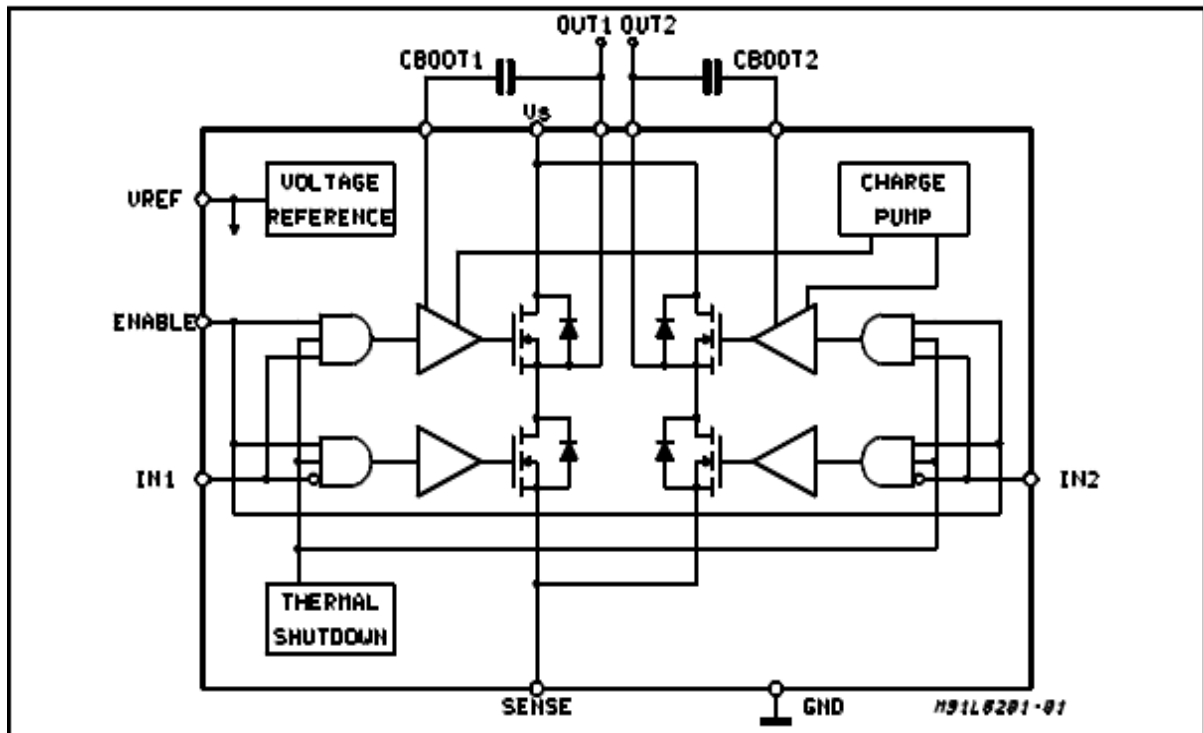


Figure.2.8. Schémas du pont H.

Le principe de fonctionnement est simple, le pin Enable est active, c'est avec lui qu'on commande la vitesse de rotation du moteur, les pins IN1 et IN2 sont les pins du sens de rotation du moteur. Si IN1 est activé le moteur tourne dans le sens direct, et si IN2 est activé le moteur tourne dans le sens inverse ou bien l'inverse. Attention, il ne faut pas que les deux pins soient actifs car ça va pas marcher et aussi peut causer des problèmes de court-circuit et ça peut même endommager notre moteur.



Figure.2.9. Le pont H L6203.

### 2.8.3. Régulateur LM7812C :

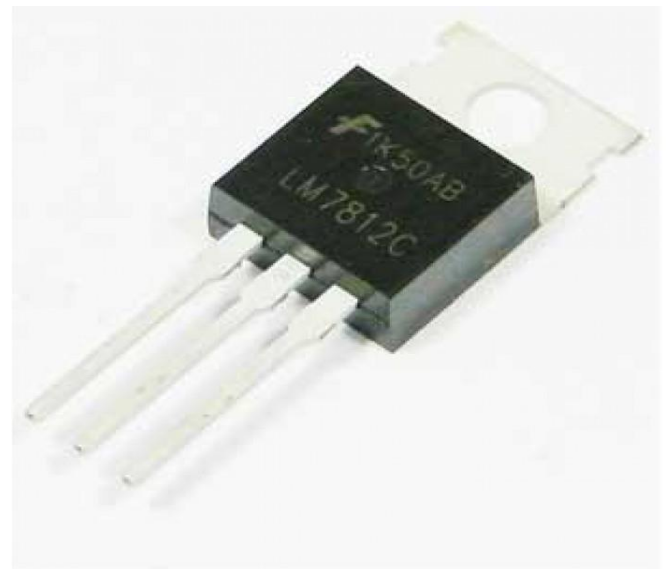
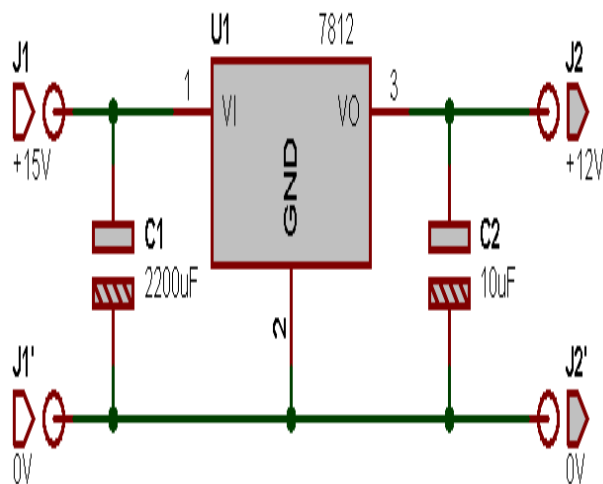
Un régulateur de tension, est un organe électronique qui maintient à sa sortie, dans certaines limites, une tension constante, indépendante de la charge et de la tension d'entrée.

Le LM7812C est un régulateur de tension positive à trois bornes. Ce régulateur peut fournir une réglementation locale sur carte.

Il utilise une limite interne de courant, une fermeture thermique et une protection sécurisée, ce qui le rend essentiellement indestructible. Il peut être utilisé avec des composants externes pour obtenir une tension et des courants réglables.

Principalement il est caractérisé de :

- Courant de sortie jusqu'à 1,5 A.
- Tension d'entrée jusqu'à 35V.
- Tension de sortie fixe 12V.
- Protection contre les surcharges thermiques.
- Protection de court-circuit. [ 7 ]



*Figure.2.10.* Schéma équivalent de l'LM7812.

### 2.9. Réalisation de circuit du système :

Au cours de la réalisation du circuit du système, on a construit deux cartes au lieu d'une seule, une carte de puissance qui contient le circuit puissant et une carte d'interface qui contient le circuit d'interface.

Les circuits réalisés ont été fait avec le logiciel EAGLE (logiciel pour construction des circuits électrique). Et les deux cartes sont :

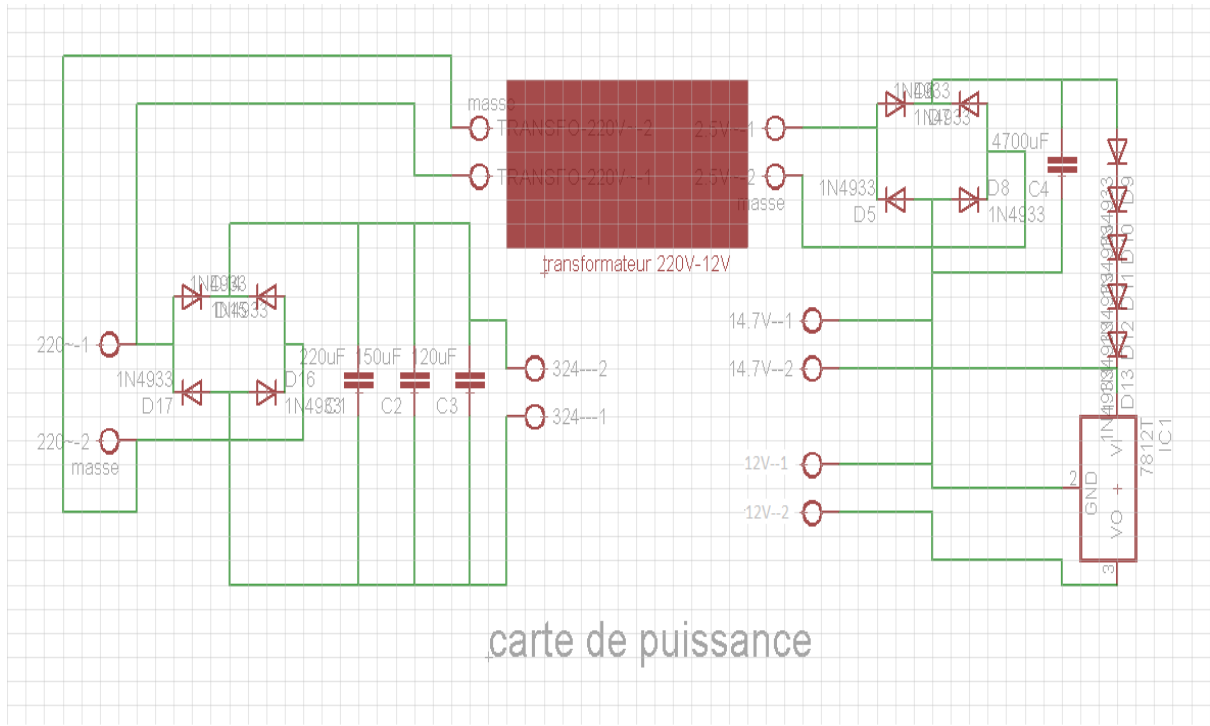


Figure.2.11. Schéma circuit de puissance

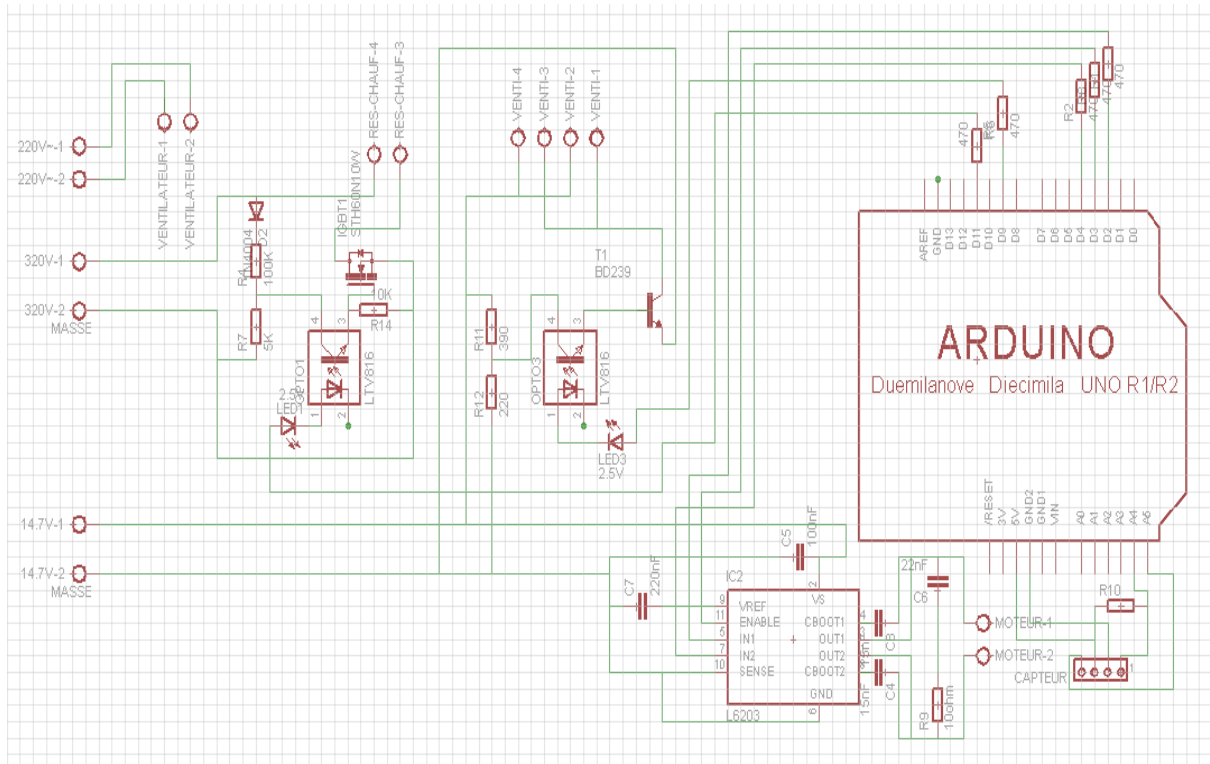


Figure.2.12. Schéma de la carte d'interface.

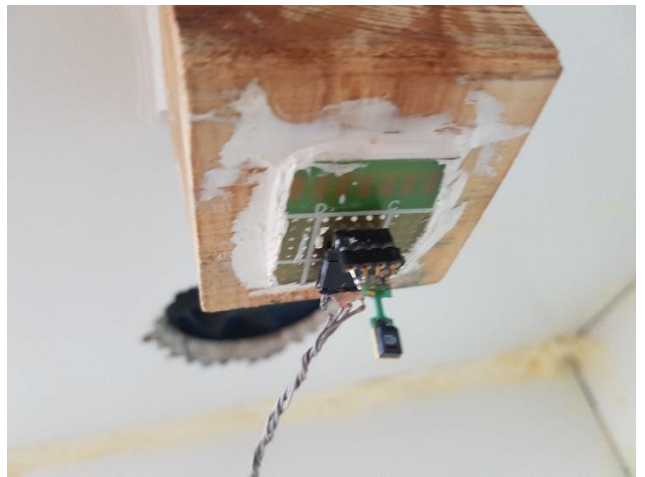
2.10. Photos de l'incubateur :



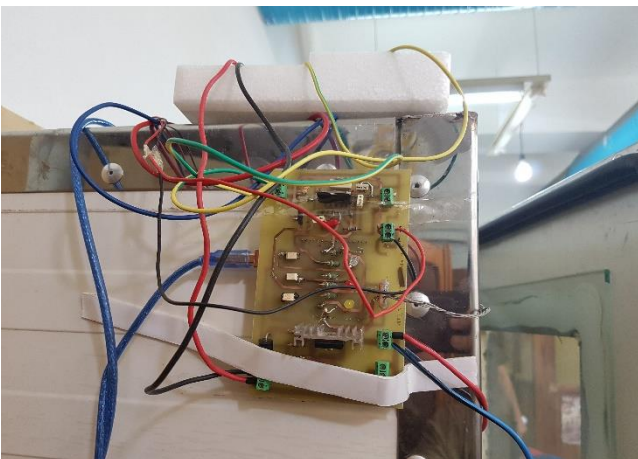
La couveuse en vue extérieure



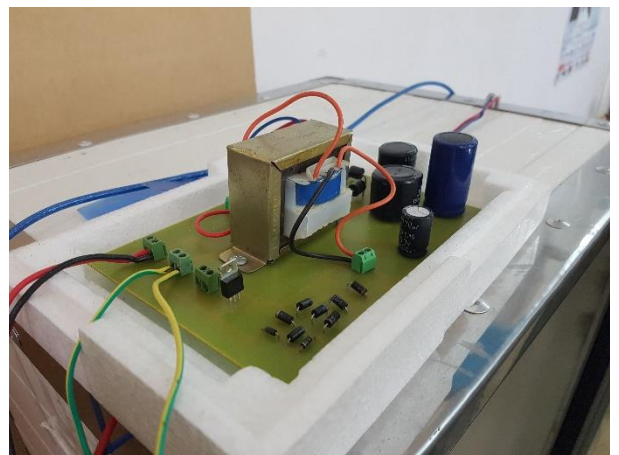
Système de chauffage



Le capteur SHT-75



Circuit d'interface



Circuit de puissance

### **2.11. Conclusion :**

La réalisation matérielle reste insuffisante si le système est non automatisé, cette dernière étape de réalisation se divise en deux parties : la partie d'identification du système et la partie de commande du système. Donc dans le chapitre suivant, on va parler de l'identification du système considéré.

**Chapitre 3 Identification du**  
**systeme**

# Chapitre 3 Identification du système

---

## **3.1. Introduction :**

L'automatisme est une science qui consiste à étudier et traiter les systèmes réels des différentes branches scientifiques (électrique, mécanique, chimie, biologie...) avec différentes méthodes comme la modélisation, l'analyse, l'identification et la commande.

Bien évidemment, l'automatisme a nécessairement besoin d'un modèle mathématique du système réel. Un système est un concept où on intègre des variables, ces variables produisent des signaux avec lesquels on fait les études nécessaires pour automatisé le système.

## **3.2. Généralités sur l'identification :**

L'identification du système consiste à chercher un modèle mathématique d'un système dynamique à partir des données expérimentales et des connaissances disponibles a priori. Ce modèle mathématique est caractérisé par une structure et par des paramètres qu'il convient de choisir et d'ajuster, afin de reproduire au mieux le comportement entrée-sortie du système. Traditionnellement, les méthodes d'identification du système sont employées afin de déterminer des modèles permettant la synthèse des lois de commande. [11]

## **3.3. Généralités sur la modélisation :**

Identifier un système dynamique réel (appelé objet) veut dire caractériser un autre système appelé modèle du système dynamique, à partir de la connaissance expérimentale des entrées et sorties de manière à obtenir l'identité du comportement. Le modèle peut être un système physique, ou bien un système abstrait (modèle mathématique).



On appelle modélisation d'un processus, l'ensemble des opérations qui déterminent des équations ou paramètres qui régissent sur le comportement du système, c'est à dire trouver une équation mathématique donnant la relation entre l'entrée et la sortie du processus.

Il existe une multitude de types de modèles qui sont essentiellement décliné en deux catégories :

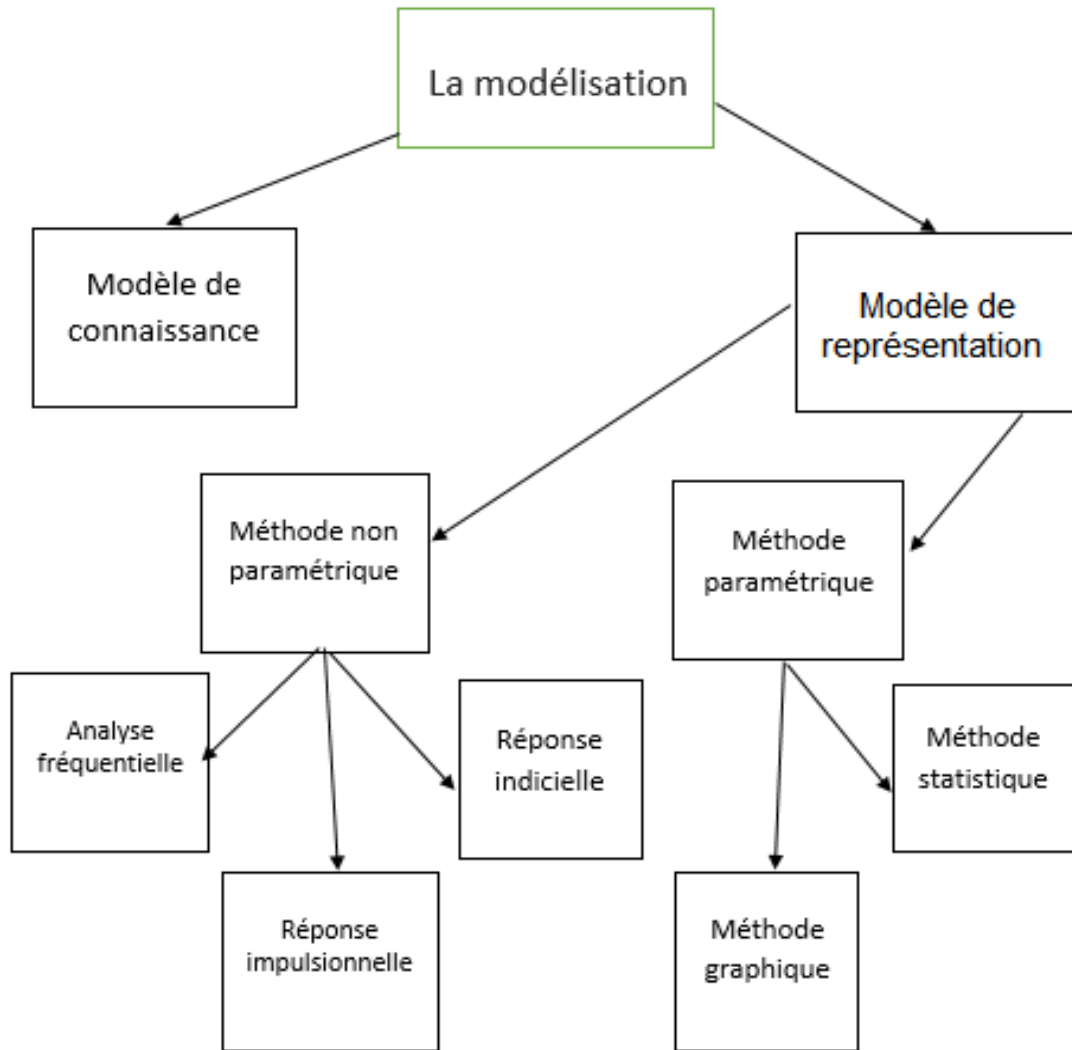
- **Modèle de connaissance** : où les paramètres ayant un sens physique (basés sur des lois de physique, électrique, chimie...), donnent une description accompli sur le système, ils sont utilisé souvent pour la simulation et conception des procédés. C'est un modèle un peu compliqué
- **Modèle de représentation** : ce type de modèle est utilisé si le modèle de connaissance s'avère moins précis ou bien impossible à obtenir. Ce modèle a le comportement d'entrée-sortie.

L'utilisation du modèle de représentation apparaît dès que l'on désire commander un système dynamique, ou bien surveiller le comportement d'un système afin de déceler les anomalies par rapport à un modèle de référence.

Il existe deux types de modèles de représentation :

- ❖ modèle non-paramétrique (réponse impulsionnelle, réponse indicielle, réponse harmonique).
- ❖ Modèle paramétrique (méthode graphique (réponse impulsionnelle, réponse indicielle), méthode statistique (fonction de transfert, équation aux différences)). [6]

On clarifie les différentes approches de modélisation par le diagramme ci-dessous :



*figure.3.1* Gestion des différents types de modélisation. [6]

### 3.3.1. Modèle d'identification non paramétrique :

#### a. Réponse harmonique

Ce type de réponse est difficile à mettre en œuvre. Les tests expérimentaux harmoniques (fréquentielles) ne sont plus utilisés à cause du temps à loyer dont le processus a besoin, il peut durer plusieurs heures; en plus il est parfois nécessaire de refaire les expérimentations pour différentes valeurs de pulsation. Les méthodes classiques utilisées pour l'analyse de la réponse fréquentielle sont illustré par le diagramme de (Bode), l'analyse de (Nyquist).....etc. [8]

### b. Réponse indicielle :

Un système linéaire est entièrement caractérisé par sa réponse indicielle, L'échelon est très riche en information, et à priori un seul enregistrement suffit. En fait il faut faire extrêmement attention aux conditions d'expérience car celle-ci ne peuvent être validées que si le système est initialement au repos et si les perturbations intervenant en cours d'essai sont négligeables. Notons que l'échelon est un signal de commande naturel d'un processus, et en ce sens l'analyse indicielle fournit des renseignements extrêmement utiles à la synthèse d'une commande. [8]

### 3.3.2. Modèle d'identification paramétrique :

Ce type de modèle se divise en deux classes :

- ❖ Modèle paramétrique graphique (déterministe).
- ❖ Modèle paramétrique statistique (stochastique).

#### a. Modèle paramétrique graphique (déterministe) :

Le but principal de la méthode graphique c'est d'obtenir un modèle paramétrique à partir d'un modèle non paramétrique, utilisant sa réponse indicielle ou harmonique. La méthode graphique est simple mais :

- Le choix du modèle est limité.
- La méthode est très sensible aux perturbations, en effet il est impossible de modéliser les perturbations.
- La précision est généralement très faible avec cette méthode.
- Il n'existe pas de procédure explicite pour la validation du modèle. [9]

#### b. Modèle paramétrique statistique (stochastique) :

Il s'agit de s'appuyer sur un certain nombre de techniques algorithmiques (algorithmes d'estimation des paramètres) pour traiter les données expérimentales. Le traitement des données d'entrées/sorties peut se faire à l'aide des algorithmes récursif ou non-récursif. L'avantage de l'algorithme récursif, c'est d'être appliqué en temps réel, en plus il nécessite moins de ressources mémoriel en termes calculs.

L'identification paramétrique statique est réalisée suivant cinq étapes principales :

- L'acquisition des entrées/sorties sous un protocole d'expérimentation.
- Le choix de la complexité du modèle.
- L'algorithme d'identification.
- L'estimation des paramètres du modèle.
- La validation du modèle identifié (structure et valeur des paramètres).

L'avantage de l'identification paramétrique statique c'est :

- Le Suivi des variations des paramètres du procédé en temps réel, permettant un réajustement des régulateurs pendant le fonctionnement.
- L'identification des modèles de perturbation.
- La modélisation des bruits en vue de leur réduction.
- L'analyse spectrale des signaux. [9]

### **3.3.3. L'identification paramétrique :**

#### **a. L'acquisition des entrées/sorties :**

La première étape fournit les données entrées/sorties susceptibles de permettre l'extraction d'un modèle de procédé significatif. Le protocole d'acquisition est un problème-clé car il conditionne en grande partie le succès d'une opération d'identification. Il doit tenir compte d'une part des contraintes pratiques, ce qui requiert en général l'utilisation des signaux d'excitation de faible amplitude et d'autre part de la nécessité d'exciter le système à identifier dans une bande de fréquences suffisamment large afin d'obtenir un modèle significatif pour le calcul de la commande. [11]

#### **b. Le choix de la complexité du modèle :**

Le choix de la complexité pour un type de modèle permet de déterminer quels sont les paramètres à estimer et quel est leur nombre. L'estimation paramétrique utilise des algorithmes qui, à partir des mesures entrées/sorties disponibles, fournissent les paramètres du modèle, on tenant compte des valeurs d'entrées et sorties précédentes ( $u(t-1)$   $u(t-2)$ ...  $y(t-1)$   $y(t-2)$ ...) dans le cas d'un modèle régressif. [11]

Le choix du modèle nécessite des connaissances de base à fin de choisir le type de modèle adapté :

- Le nombre d'entrées /sorties : modèle de type SISO, MIMO...
- Le type de modèle : linéaire, non-linéaire.
- Modèle régressif ou non régressif : la sortie dépend ou ne dépend pas des sorties précédents.
- Modèle continue ou discret.

**c. L'algorithme d'identification :**

Un des algorithmes les plus utiliser dans l'identification est l'algorithme des moindres carrées.

- **L'algorithme des moindres carrés ordinaires MCO** : [10]

La méthode d'identification par algorithme de moindre carrée a été introduite par KARL GAUSS en 1908, cette méthode est la base de toutes les méthodes d'identification et d'estimation des paramètres. Le procédé est basé sur la minimisation d'une fonction quadratique appelé fonction coût définie comme ci-dessous :

$$J_N = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (e(t))^2 \quad (3.1)$$

Avec  $e(t)$  : représente l'erreur de prédiction

$N$  : nombre d'échantillons

- **Identification du modèle ARMA** : [10]

La modélisation par modèle ARMA (Auto Régressive à Moyenne Ajustée) d'ordre (n/m) est définie par l'équation suivant :

$$\sum_{i=0}^n a_i y(t-i) = \sum_{i=0}^m b_i u(t-i) + e(t) \quad (3.2)$$

Avec  $y(t), u(t)$  : représente l'entrée et la sortie du système.

$e(t)$  : représente un bruit blanc.

$a_0=1, b_0=0$  en général.

Développons l'équation (3.2), on trouve :

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - a_2 y(t-2) - \dots - a_n y(t-n) + b_1 u(t-1) + \dots + b_m u(t-m) + e(t) \quad (3.3)$$

- **Solution optimale par l'algorithme des moindres carrés ordinaires :** [10]

L'équation (3.3) peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$y(t) = \theta^T \varphi(t) + e(t) \quad (3.4)$$

Avec  $\theta^T = [a_0 \ a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n; \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_m]$

$$\varphi^T(t) = [-y(t-1) - y(t-2) \ \dots \ -y(t-n); \ u(t-1) \ u(t-2) \ \dots \ u(t-m)]$$

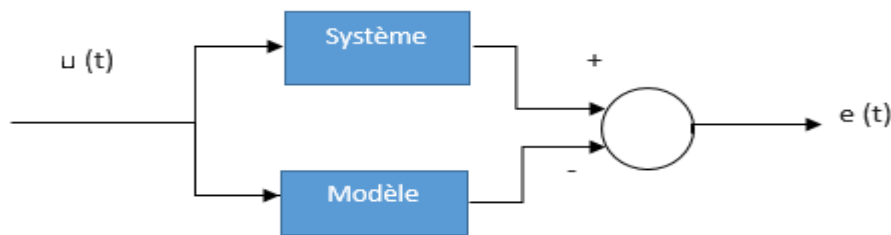
$\theta^T$  : étant le vecteur des paramètres à identifier.

$\varphi^T$  : étant le vecteur des données.

On définit l'erreur de prédiction :

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t) \quad (3.5)$$

Avec  $\hat{y}(t)$  : représente la sortie du modèle.



**Figure.3.2.** schémas explicatif du calcul d'erreur.

On pose :

$$y(t) = \hat{\theta}^T \varphi(t) \quad (3.6)$$

Avec  $\hat{\theta}^T$  : représente le vecteur des paramètres estimés.

La minimisation du critère  $J_N(\theta)$  consiste à trouver un optimum c'est à dire sa dérivé doit être nulle.

$$\left[ \frac{dJ_N(\theta)}{d\theta} \right]_{\theta=\hat{\theta}(N)} = 0 \quad (3.7)$$

Après avoir dérivé l'équation (3.1), on trouve la solution optimale comme ci-dessous :

$$\hat{\theta}(N) = \left[ \sum_{t=1}^N \varphi(t)\varphi^T(t) \right]^{-1} \left[ \sum_{t=1}^N \varphi(t) y(t) \right] \quad (3.8)$$

La matrice  $\varphi\varphi^T$  est très grande, si le nombre d'échantillons N est important. En effet le calcul de son inverse est déconseillé, pour cela on emploie l'estimation récursive du moindres carrés.

- **L'algorithme des moindres carrés récursifs MCR : [10]**

Pour faciliter les calculs de la solution optimale au sens des moindres carrés récursifs, on pose :

$$R(t) = \sum_{k=1}^t \varphi(k)\varphi^T(k) \quad (3.9)$$

$$R(t) = R(t-1) + \varphi(t)\varphi^T(t) \quad (3.10)$$

$$\hat{\theta}(t) = R^{-1}(t) \sum_{k=1}^t \varphi(k) y(k) \quad (3.11)$$

$$\hat{\theta}(t) = R^{-1}(t) [\sum_{k=1}^{t-1} \varphi(k) y(k) + \varphi(t) y(t)] \quad (3.12)$$

$$\hat{\theta}(t) = R^{-1}(t) [\hat{\theta}(t-1) R(t-1) + \varphi(t) y(t)] \quad (3.13)$$

$$\hat{\theta}(t) = R^{-1}(t) [R(t)\hat{\theta}(t-1) - \varphi(t)\varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1) + \varphi(t) y(t)] \quad (3.14)$$

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + R^{-1}(t)\varphi(t)[y(t) - \hat{\theta}(t-1)\varphi^T(t)] \quad (3.15)$$

La solution optimale reste incomplète car la dernière équation contient le terme  $R^{-1}(t)$ , c'est une matrice qui nécessite le calcul de son inverse à chaque instant t. En effet, on emploie le lemme d'inversion matricielle :

$$[A + BCD]^{-1} = A^{-1} - A^{-1}B[DA^{-1}B + C^{-1}]^{-1}DA^{-1} \quad (3.16)$$

On pose :  $A=R(t-1)$ ,  $B= \varphi(t)$ ,  $C=1$ ,  $D=\varphi^T(t)$ .

Prenons l'équation (3.10) et on inverse :

$$R^{-1}(t) = [R(t-1) + \varphi(t)\varphi^T(t)]^{-1} \quad (3.17)$$

On applique le lemme d'inversion matricielle (3.16) sur l'équation (3.17), on trouve :

$$R^{-1}(t) = R^{-1}(t-1) - \frac{R^{-1}(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)R^{-1}(t-1)}{1 + \varphi^T(t)R^{-1}(t-1)\varphi(t)}$$

On pose le gain d'adaptation  $p(t) = R^{-1}(t)$  qui permet la mise en œuvre de l'algorithme de(MCR), on obtient :

$$p(t) = p(t-1) - \frac{p(t-1)\varphi(t)\varphi^T(t)p(t-1)}{1 + \varphi^T(t)p(t-1)\varphi(t)}$$

D'où la solution au sens de MCR est :

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + p(t)\varphi(t)[y(t) - \hat{\theta}(t-1)\varphi^T(t)] \quad (3.19)$$

**d. L'estimation des paramètres du modèle :**

L'identification paramétrique statique est basé sur le calcul de L'erreur entre la sortie du procédé à l'instant t,  $y(t)$  et la sortie prédite par le modèle  $y_e(t)$ , appelée erreur de prédiction, est utilisée par un algorithme d'adaptation paramétrique qui à chaque instant d'échantillonnage va modifier les paramètres du modèle afin de minimiser cette erreur. L'entrée est en général un signal aléatoire ou pseudo-aléatoire, engendrée par le calculateur. [11]

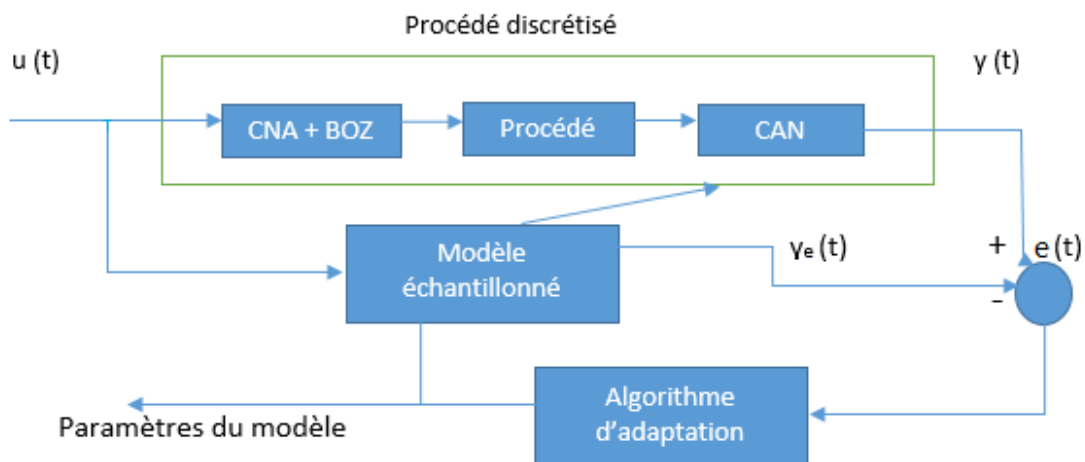


Figure.3.3. Estimation des paramètres.

**e. La validation du modèle identifié :**

Une validation objective peut être faite par des tests statistiques sur l'erreur de prédiction  $e(t)$  et la sortie estimé  $y_e(t)$ . Le test de validation permet pour un



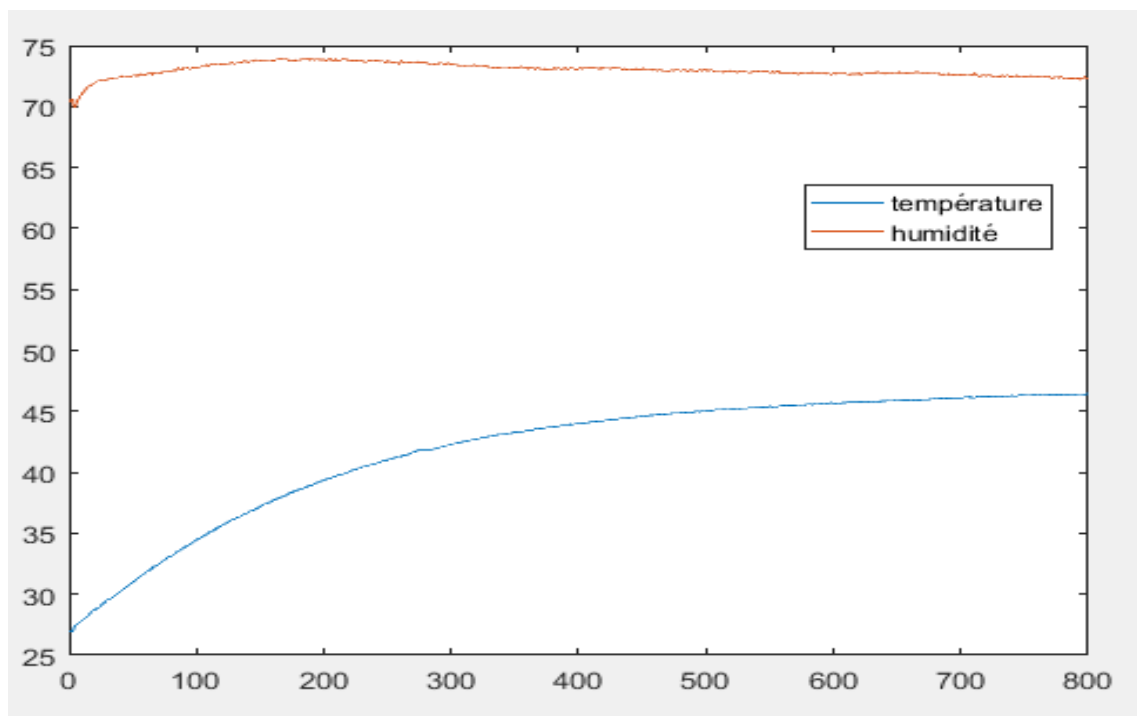
procédé donné de choisir le meilleur modèle, respectivement la meilleure structure et le meilleur algorithme pour l'estimation des paramètres. [11]

### 3.4. Manipulation sur Matlab :

#### 3.4.1. Réponse indicielle :

Appliquons un échelon au système ( $pwm=10$ ) ; on reçoit à partir du capteur les valeurs de température et d'humidité à chaque période d'échantillonnage. La figure suivante montre les résultats de la réponse indicielle pour une période  $T_e=2s$ .

On voit que le temps pour passer du régime transitoire au régime permanent est très grand (environ 3 heures 30 minutes), on conclue que notre système est lent.



**Figure.3.4.** Réponse indicielle du système avec  $T_e=2s$ .

Notons qu'on a fait d'autre expérience avec des périodes d'échantillonnage plus grandes ( $T_e= 4s$ ;  $T_e=6s$ ;  $T_e=8s$ ), les courbes n'ont pas été complètes (on n'a pas atteint le régime permanent). La figure suivante montre les résultats obtenus :

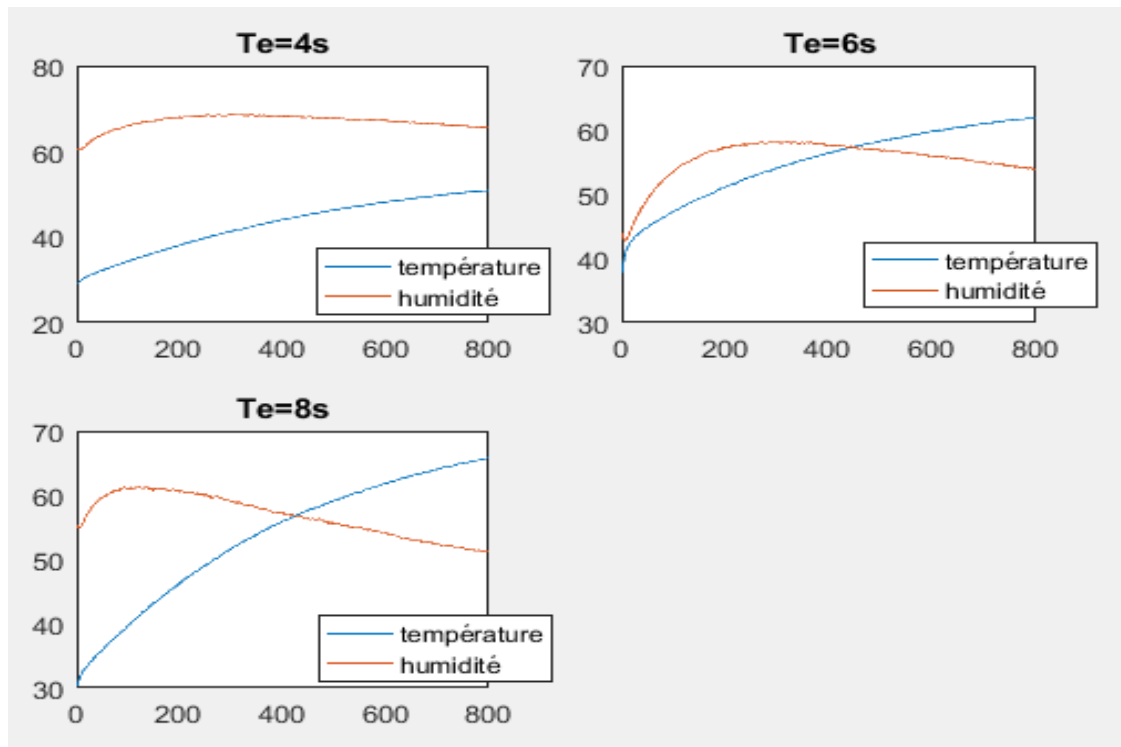


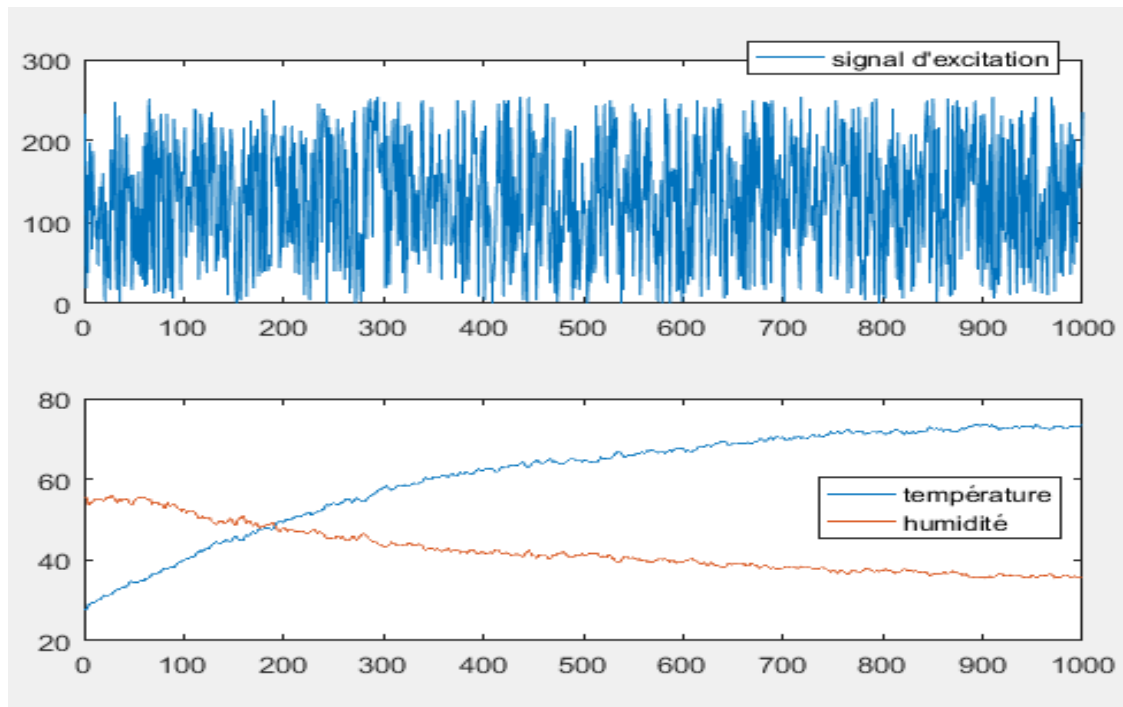
Figure.3.5. réponse indicielle pour différentes périodes d'échantillonnages.

### 3.4.2. Réponse à un signal aléatoire :

L'un des signaux aléatoires le plus utilisé pour la modélisation est le bruit blanc, Les valeurs prises du bruit blanc à chaque instant  $t$  sont toutes indépendantes les unes des autres, la moyenne de ce signal est égale à 0.

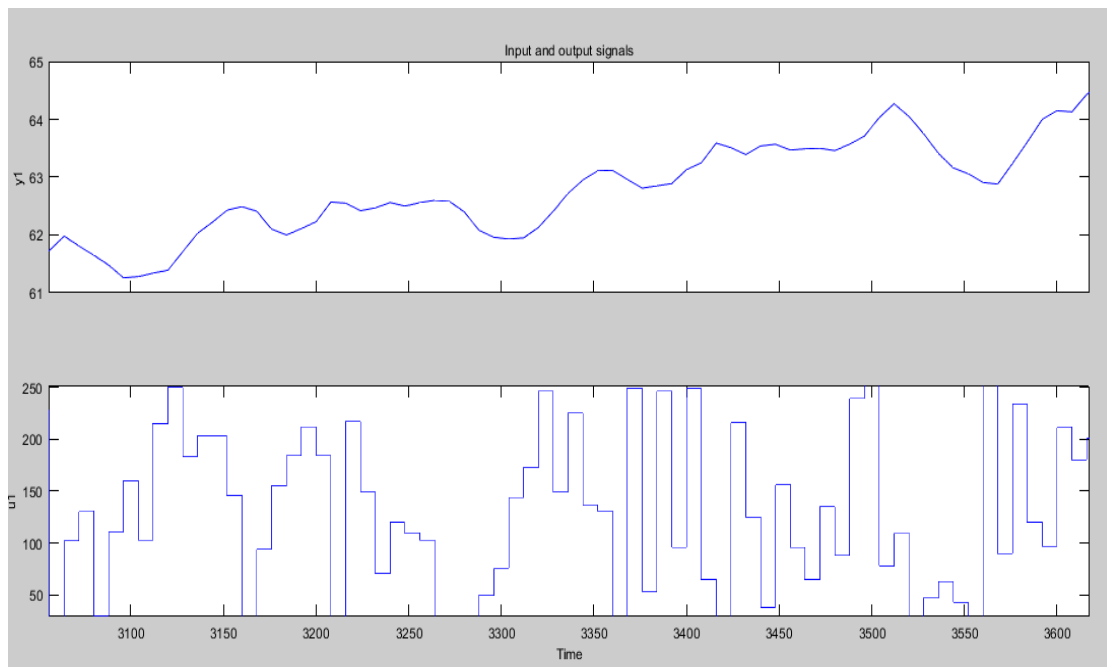
Pour pouvoir identifier et modéliser le système, on a besoin d'un signal d'excitation qui permet de balayer toutes les amplitudes existantes (différentes valeurs de tension), de plus il faut que le signal soit riche en fréquences, la durée de l'expérience doit être longue donc il faut choisir un grand nombre d'échantillons (on a choisi 1000 échantillons) pour avoir de bonnes données avec  $T_e=2s$ .

**Remarque** : L'organigramme suivi pour l'acquisition des entrées/sorties est mentionné dans **Annexe E**.



**Figure 3.6.** Réponse à une excitation aléatoire.

La figure 3.6 montre une variation importante de la température et de l'humidité en fonction du signal d'excitation. On fait un zoom sur les courbes pour qu'on puisse voir les variations de la température et de l'humidité en fonction de l'excitation d'entrée :



**Figure.3.7.** variation de la température

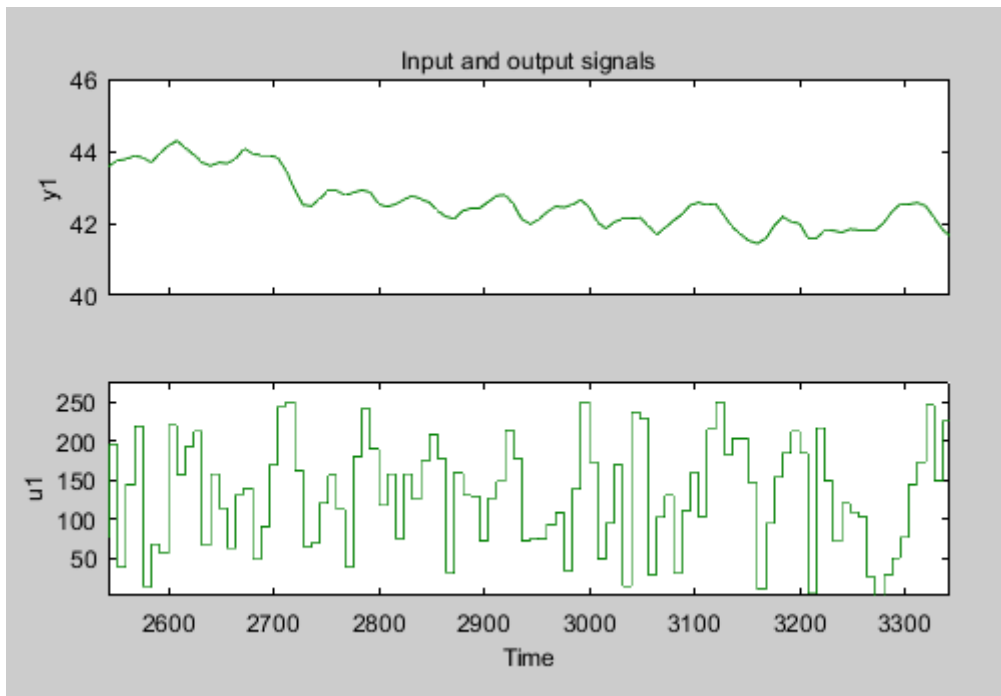


Figure.3.8. variation de l'humidité.

### 3.4.3. Identification des paramètres du modèle :

- Le toolbox d'identification

En langage Matlab, il existe un toolbox d'identification des systèmes, qui facilite l'identification et la validation du modèle. On tape sur la fenêtre command-window "ident"

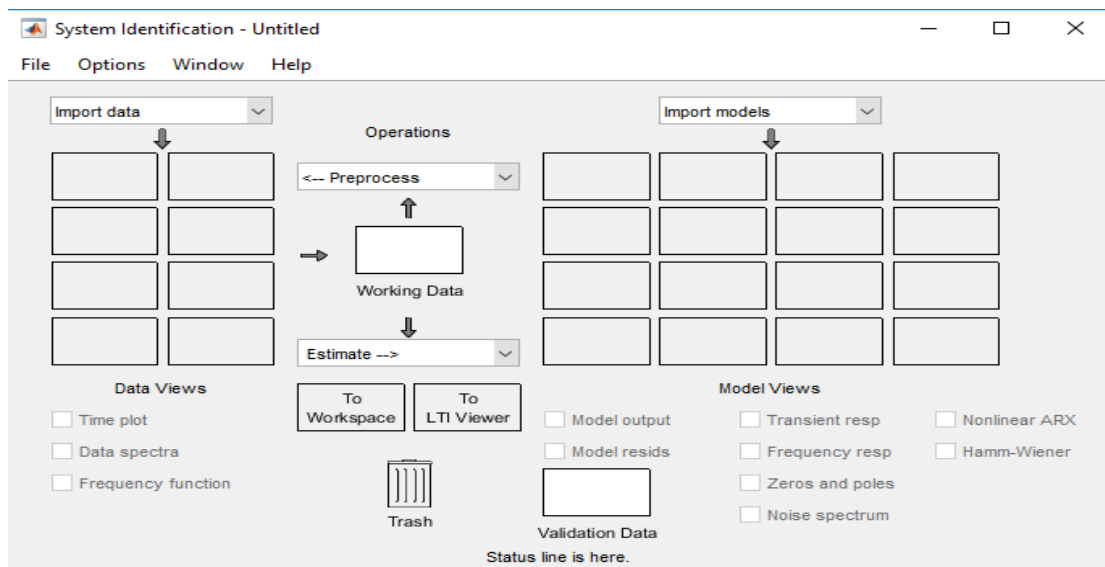


Figure 3.9. Le toolbox d'identification.

- On importe les données de l'excitation aléatoire qu'on a déjà enregistrée dans le workspace.

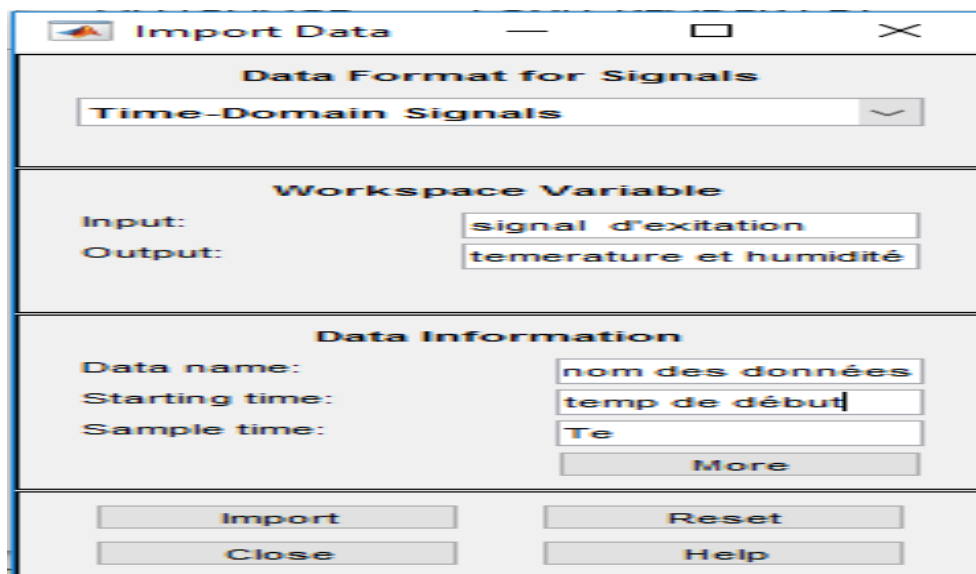


Figure 3.10. L'importation des données.

- **Estimation :**

On divise les données en deux parties, partie estimation et partie validation. Puis on cherche le modèle qui donne les meilleurs résultats.

Le toolbox donne le modèle ARMAX pour le système de chauffage:

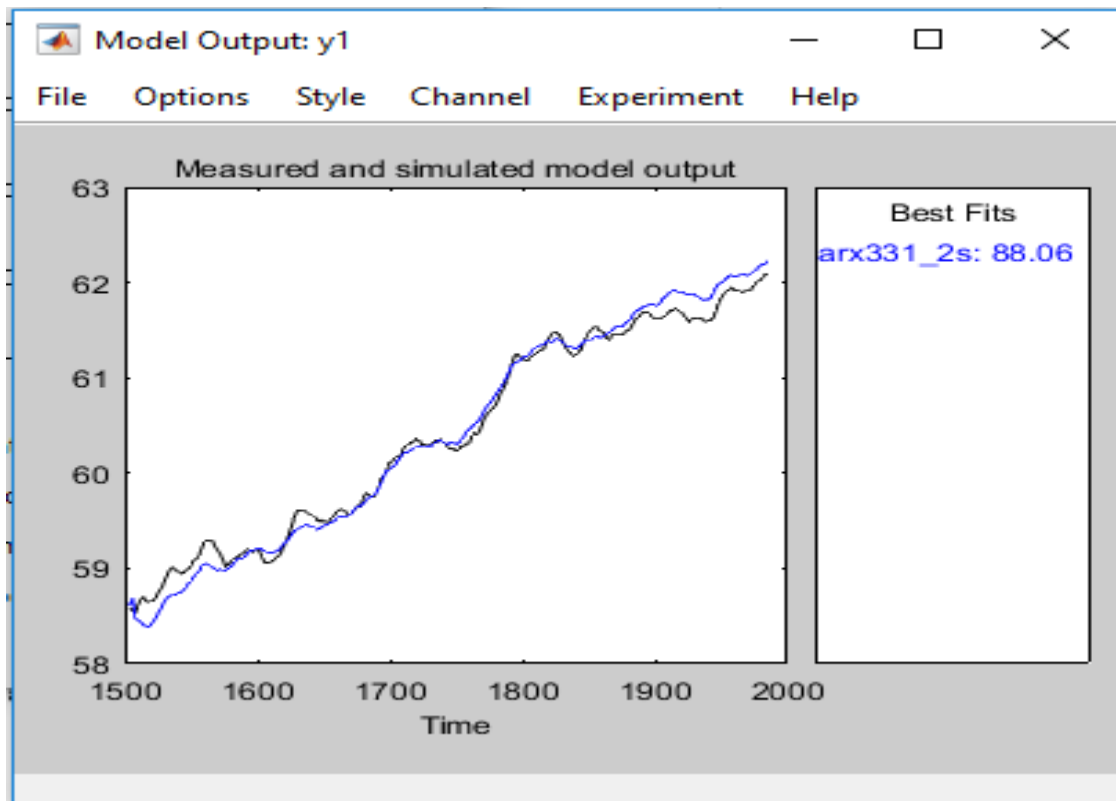
$$A(z) y(t) = B(z) u(t) + e(t)$$

$$\text{Avec : } A(z) = 1 - 1.334z^{-1} + 0.2188z^{-2} - 0.1253z^{-3}$$

$$B(z) = -0.00001914z^{-1} + 0.0001464z^{-2} + 0.0001614z^{-3}$$

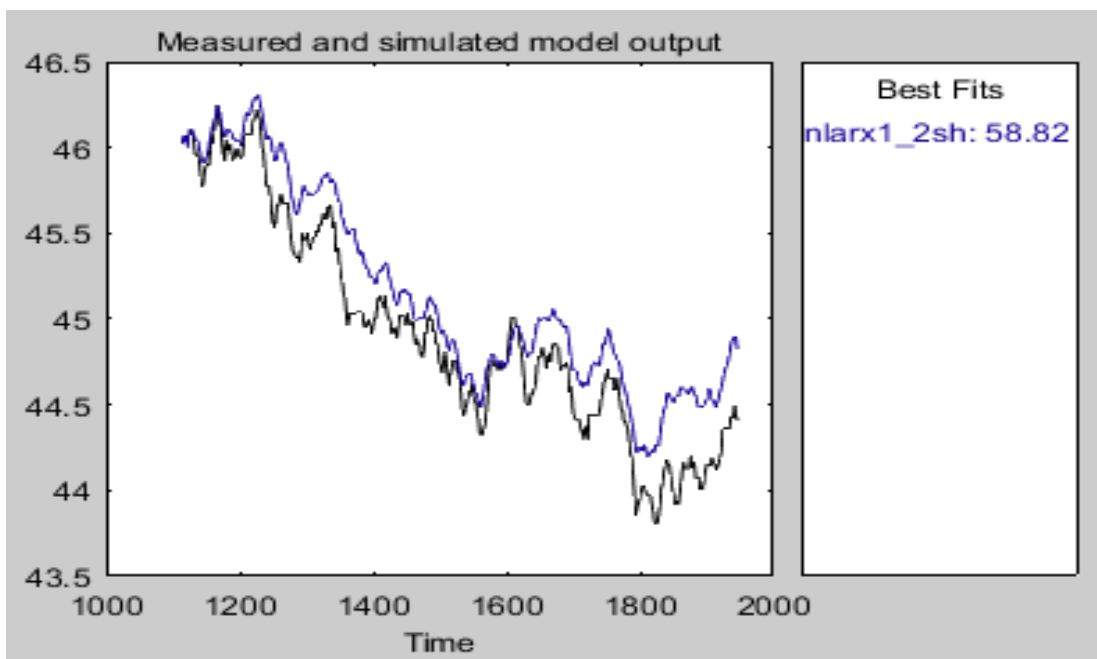
Où  $u(t)$  est la tension appliqué à la résistance,  $y(t)$  est la température mesuré.

L'estimation du système de chauffage donne une identité de 88%, la figure suivante montre les résultats obtenues, en noir la sortie réelle et en bleu la sortie estimé :



**Figure 3.11.** Sortie réelle et sortie estimée (température).

L'identification du système d'humidité est un peu difficile, le modèle qui exprime ce système est un modèle non linéaire, le pourcentage d'identité a été de 58%. La figure suivante montre les résultats obtenus :



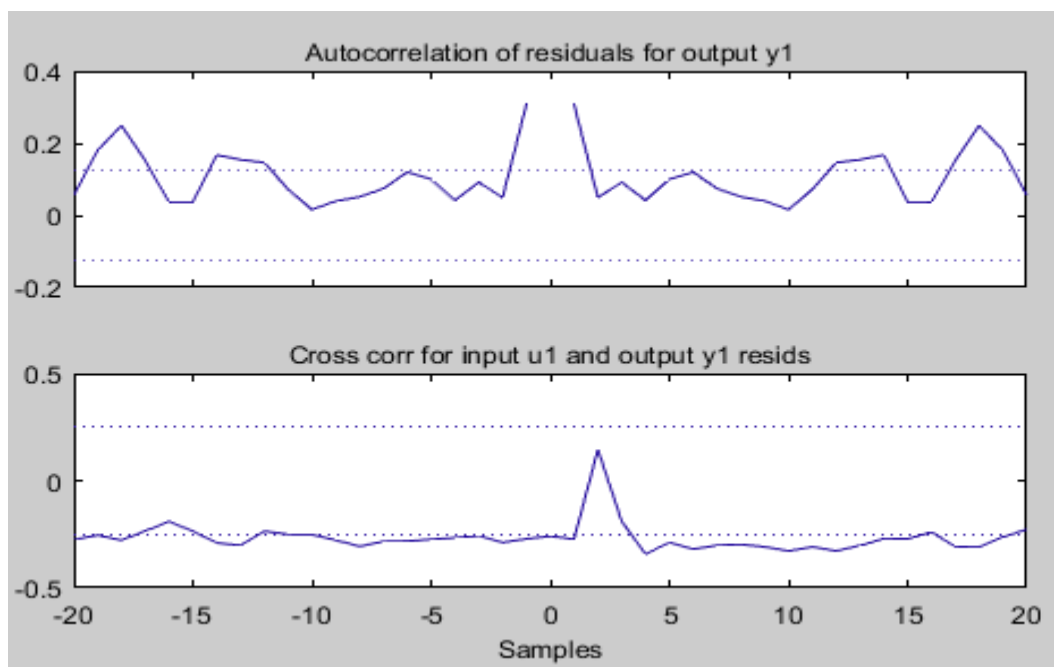
**Figure 3.12.** Sortie réelle et sortie estimée (humidité).

### 3.4.4. Validation du modèle :

- **Analyse résiduelle :**

L'analyse résiduelle est un autre avantage fournie par le toolbox d'identification, cette analyse se divise en deux :

- Test d'affirmation : consiste à calculer l'autocorrélation de l'erreur. Pour un bon modèle, il faut que l'erreur soit incorréler (les variations de l'erreur ne dépendent pas l'une de l'autre), ceci équivalent à l'autocorrélation du spectre d'un bruit blanc.
- Test d'indépendance : consiste à calculer la corrélation croisée (cross-corrélation) entre l'entrée du système et l'erreur de la modélisation. Pour un bon modèle, la cross-corrélation doit être proche que possible du zéros, en pratique ça veut dire que à chaque instant  $t$  la variation de l'erreur ne dépend pas de l'entrée.



**Figure.3.13.** L'analyse résiduelle (température).

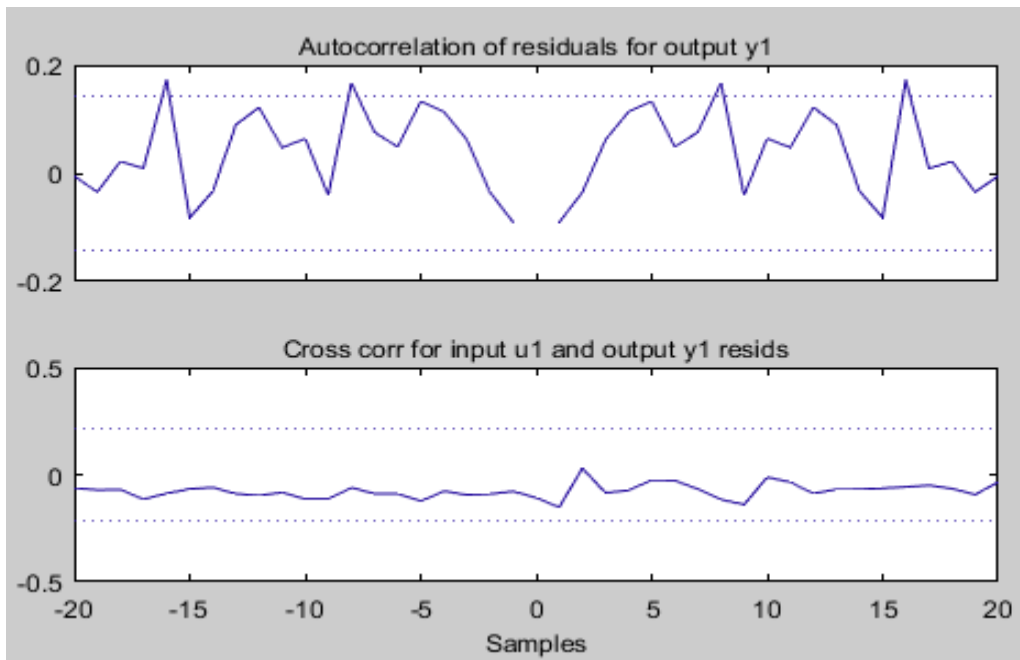


Figure.3.14. L'analyse résiduelle (humidité).

On remarque que l'autocorrélation des deux systèmes (chauffage et humidité) se trouve dans l'intervalle de confiance.

- Réponse indicielle :

La réponse indicielle du modèle montre qu'il est stable : le temps de monter important ( $t_r=4710s$ ) et un temps de réponse très grand ( $t_s=8390s$ ).

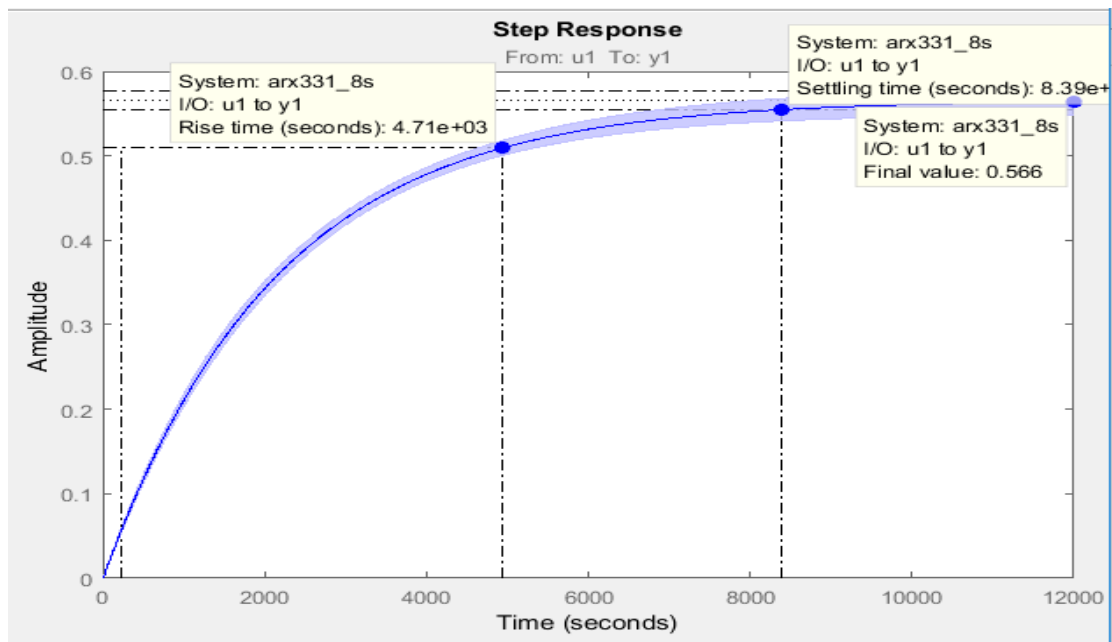


Figure.3.15. Réponse indicielle du modèle (température).



- Les pôles et les zéros :

Un modèle est aussi caractérisé par sa stabilité au plan Z. On dit qu'un système est stable si ces pôles sont à l'intérieur du cercle unitaire.

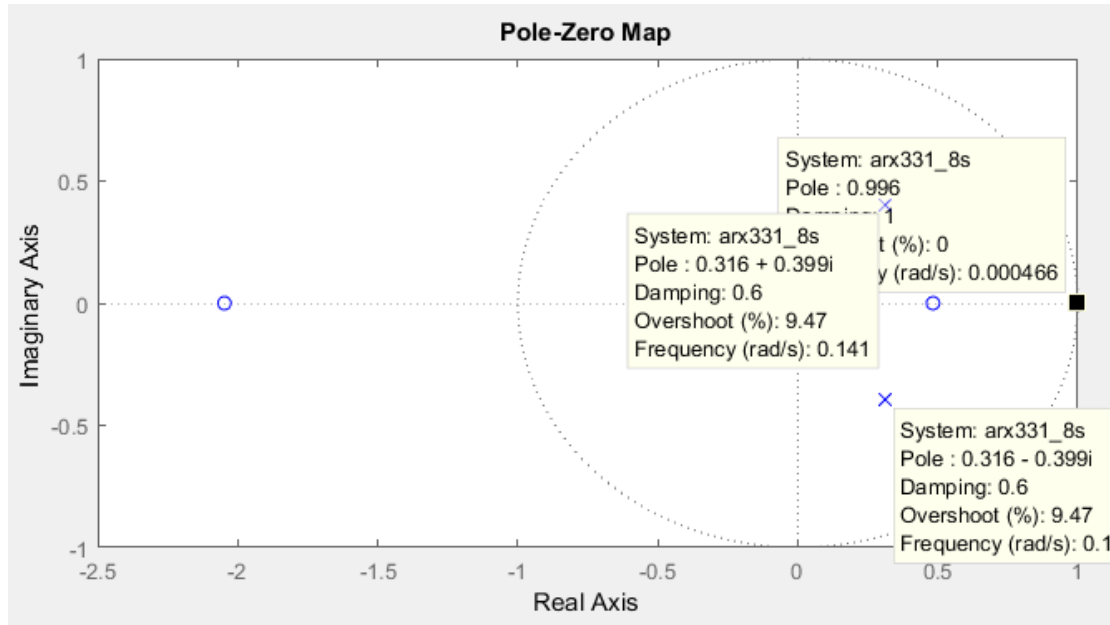


Figure.3.16. stabilité dans le plan Z du modèle (température).

### 3.5. Conclusion :

Dans ce chapitre on a pu identifier et modéliser notre système. Les deux modèles (température et humidité) n'étaient pas parfaits mais avec un pourcentage acceptable, le but du prochain chapitre est de commander et régler le système réel à l'aide des modèles obtenues dans ce chapitre.

# **Chapitre 4 Commande** **numérique du système**

# Chapitre 4 Commande numérique du système

---

## 4.1. Introduction :

Tout système à régler possède un régulateur, qu'il soit analogique ou numérique, Ce régulateur a pour tâche de comparer, en premier lieu, une valeur de consigne avec la valeur de mesure correspondante. En second lieu, le régulateur agit sur la grandeur de commande pour rendre la valeur de mesure aussi proche que possible de la valeur de consigne. Dans ce chapitre on va étudier la régulation et la commande du système.

## 4.2. Définition et généralités sur la régulation :

La régulation est une action qui regroupe l'ensemble des techniques qui permettent de contrôler une grandeur physique (ex : température, vitesse, pression..) appelée grandeur réglée à sa valeur de consigne, en tenant compte des perturbations et en agissant sur une autre grandeur physique, appelée grandeur réglant. Il existe quatre grandeurs qui jouent un rôle essentiel dans la régulation :

- **La grandeur réglée** : C'est la grandeur physique que l'on désire contrôler. Elle donne son nom à la régulation. Par exemple : régulation de température.
- **La consigne** : C'est la valeur désirée que doit avoir la grandeur réglée.
- **Les grandeurs perturbatrices** : ce sont les grandeurs physiques susceptibles d'évoluer au cours du processus et d'influencer la grandeur réglée. Par exemple : l'influence de la température extérieure sur le système de chauffage interne.
- **La grandeur réglant** : c'est la grandeur de commande qui a été choisie pour contrôler la grandeur réglée. Par exemple le débit d'eau dans le système de chauffage.

De plus, la régulation est basée sur quatre paramètres essentiels, le bon control de ces quatre paramètres, explique la bonne marche d'un système.

- Le temps de réponse noté par  $t_d$  : c'est le temps nécessaire pour atteindre la valeur final (désirée)
- La stabilité du système : un système est dite stable s'il converge vers une valeur fini.
- Le dépassement : un système ne peut jamais suivre la consigne à 100%, il existe un dépassement de la valeur de la consigne appelé (dépassement), il s'exprime en pourcentage, le système est dit bien réglé si le dépassement ne dépasse pas 16%. [12]
- La précision : c'est l'écart de positionnement à l'infinie.

Pour réguler un système physique, il faut :

- mesurer la grandeur réglée avec un capteur.
- réfléchir sur l'attitude à suivre : c'est la fonction du régulateur. Le régulateur compare la grandeur réglée avec la consigne et élabore le signal de commande.
- agir sur la grandeur réglant par l'intermédiaire d'un organe de réglage. [6]

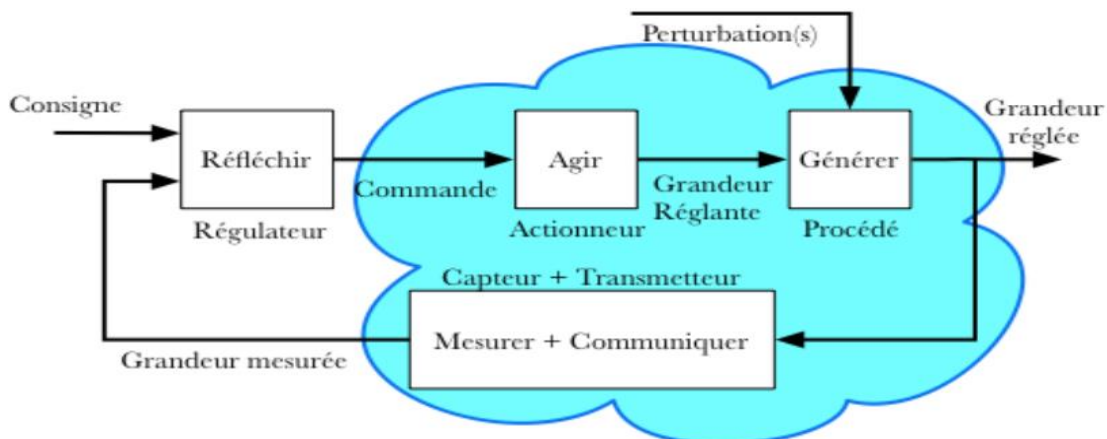


Figure.4.1. Principe de régulation. [17]

- **Fonctionnement en boucle ouverte**

On parlera de fonctionnement en boucle ouverte quand la mesure de la grandeur réglée n'est pas utilisée. Ceci n'est pas une régulation.

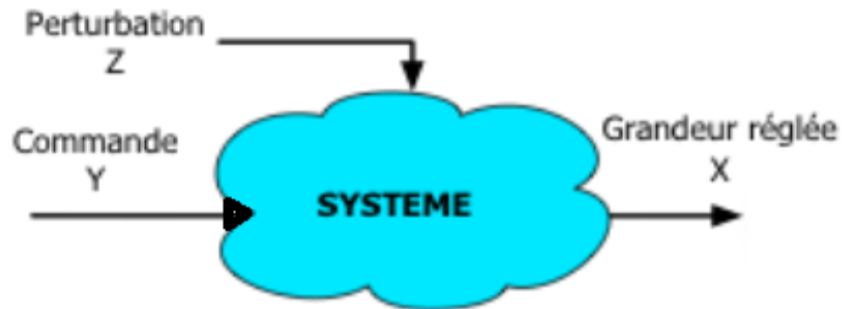


Figure.4.2. Fonctionnement boucle ouvert. [17]

- **Fonctionnement en boucle fermée**

C'est le fonctionnement normal d'une régulation. La mesure de la grandeur réglée permet de mesurer son écart avec la consigne et d'agir en conséquence pour s'en rapprocher.

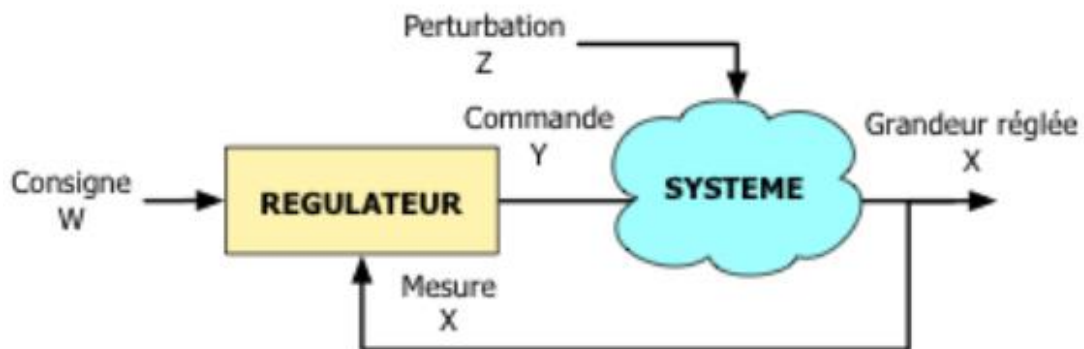


Figure.4.3. Fonctionnement en boucle fermé. [17]

#### 4.2.1. Le signal de contrôle PWM :

La technique de modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation PWM) consiste à générer un signal carré avec un rapport cyclique modulé en fonction d'un signal de commande. Le signal généré peut servir à commander un circuit de puissance.

Il existe deux types de PWM :

- **Pwm asymétrique :**

La figure suivante montre le fonctionnement de PWM asymétrique. Une porteuse triangulaire possède une seule pente et est comparée à un signal de

consigne, par exemple un échelon. Le signal de consigne doit avoir une fréquence bien plus petite que la porteuse. Le signal de sortie est au niveau haut (disons 5V) lorsque la consigne est supérieure à la porteuse, bien qu'il soit au niveau bas (disons 0V) lorsque la consigne est inférieure à la porteuse.

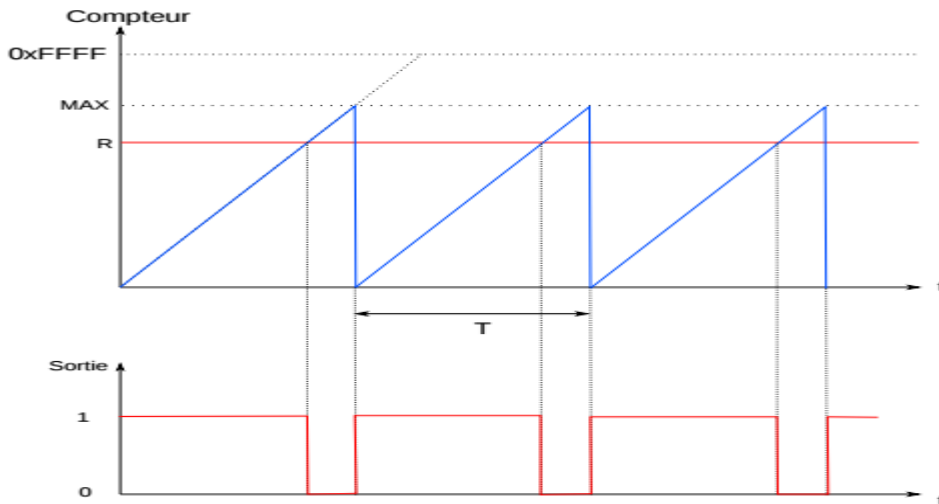


Figure.4.4. Signal PWM asymétrique. [6]

- **Pwm symétrique :**

Une porteuse triangulaire possède deux pentes. Le signal de sortie est au niveau haut lorsque la consigne est supérieur à la porteuse, ou le signal de sortie est au niveau bas lorsque la porteuse est supérieur à la consigne, appelons consigne le signal d'entrée et porteuse le signal de référence.

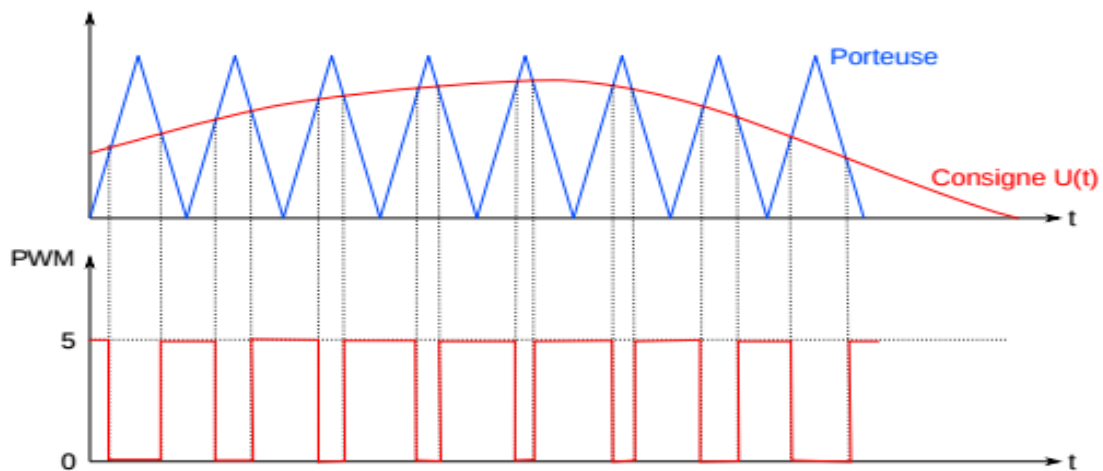


Figure.4.5. Signal PWM symétrique. [6]

### 4.2.2. Le régulateur PID :

On s'intéresse dans cette partie à l'étude des actions du module PID composé par les trois actions de base. On mettra en évidence l'effet de chaque action dans une boucle de régulation, ses avantages ainsi que ses limitations.

Le régulateur, dont la fonction de transfert est désignée par  $C(p)$  est situé avant le système à régler  $G(p)$ .

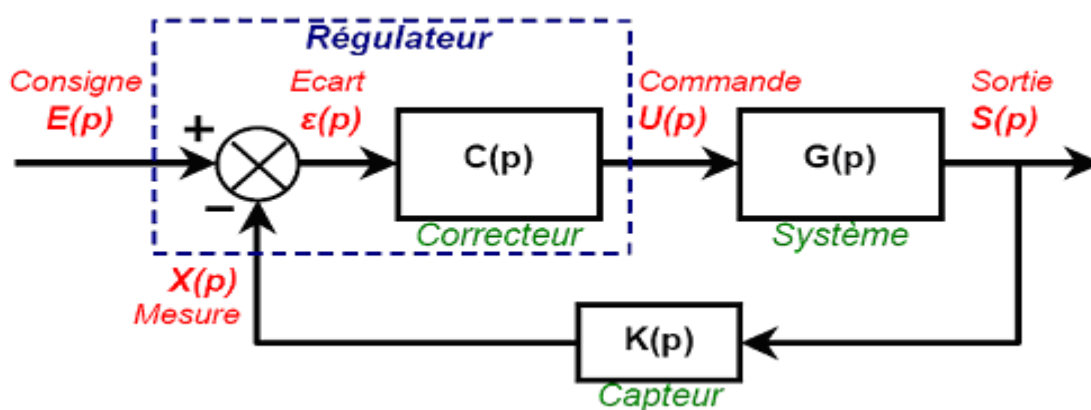


Figure.4.6. Schéma fonctionnel d'un système.

Le régulateur a pour charge de maintenir le signal d'écart  $\varepsilon(p)$  aussi proche de zéro que possible ; dans le but de fournir au système à régler la commande  $U(p)$  telle que l'image  $S(p)$  de la grandeur réglée obtenue par mesure tend à correspondre à la consigne  $E(p)$ . La commande  $U(p)$  est construite sur la base des signaux de consigne  $E(p)$  et de mesure  $S(p)$  de la grandeur réglée selon la loi de commande :

$$U(p) = U(E(p) ; S(p)). \quad [18]$$

### 4.2.3. Description des actions du PID :

- **Action proportionnelle P :**

Le régulateur à action proportionnelle, ou régulateur P, a une action simple, puisqu'il construit une commande  $u(t)$  proportionnelle à l'erreur  $e(t)$ . Le rapport erreur/commande désigne le gain du système asservi  $K_p$ . L'augmentation du gain  $K_p$  influe sur le système, il peut accélérer la réponse du système mais, il peut aussi dégrader la stabilité (risque d'instabilité). [12]

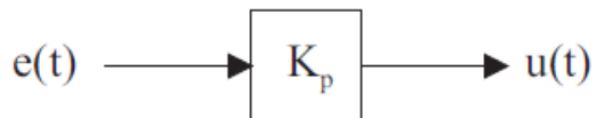
–Loi de commande du régulateur P :

$$u(t) = K_p \cdot e(t)$$

– Fonction de transfert du régulateur P :

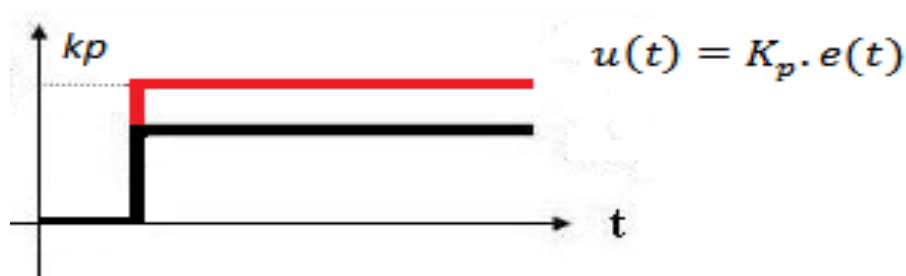
$$G_c(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K_p$$

–La représentation d'un régulateur P par son schéma fonctionnel est



**Figure.4.7.** schéma fonctionnel du régulateur P

– Réponse indicielle du régulateur P :



**Figure 4.8.** Réponse indicielle du régulateur P.

On voit que le régulateur P assure une transmission instantanée du signal d'erreur, dans ce sens, son action est relativement dynamique : sa commande ne dépend pas du passé, ni d'une tendance, mais simplement de ce qui se passe à l'instant actuel. [18]

- **Action intégrale I :**

L'anomalie d'entrée et sortie du système, même contre-réactionné par un régulateur P, pouvait présenter une erreur permanente en régime permanent. L'intervention de cette erreur lorsque les signaux d'entrée sont constants est désignée par erreur statique. Pour remédier au problème du statisme la solution consiste à



intégrer l'erreur [18]. L'action intégrale permet d'annuler l'erreur de position, mais elle peut provoquer des oscillations et des dépassements en régime permanent et même diminuer la stabilité du système. [12]

–Loi de commande du régulateur I :

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

– Fonction de transfert du régulateur I :

$$G_c(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = \frac{1}{T_i p}$$

–La représentation d'un régulateur I par son schéma fonctionnel est

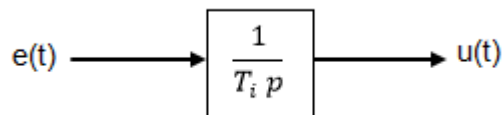


Figure.4.9. schéma fonctionnel du régulateur I.

– Réponse indicielle du régulateur I :

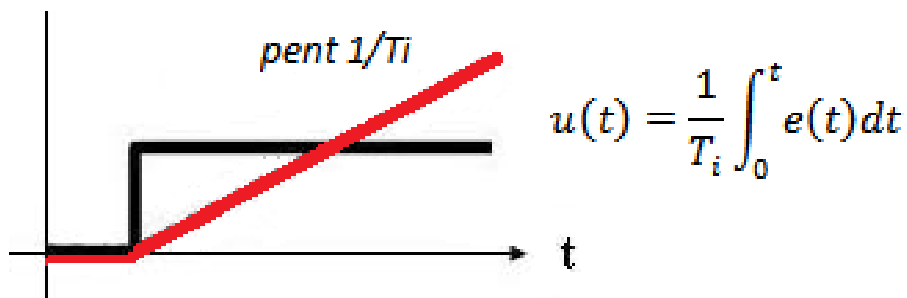


Figure 4.10. Réponse indicielle du régulateur I.

- **Action dérivée D:**

L'action du régulateur D n'intervient que sur la dérivée de l'erreur, c'est à dire qu'elle est sensible à la variation de l'erreur et non à l'erreur elle-même. Lorsque celle-ci est constante (régime statique) le dérivateur n'a aucun effet [18]. Avantage de ce type de correcteur est d'améliorer la stabilité du système. [12]

–Loi de commande du régulateur D :

$$u(t) = T_d \frac{d e(t)}{dt}$$

– Fonction de transfert du régulateur D :

$$G_c(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = T_d p$$

–La représentation d'un régulateur D par son schéma fonctionnel est :

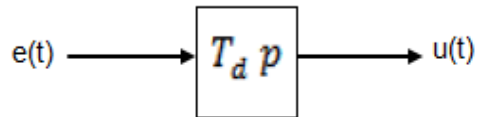


Figure.4.11. schéma fonctionnel du régulateur D.

– Réponse indicielle du régulateur D:

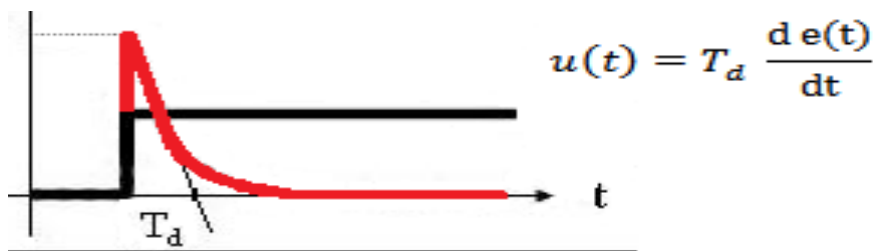


Figure 4.12. Réponse indicielle du régulateur I.

### 4.3. Etude expérimentale :

#### 4.3.1. Le choix des paramètres du régulateur PID :

En utilisant les résultats de l'identification vue déjà au chapitre 3, le schéma Simulink de la correction du système en boucle fermée est décrit comme suite :

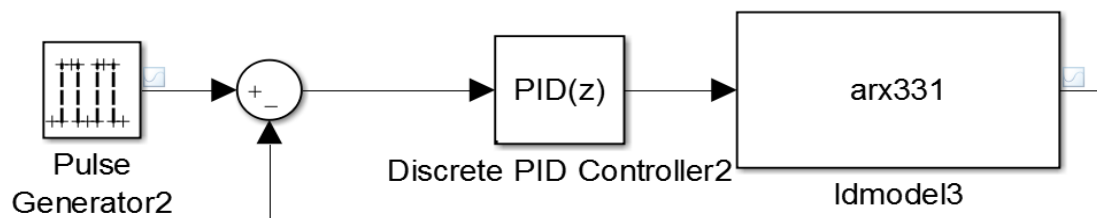
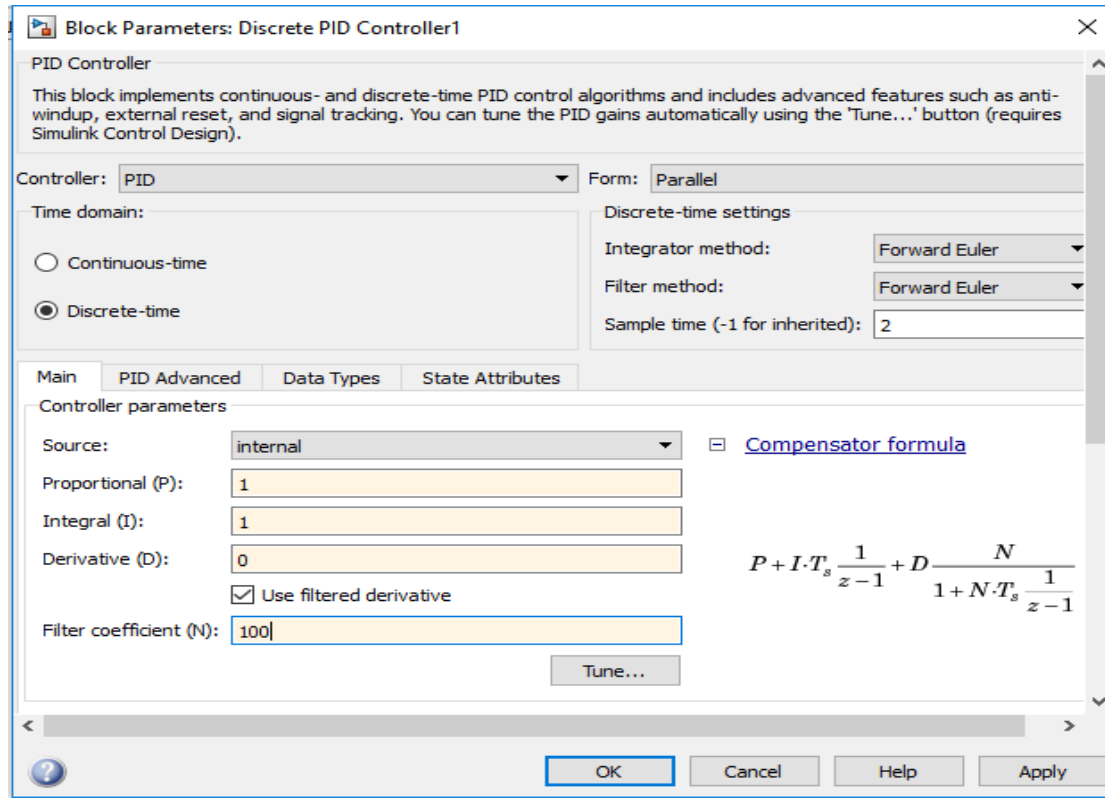


Figure.4.13. Correcteur PID en boucle fermée.

L'outil Simulink du logiciel Matlab facilite la recherche des coefficients du PID à l'aide de la fonction Tune, qui permet de chercher automatiquement les éléments de PID. Par défaut ces valeurs sont  $k_p=1$ ,  $k_i=1$  et  $k_d=0$ .



**Figure.4.14.** block du PID discrète.

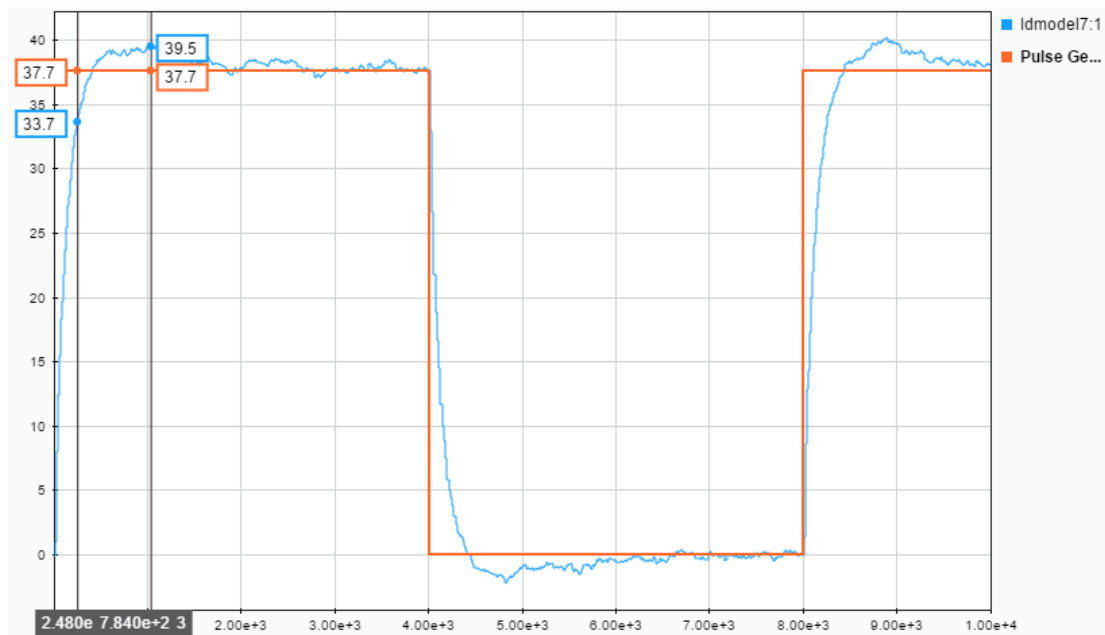
Le correcteur PID obtenue lors de l'étude de système de chauffage a donné les résultats suivants :

$K_p= 29.4263249205968$

$K_i= 0.0322209448323996$

$K_d= 557.179752856515$

Le graphe de la simulation a donné les résultats suivants avec une période d'échantillonnage égale de 8 seconds:



**Figure.4.15.** signal de consigne et signal réglée (température).

La simulation montre que le correcteur marche convenablement pour un temps de montée tr aux alentours de 44min et un dépassement de 4.77% environ.

Le correcteur PID obtenue lors de l'étude du système de l'humidité a donné les résultats suivants :

$$K_p = -51.480966489137$$

$$K_i = -0.251669600388825$$

$$K_d = -968.227507301977$$

La simulation sur Simulink a donné les résultats désignés sur le graphe suivant avec une période d'échantillonnage  $T_e = 8s$ :

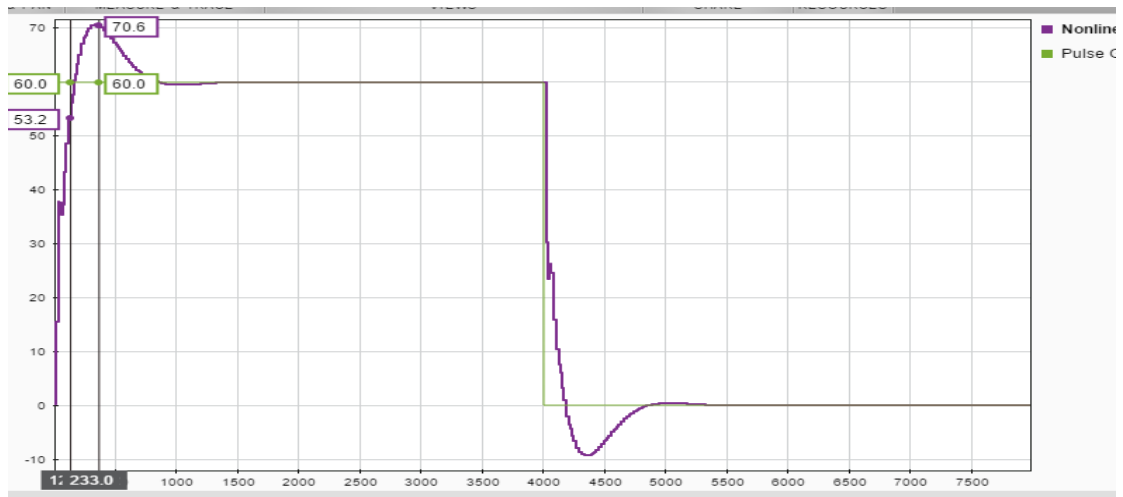


Figure.4.16. signal de consigne et signal réglée (humidité)

La figure montre des résultats acceptables pour un temps de montée de quelques minutes et un dépassement un peu grand ( $D=17\%$ )

### 4.3.2. Manipulation avec différentes périodes d'échantillonnage :

La manipulation a été faite avec 4 périodes d'échantillonnage,  $T_e=2s$ ,  $T_e=4s$ ,  $T_e=6s$ ,  $T_e=8s$  :

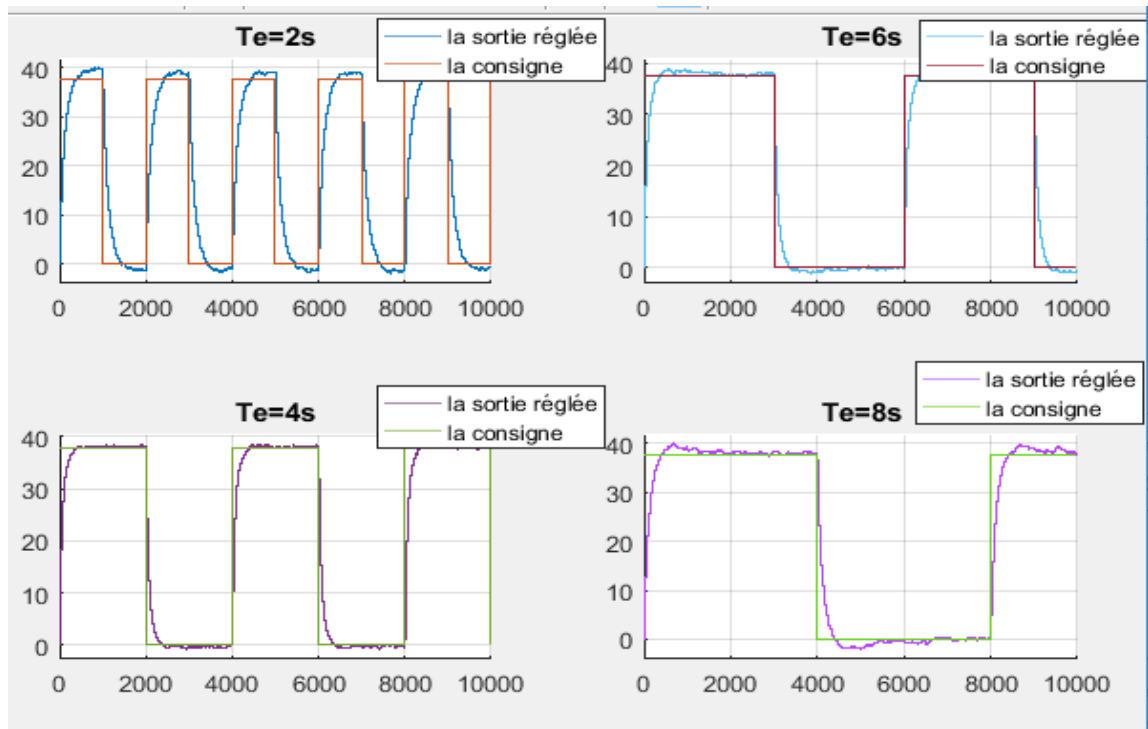
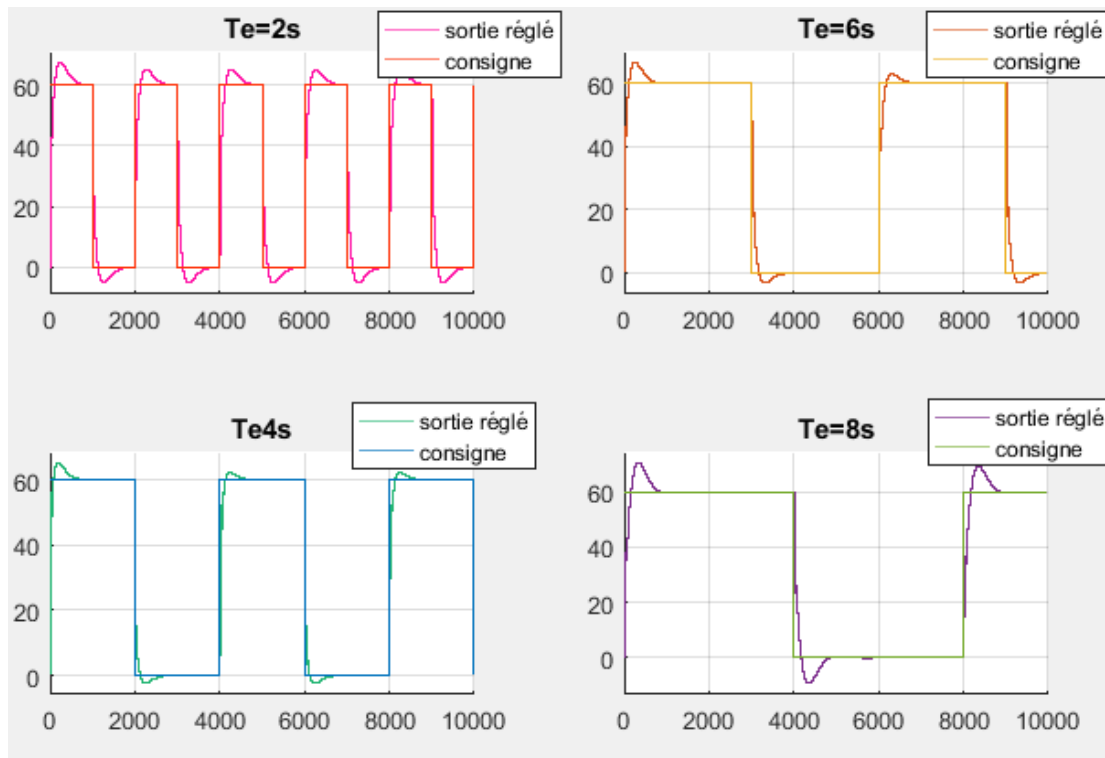


Figure.4.17. Manipulation sur système de chauffage.



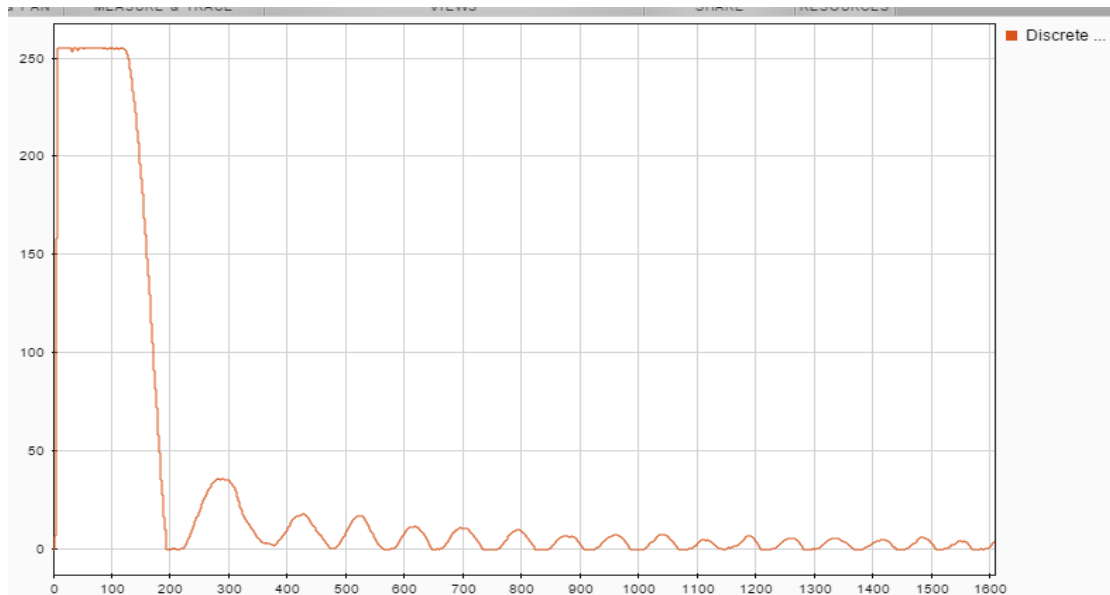
**Figure.4.18.** Manipulation sur système de l'humidité.

En voyant les courbes de la manipulation, on constate qu'une période d'échantillonnage  $T_e=4s$  donne des résultats meilleurs.

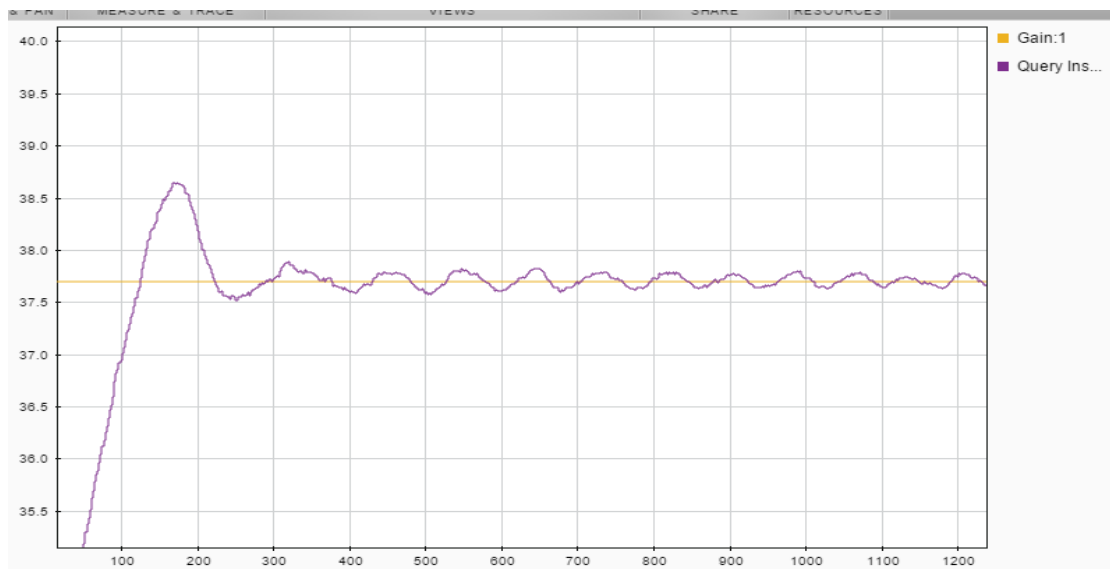
#### 4.4. Manipulation sur le système :

La régulation du modèle avec PID a donné des résultats acceptables, il nous reste d'implémenter le PID résultant sur le système réel. L'organigramme suivi pour l'implémentation du PID sur l'incubateur est mentionné dans **Annexe F**.

Les figures suivantes montrent des résultats favorables du système de chauffage, vu que la sortie du système est stable à un niveau appréciable et elle converge vers la consigne rapidement :

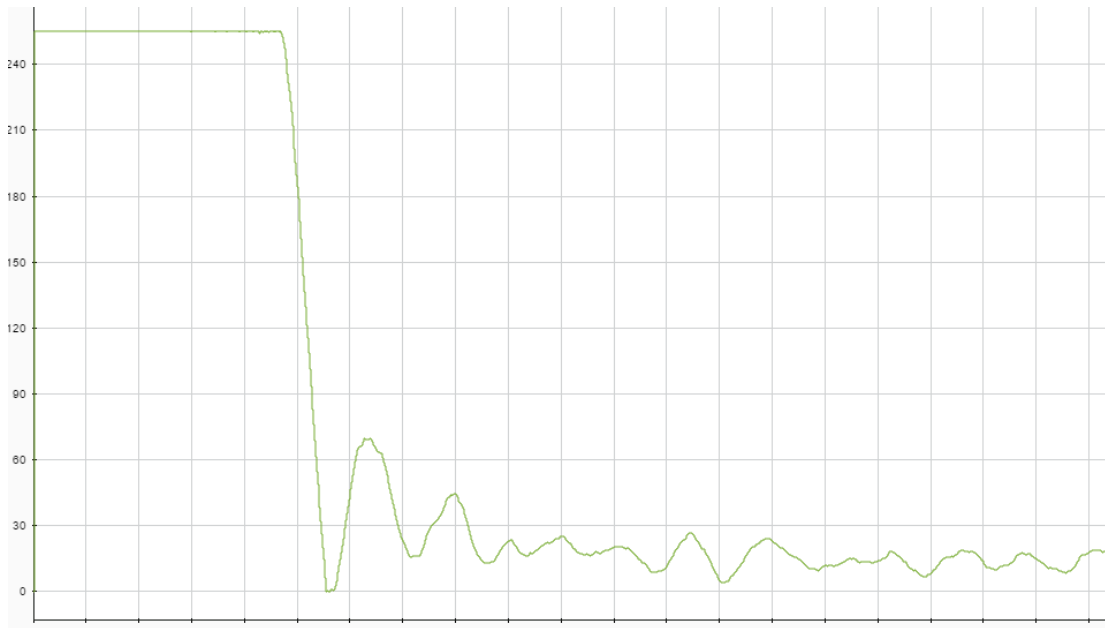


**Figure.4.19.** Signal de commande (PWM).

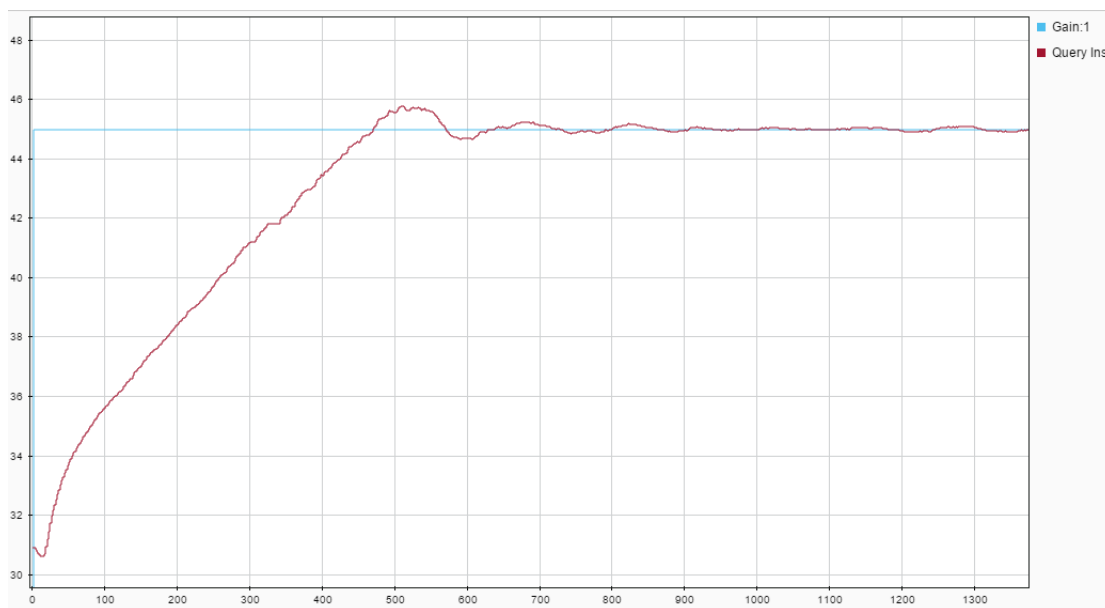


**Figure.4.20.** Signal de sortie pour une consigne  $U_c=37.7$

Voyant les courbes ci-dessus, on trouve que pour la sortie, Le temps de montée est de quelques minutes et un dépassement d'environ 3%.



**Figure.4.21.** Signal de commande (PWM).

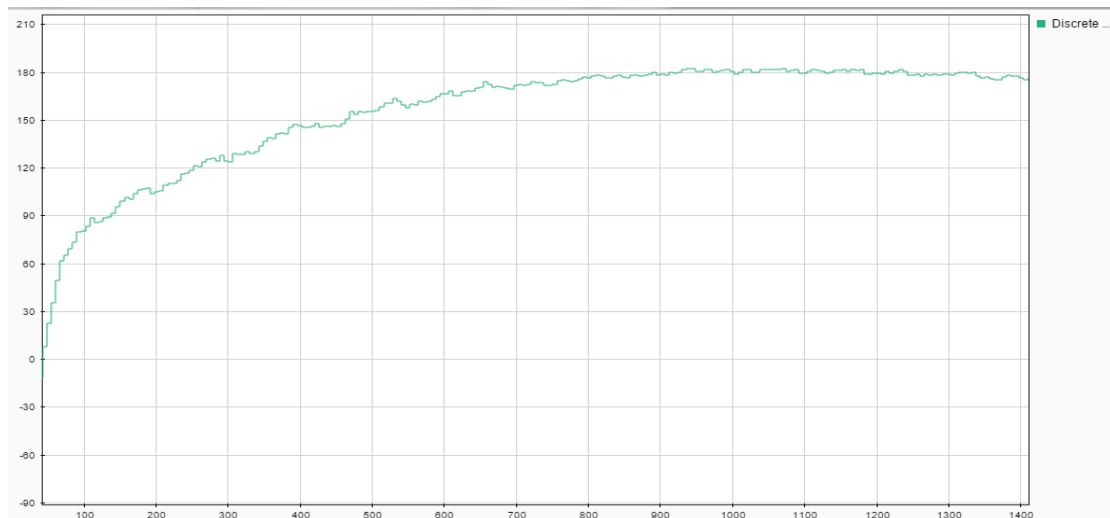


**Figure.4.22.** Signal de sortie pour une consigne  $U_c=45$ .

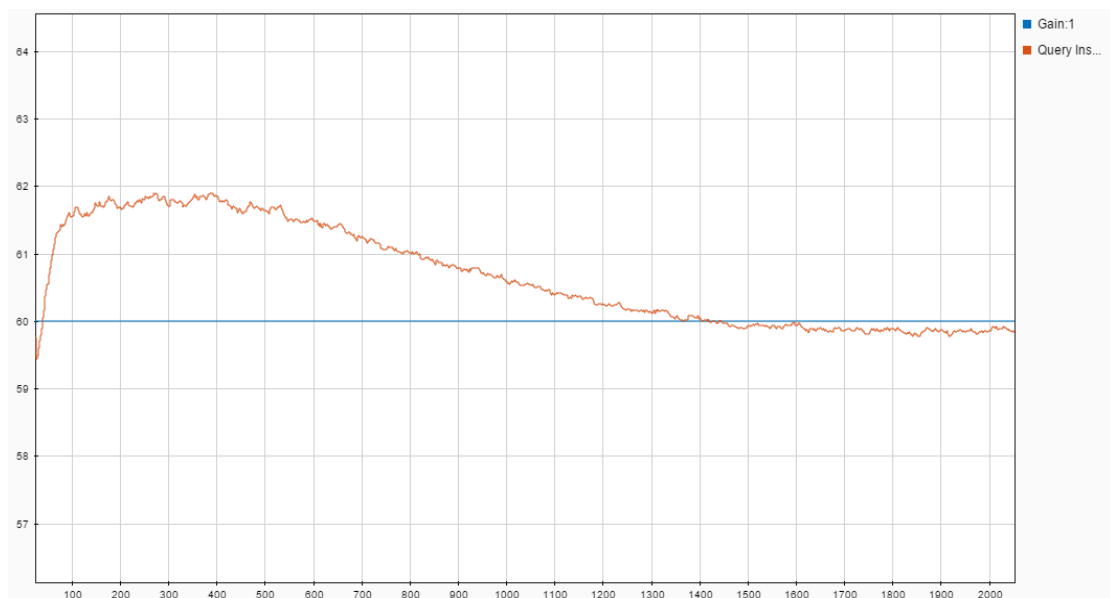
Et pour les courbes ci-dessus, on trouve que pour la sortie, Le temps de montée est de 5 min et un dépassement d'environ 2%.

Les figures suivantes montrent des résultats acceptables du système d'humidité, vu que la sortie du système est stable à un niveau appréciable et elle converge vers la consigne, mais très lentement :





**Figure.4.23.** Signal de commande (PWM).



**Figure.4.24.** Signal de sortie pour une consigne  $U_c=60$ .

Voyant les courbes ci-dessus, on trouve que pour la sortie, Le temps de montée est de quelques secondes et un dépassement d'environ 3%.

### 4.5. Conclusion :

Le correcteur PID classique est très utilisé dans la régulation des systèmes, vu qu'il est simple à l'appliquer, et ces paramètres faciles pour trouver. Nos données au MATLAB donnent des résultats pas tellement désirés mais acceptables vu que les marges sont réduites. L'implémentation des paramètres du PID marche très bien sur le système réel.

## Conclusion générale

---

A l'issue de ce travail, nous pouvons conclure que le but initial de ce projet qui consistait à réaliser un incubateur artificiel a été atteint à un niveau très appréciable, dans le sens où pour la partie qui nous intéresse particulièrement nous avons obtenu des résultats très satisfaisants. Celle-ci concerne le côté régulation, puisque la réponse du système en terme de température et humidité sont très proches des consignes qui sont adoptées dans tout ce domaine ( $T=37.8\text{ C}$ ,  $H=60\%$ ). Pour arriver à ces résultats, nous avons dû passer par des tests de simulation après avoir identifié les paramètres des modèles pour les deux grandeurs concernées. La validation de ces modèles a été réalisée grâce aux différents tests disponibles dans l'environnement Matlab. Bien que le système étudié comporte deux sorties qui ne sont pas indépendantes, nous avons mesuré et traité la commande des deux sorties individuellement. Cette manière de traiter le problème n'est pas optimale, car le but principal était de savoir réguler ces deux paramètres de la manière la plus simple possible.

Pour arriver à ce résultat il a fallu réaliser la partie matérielle, qui comporte non seulement l'enceinte de l'incubateur, mais toutes cartes électroniques de puissance et d'interface pour générer un courant suffisant pour attaquer la résistance chauffante. Cette partie m'a pris beaucoup de temps étant donné que ma première expérience de la réalisation de ce genre de cartes électroniques. Comme pour la grande majorité, le projet de fin d'études est resté toujours la possibilité de perfectionner le travail en utilisant par exemple, une autre carte avec un accès réseau local global, en vue de détecter l'état de l'incubateur à distance sur un périphérique connecté (PC, tablette, portable...).

# Bibliographie

---

[1]'Etude des performances d'une couveuse solaire dans l'incubation des œufs de poule (Gallus gallus), Yoda Seydou, Burkina-Faso.

[2] L'incubateur ou couveuse Galinettes.net pour le bien-être de nos poulettes <http://www.gallinette.net/forum/showthread.php?t=6877>.

[3] Les couveuses <http://aviculture85.e-monsite.com/pages/les-couveuses.html>.

[4]'Guide d'incubation', Hubbard.

[5]'Commande adaptative de la température à l'intérieur d'un four électrique', proposer par : B.KAZED, 2011.

[6]'Acquisition et affichage de l'humidité à travers le bus I2C', proposer par B.KAZED, 2004.

[7] <https://www.gotronic.fr/cat-composants-electroniques-5.htm>.

[8]'utilisation des algorithmes génétique pour l'identification des systèmes dynamiques', proposé par Benouared Abdelhakim, Hadj Sadouke Mhamed, 2005.

[9] 'Identification des Processus', P. Bonnet, université de Lille, 2010-2011.

[10] 'cours Identification des systèmes ', Mr A.MADDI, Université SAAD DAHLEB Blida Faculté de Technologie, Septembre 2015.

[11] 'Identification des modèles de procédés : les bases', PDF.

[12] 'cours commande numérique des systèmes', Mr K.KARA, Université SAAD DAHLEB Blida Faculté de Technologie, Septembre 2015.

[13] 'ArduinoCottenceau1112', pdf.

# Bibliographie

---

[14] 'AtMega32DocFr', pdf.

[15] ' [http://fr.farnell.com/sensirion/sht75/capteur-humidite-temp-v4/dp/1590514.](http://fr.farnell.com/sensirion/sht75/capteur-humidite-temp-v4/dp/1590514)'

[16] ' [https://www.mfacomodrills.com/gearboxes/919d\\_series.html.](https://www.mfacomodrills.com/gearboxes/919d_series.html)'

[17] Généralités regulation.PDF

[18] Régulation automatique : Chapitre 4: Régulateur PID, Michel ETIQUE, Haute Ecole d'Ingénieurs et de Gestion du canton de Vaud (HEIG- *Vd*)

# **Annexes**

## Annexe A : Protocole I2C

### a) Codage de l'information :

L'I2C est basé sur le codage de type binaire (0 ou 1), qui ne connaît pas de valeur intermédiaire que ces deux états.

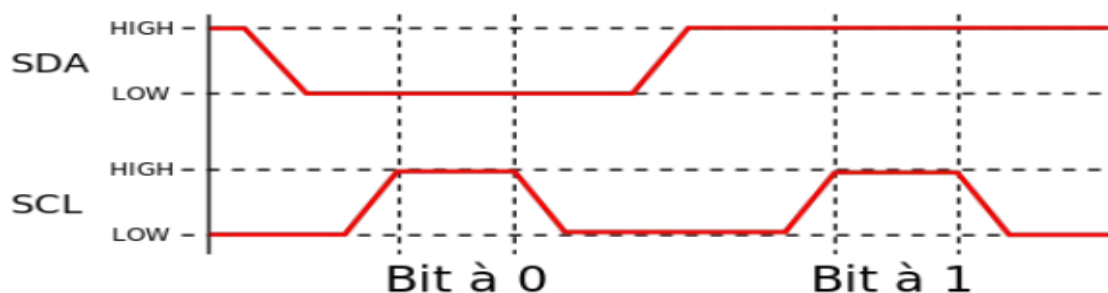
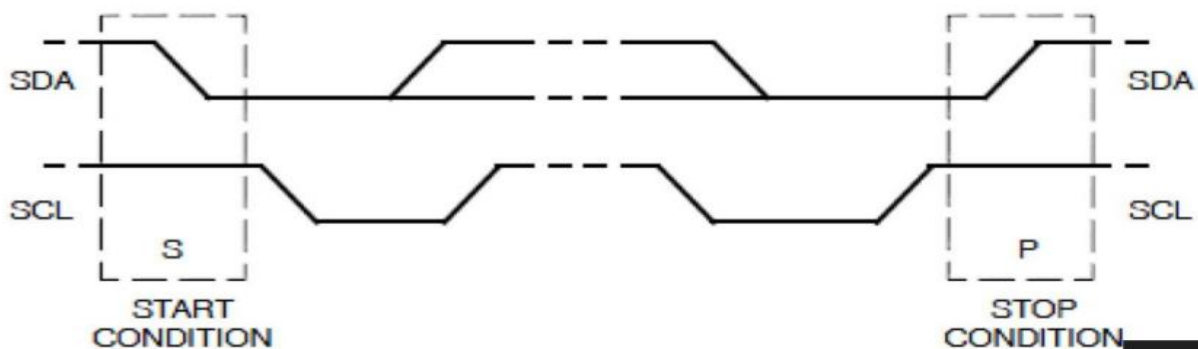


Fig.II.1 condition de fonctionnement de bus.

Sur le graphique ci-dessus, on voit qu'il faut que le niveau High ou Low de la ligne des données(SDA) soit à un niveau stable au moment du passage au niveau High sur la ligne d'horloge(SCL) pour que le bit soit lu. De plus, on peut aussi voir que l'état logique 0, représenté par l'état LOW sur le graphique correspond à l'état dit « dominant » pour la ligne d'horloge et que l'état logique 1, représenté par l'état HIGH correspond à l'état dit « récessif ». Ce bus utilise des résistances de type « pull up » qui sont des résistances de tirage vers le 5V, c'est pourquoi, lorsque le bus n'est pas utilisé, SDA et SCL sont aux niveaux hauts.

### b) Condition de départ et condition d'arrêt :

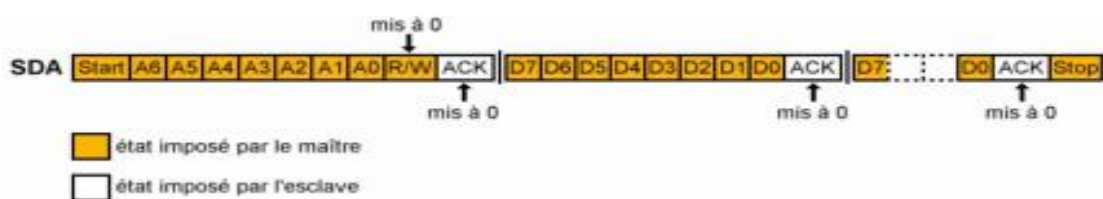
Il y a une séquence particulière appelée « Start-condition » qui est toujours nécessaire pour débiter les échanges de données, cela se traduit par le passage de l'état logique 1(niveau haut) à l'état 0 (niveau bas) pour la ligne SDA avec le niveau haut pour ligne SCL. La séquence « Stop-condition » détermine la fin des échanges avec le passage de la ligne SDA de l'état 0(niveau bas) à l'état logique 1(niveau haut) avec la ligne SCL à 1.



### c) Le bit Read/Write:

C'est un bit qui indique au récepteur si les données envoyés par le maître sont à écrire (R/W=0) ou à lire (R/W=1). Si le bit est à 0, cela veut dire que le maître va envoyer des données, l'esclave va donc devoir lire ses données, à l'inverse, si le bit est à 1, cela veut dire que le maître attend des données, et donc l'esclave doit lui en envoyer.

Exemple d'échange entre maître et esclave dans le cas d'une écriture de données :

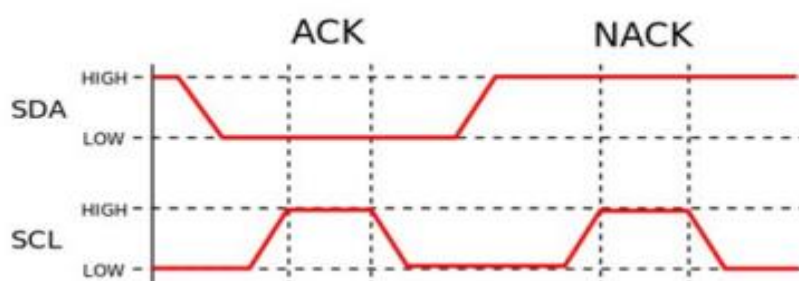


Exemple d'échange entre maître et esclave dans le cas d'une lecture de données :



### d) . La condition « acquittement et non acquittement » :

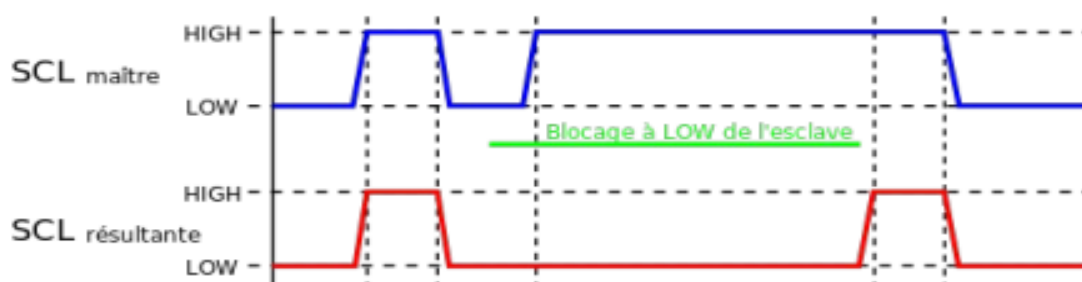
L'acquittement "Acknowledge" est en fait l'accusé de réception de l'information envoyé. En effet c'est le récepteur qui doit émettre ce bit pour indiquer qu'il a bien lu l'octet ou l'adresse envoyé par l'émetteur. Cette indication est lu comme un bit classique, elle vaudra 0 si l'accusé de réception est faites elle est symbolisé par ACK. Sinon ça sera un NOACK pour tout autre raison. Schématiquement, voici à quoi ressemble la condition d'acquittement ou de non-acquittement :



## e) La condition « Pause » :

Cette condition est en fait un cas particulier lors de l'écriture. En effet c'est le récepteur qui demande au maître de patienter une durée de temps pour qu'il puisse traiter l'information. Le récepteur bloque la ligne d'horloge à l'état bas durant la pause demandée. En effet le maître n'arrive pas à envoyer l'impulsion d'horloge, donc il ne peut pas envoyer l'information jusqu'à ce que le récepteur soit prêt et libère la ligne SCL, qui prend alors l'état haut. Le maître peut maintenant poursuivre.

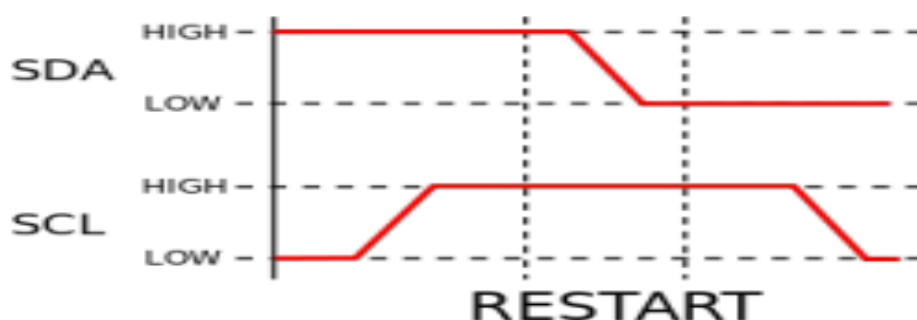
Schématiquement, voici à quoi ressemble la condition de Pause :





### f) La condition de « Restart » :

Le bus I2C permet une alternance d'échange d'écriture et de lecture sans pour autant arrêter le dialogue à chaque changement d'état. En effet, il existe une condition appelée «Restart-condition». Le cas le plus propice à l'utilisation de cette condition, est le cas du dialogue avec une RAM. Le maître commence par envoyer l'adresse du composant avec le bit R/W positionné sur écriture. La RAM adressée en esclave renvoie le bit d'acquittement (ACK) à 0. Ensuite, le maître transmet l'adresse interne de la case mémoire demandée. Une fois encore, l'esclave répond par ACK = 0. Le maître envoie alors à nouveau une condition de départ (sans passer par une condition d'arrêt), puis de nouveau l'adresse du composant sélectionné, mais en plaçant le bit R/W sur la position lecture, soit le bit de R/W à 1. L'esclave va répondre par un bit d'acquittement (ACK) à 0 et enchaîner par la transmission du contenu de la case mémoire demandée. C'est toujours le maître qui impose l'horloge SCL mais c'est l'esclave, ici la RAM, qui contrôle la ligne SDA. Une fois les 8 bits de données transmis par la RAM, si le maître veut lire le contenu de la case mémoire suivante, il placera le bit ACK à 0. Dans ce cas, la RAM recommence la lecture avec la case mémoire suivante. En revanche, si le maître souhaite en terminer avec la lecture, il placera le bit ACK à 1 et il générera ensuite la condition arrêt. Schématiquement, voici la condition de Restart :



### g) L'adressage des esclaves :

Le bus I2C peut mettre en relation un maître à plusieurs esclaves. Il définit à qu'il va envoyer telle ou telle information. Les esclaves possèdent tous un adressage différent, c'est une adresse sur 8 bits : 7 bits destinés à l'adresse et le 8ème est réservé au bit qui désigne l'état de lecture ou d'écriture.

Cependant, les esclaves ne peuvent pas prendre toutes les adresses, en effet, il y a certaines adresses qui sont réservées, en voici la liste :

-« 00000000 » : est une adresse utilisée pour s'adresser à tous les esclaves.

-« 0000001X » : est une adresse utilisée pour accéder aux composants CBUS qui

est l'ancêtre de l'I<sup>2</sup>C.

-« 0000010X » : réservée pour d'autres systèmes de bus.

-« 0000011X » : réservée pour des utilisations spécifiques.

-« 00001XXX » : adresse utilisée pour les composants haute-vitesse.

-« 11111XXX » : réservée pour des utilisations spécifiques.

-« 11110yzX » : adresse permettant de préciser une adresse sur 10 bits

---

## Annexe B : L'ATMega 328

Le microcontrôleur utilisé sur la carte Arduino UNO est un microcontrôleur **ATMega328**. C'est un microcontrôleur ATMEL de la famille AVR 8bits.

Les principales caractéristiques sont :

**FLASH** = mémoire programme de 32Ko

**SRAM** = données (volatiles) 2Ko

**EEPROM** = données (non volatiles) 1Ko

**Digital I/O (entrées-sorties Tout Ou Rien)**

=

3 ports PortB, PortC, PortD (soit 23 broches en tout I/O)

**Timers/Counters** : Timer0 et Timer2

(comptage 8 bits), Timer1 (comptage 16bits) Chaque timer peut être utilisé pour générer deux signaux PWM. (6 broches OCxA/OCxB)

**Plusieurs broches multi-fonctions** : certaines broches peuvent avoir plusieurs fonctions différentes choisies par programmation

**PWM** = 6 broches **OC0A(PD6)**, **OC0B(PD5)**, **OC1A(PB1)**, **OC1B(PB3)**, **OC2A(PB3)**, **OC2B(PD3)**

**Analog to Digital Converter** (résolution 10bits) = 6 entrées multiplexées **ADC0(PC0)** à **ADC5(PC5)**

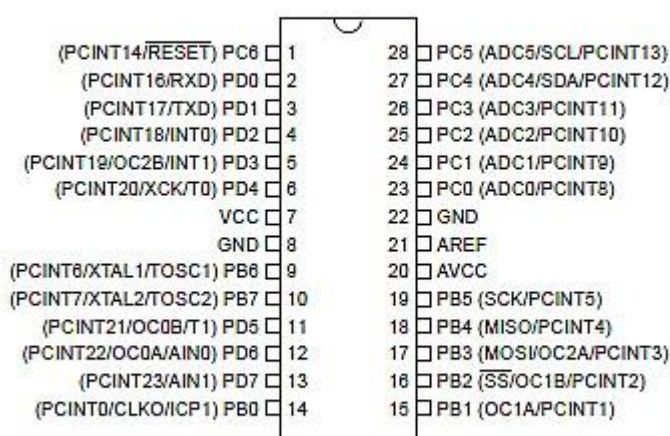
**Gestion bus I2C** (TWI Two Wire Interface) = le bus est exploité via les broches **SDA(PC5)/SCL(PC4)**.

**Port série (USART)** = émission/réception série via les broches **TXD(PD1)/RXD(PD0)** **Comparateur Analogique** =

broches **AIN0(PD6)** et **AIN1 (PD7)** peut déclencher interruption

**Watchdog Timer programmable.**

**Gestion d'interruptions (24 sources possibles (cf interrupt vectors))** : en résumé



- Interruptions liées aux entrées **INT0 (PD2) et INT1 (PD3)**
- Interruptions sur changement d'état des broches **PCINT0 à PCINT23**
- Interruptions liées aux Timers 0, 1 et 2 (plusieurs causes configurables)
- Interruption liée au comparateur analogique
- Interruption de fin de conversion **ADC**
- Interruptions du port série **USART**
- Interruption du bus **TWI (I2C)**

## 4 Structure interne de l'ATMega328 (extraits de documentations ATMEL)

L'utilisation des périphériques intégrés (Entrées Sorties TOR, Timers, ...) repose sur l'exploitation (lecture/écriture) de registres internes. Ces registres, essentiellement 8 bits, sont décrits par un nom, y compris dans la programmation en C. Cette section fournit quelques détails importants sur les registres internes du microcontrôleur ATMega328.

**Notation** : par la suite, pour un registre nommé **R**, la notation **R.n** désigne le bit de rang **n** du registre **R**. Le bit **R.0** est le bit de poids faible de **R**.

### 4.1 Status Register (SREG)

Le registre **SREG** contient des indicateurs liés aux opérations et le bit d'autorisation générale des interruptions. Les bits de ce registre sont : **Z** (Zero), **C** (Carry), **S** (Sign) ... Le bit d'activation général du système d'interruptions est le bit **I (SREG.7)**

**Note** : en langage C, ce bit **I** est modifiable via les appels **sei ()** (set IT) **cli ()** (Clear IT)

#### SREG – AVR Status Register

The AVR Status Register – SREG – is defined as:

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
0x3F (0x5F)	I	T	H	S	V	N	Z	C	SREG
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

#### • Bit 7 – I: Global Interrupt Enable

The Global Interrupt Enable bit must be set for the interrupts to be enabled. The individual interrupt enable control is then performed in separate control registers. If the Global Interrupt Enable Register is cleared, none of the interrupts are enabled independent of the individual interrupt enable settings. The I-bit is cleared by hardware after an interrupt has occurred, and is set by the RETI instruction to enable subsequent interrupts. The I-bit can also be set and cleared by the application with the SEI and CLI instructions, as described in the instruction set reference.

## 4.2 Digital I/O (Entrées Sorties Tout Ou Rien TOR)

Souvent, les microcontrôleurs disposent de broches d'entrée/sortie TOR, comme sur un automate programmable industriel (cf cours Automatismes Industriels). Pour placer l'état d'une sortie à 0 ou 1, ou lire l'état d'une entrée, il faut exploiter des registres internes, décrits ci-dessous.

Les entrées-sorties sont réparties dans 3 groupes de broches appelés *ports*. Le port B regroupe les broches notées PBx, le port C les broches PCx et le port D les broches PDx. Chaque port est configuré/exploité grâce à 3 registres.

**PORTx** = pour l'écriture de valeurs en sortie

**DDRx** = détermine la direction de chaque broche du port (1-sortie 0-entrée) **PINx** = permet la lecture de la valeur en entrée

Chaque broche de port E/S a une résistance de pull-up interne qui peut être désactivée. Le bit **PUD** du registre MCUCR permet la désactivation des résistances de pull-up.

**Direction des ports** : si le bit **DDRB.2** vaut 1 alors la broche **PB2** est une sortie TOR.

**Ecriture des sorties TOR** : si une broche est configurée en sortie ( $DDRx.n=1$ ) alors l'écriture du bit **PORTx.n** permet de définir l'état de la sortie (0 ou 1).

**Ex** : **DDRB.5=1** (donc **PB5 en sortie**) écrire 0 ou 1 dans le bit **PORTB.5** permet de définir l'état de la sortie **PB5**.

**Lectures des entrées TOR** : si une broche est configurée en entrée ( $DDRx.n=0$ ) alors la lecture du bit **PINx.n** permet de connaître l'état de l'entrée.

**Ex** : **DDRB.4=0** (donc **PB4 en entrée**), lire **PINB.4** permet de connaître l'état de l'entrée **PB4**.

## MCUCR – MCU Control Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
0x35 (0x55)	–	BODS	BODSE	PUD	–	–	IVSEL	IVCE	MCUCR
Read/Write	R	R	R	R/W	R	R	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

- **Bit 4 – PUD: Pull-up Disable**

When this bit is written to one, the pull-ups in the I/O ports are disabled even if the DDxn and PORTxn Registers are configured to enable the pull-ups ( $\{DDxn, PORTxn\} = 0b01$ ). See "Configuring the Pin" on page 76 for more details about this feature.

## PORTB – The Port B Data Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
0x05 (0x25)	PORTB7	PORTB6	PORTB5	PORTB4	PORTB3	PORTB2	PORTB1	PORTB0	PORTB
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

## DDRB – The Port B Data Direction Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
0x04 (0x24)	DDB7	DDB6	DDB5	DDB4	DDB3	DDB2	DDB1	DDB0	DDRB
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

## PINB – The Port B Input Pins Address

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
0x03 (0x23)	PINB7	PINB6	PINB5	PINB4	PINB3	PINB2	PINB1	PINB0	PINB
Read/Write	R	R	R	R	R	R	R	R	
Initial Value	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	

## Gestion des résistances pull-up internes

En technologie MOS, une entrée "en l'air" a un état indéterminé. Lorsqu'on veut exploiter des boutons poussoir, on les branche de façon à ramener l'entrée à 0 quand on ferme le contact. Lorsque le contact est ouvert, l'état de l'entrée est ramené à 1 par des résistances de tirage à 1 (pull-up).

**PORTx.n=1 ET DDRx.n=0 ALORS pull-interne de Pxn activée**

**PORTx.n=0 OU DDRx.n=1 ALORS pull-interne de Pxn désactivée**

Si **PUD=1** ALORS toutes les résistances de pull-up interne de tous les ports désactivées

## 4.3 Sources d'interruption exploitables sur ATmega328 (carte Arduino UNO)

Le vecteur d'interruptions décrit toutes les sources pouvant, sous-réserve de bonne configuration, conduire à un déclenchement d'interruption.

### 11.4 Interrupt Vectors in ATmega328P

**Table 11-6.** Reset and Interrupt Vectors in ATmega328P

VectorNo.	Program Address <sup>(2)</sup>	Source	Interrupt Definition
1	0x0000 <sup>(1)</sup>	RESET	External Pin, Power-on Reset, Brown-out Reset and Watchdog System Reset
2	0x0002	INT0	External Interrupt Request 0
3	0x0004	INT1	External Interrupt Request 1
4	0x0006	PCINT0	Pin Change Interrupt Request 0
5	0x0008	PCINT1	Pin Change Interrupt Request 1
6	0x000A	PCINT2	Pin Change Interrupt Request 2
7	0x000C	WDT	Watchdog Time-out Interrupt
8	0x000E	TIMER2 COMPA	Timer/Counter2 Compare Match A
9	0x0010	TIMER2 COMPB	Timer/Counter2 Compare Match B
10	0x0012	TIMER2 OVF	Timer/Counter2 Overflow
11	0x0014	TIMER1 CAPT	Timer/Counter1 Capture Event
12	0x0016	TIMER1 COMPA	Timer/Counter1 Compare Match A
13	0x0018	TIMER1 COMPB	Timer/Counter1 Compare Match B
14	0x001A	TIMER1 OVF	Timer/Counter1 Overflow
15	0x001C	TIMER0 COMPA	Timer/Counter0 Compare Match A
16	0x001E	TIMER0 COMPB	Timer/Counter0 Compare Match B
17	0x0020	TIMER0 OVF	Timer/Counter0 Overflow
18	0x0022	SPI, STC	SPI Serial Transfer Complete
19	0x0024	USART, RX	USART Rx Complete
20	0x0026	USART, UDRE	USART, Data Register Empty
21	0x0028	USART, TX	USART, Tx Complete
22	0x002A	ADC	ADC Conversion Complete

**Table 11-1.** Reset and Interrupt Vectors in ATmega48PA (Continued)

Vector No.	Program Address	Source	Interrupt Definition
24	0x017	ANALOG COMP	Analog Comparator
25	0x018	TWI	2-wire Serial Interface
26	0x019	SPM READY	Store Program Memory Ready

### 4.3.1 Interruptions Externes

Il s'agit d'interruptions liées à des niveaux ou des changements d'états de broches du microcontrôleur. Les broches impliquées doivent être configurées en entrée (cf. 4.2 DIGITAL I/O).



**Broches INT0 (PD2)/INT1(PD3) :** configurables pour déclencher les interruptions (n° 2 et 3) sur niveau 0, front négatif ou positif.

## La cause d'interruption est choisie par le registre EICRA

### EICRA – External Interrupt Control Register A

The External Interrupt Control Register A contains control bits for interrupt sense control.

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0									
(0x69)	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20px; text-align: center;">-</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">-</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">-</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">-</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">ISC11</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">ISC10</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">ISC01</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">ISC00</td> </tr> </table>								-	-	-	-	ISC11	ISC10	ISC01	ISC00	EICRA
-	-	-	-	ISC11	ISC10	ISC01	ISC00										
Read/Write	R	R	R	R	R/W	R/W	R/W	R/W									
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0									

**Table 12-2.** Interrupt 0 Sense Control

ISC01	ISC00	Description
0	0	The low level of INT0 generates an interrupt request.
0	1	Any logical change on INT0 generates an interrupt request.
1	0	The falling edge of INT0 generates an interrupt request.
1	1	The rising edge of INT0 generates an interrupt request.

**Note :** Pour l'interruption INT1, les bits ISC11 et ISC10 ont le même sens que ci-dessus.

## Activation des interruptions INT0/INT1 = bit SREG.7 (I)=1 et mise à 1 de EIMSK.0/EIMSK.1

### EIMSK – External Interrupt Mask Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0										
0x1D (0x3D)	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20px; text-align: center;">-</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">-</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">-</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">-</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">-</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">-</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">-</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">INT1</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">INT0</td> </tr> </table>								-	-	-	-	-	-	-	INT1	INT0	EIMSK
-	-	-	-	-	-	-	INT1	INT0										
Read/Write	R	R	R	R	R	R	R/W	R/W										
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0										

**Flags internes** = lorsqu'une cause d'IT est détectée, un flag interne de EIFR est positionné

### EIFR – External Interrupt Flag Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0										
0x1C (0x3C)	<table border="1" style="display: inline-table; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 20px; text-align: center;">-</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">-</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">-</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">-</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">-</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">-</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">-</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">INTF1</td> <td style="width: 20px; text-align: center;">INTF0</td> </tr> </table>								-	-	-	-	-	-	-	INTF1	INTF0	EIFR
-	-	-	-	-	-	-	INTF1	INTF0										
Read/Write	R	R	R	R	R	R	R/W	R/W										
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0										

**Exemple :** on souhaite qu'un front négatif sur INT1 (PD3) conduise à une interruption INT1. Il faut donc  
**SREG.7=1** (bit général d'activation des IT, sans lui aucune IT)  
**EIMSK.1 (INT1)= 1** (pour prise en compte des IT INT1)  
**EICRA.2(ISC10)=0 ET EICRA.3(ISC11)=1** (IT sur front négatif sur INT1)

**Broches PCINT0 à PCINT23 :** configurables pour déclencher des interruptions (n° 4,5 et 6) sur des changements d'état ("Pin Change") des broches (configurées en entrée DDRx.n=1). Les broches sont séparées en 3 sous-groupes,





**Exemple** : on souhaite qu'un changement d'état de la broche **PCINT2** (PB2) conduise à une interruption **PCIE0**. Il faut donc

- SREG.7=1** (bit général d'activation des IT, sans lui aucune IT)
- PCICR.0 = PCIE0=1** (pour que le sous-groupe 0 puisse conduire à IT)
- PCMSK0.2 = PCINT2 = 1** (pour que la broche PCINT2 soit prise en compte)

### 4.3.2 Interruptions Timers

Plusieurs sources d'interruptions sont liées à un même timer.

### Les indicateurs internes liés aux interruptions timers 0 sont dans le registre TIFR0

#### TIFR0 – Timer/Counter 0 Interrupt Flag Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
0x15 (0x35)	–	–	–	–	–	OCF0B	OCF0A	TOV0	TIFR0
Read/Write	R	R	R	R	R	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

#### Activation des interruptions Timer 0 (3 sources n°14, 15 et 16)

#### TIMSK0 – Timer/Counter Interrupt Mask Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0x6E)	–	–	–	–	–	OCIE0B	OCIE0A	TOIE0	TIMSK0
Read/Write	R	R	R	R	R	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

- **Bit 2 – OCIE0B: Timer/Counter Output Compare Match B Interrupt Enable**

When the OCIE0B bit is written to one, and the I-bit in the Status Register is set, the Timer/Counter Compare Match B interrupt is enabled. The corresponding interrupt is executed if a Compare Match in Timer/Counter occurs, i.e., when the OCF0B bit is set in the Timer/Counter Interrupt Flag Register – TIFR0.

- **Bit 1 – OCIE0A: Timer/Counter0 Output Compare Match A Interrupt Enable**

When the OCIE0A bit is written to one, and the I-bit in the Status Register is set, the Timer/Counter0 Compare Match A interrupt is enabled. The corresponding interrupt is executed if a Compare Match in Timer/Counter0 occurs, i.e., when the OCF0A bit is set in the Timer/Counter 0 Interrupt Flag Register – TIFR0.

- **Bit 0 – TOIE0: Timer/Counter0 Overflow Interrupt Enable**

When the TOIE0 bit is written to one, and the I-bit in the Status Register is set, the Timer/Counter0 Overflow interrupt is enabled. The corresponding interrupt is executed if an overflow in Timer/Counter0 occurs, i.e., when the TOV0 bit is set in the Timer/Counter 0 Interrupt Flag Register – TIFR0.

**Remarque** : pour les Timers 1 et 2, les configurations sont similaires.

**Exemple :** on souhaite que chaque débordement du Timer 0 conduise à une interruption.

**SREG.7=1** (bit général d'activation des IT, sans lui aucune IT)  
**TIMSK0.0 (TOIE0)=1** (interruption sur débordement du timer 0)

## 4.4 Timers/Counters de ATmega328

Les microcontrôleurs AVR disposent de modules de temporisation/comptage internes, fonctionnant pour certains avec des registres de comptage sur 8 bits, et pour d'autres sur 16 bits. Dans tous les cas, chaque événement de comptage conduit à une modification du registre de comptage (+1 ou -1). L'événement de comptage peut être un "tick" de l'horloge du microcontrôleur, ce qui revient à mesurer l'écoulement du temps. L'événement de comptage peut aussi être un front sur une broche d'entrée du microcontrôleur (les broches T0 et T1 peuvent servir d'entrée de comptage).

**Fonction Temporisateur :** lorsque l'on compte des "ticks" de l'horloge qui cadence le microcontrôleur, on mesure du temps. Les modules Timers/Counters permettent de compter les ticks du signal d'horloge ou un signal de fréquence plus faible obtenu par un diviseur appelé **prescaler**.

**Fonction Compteur :** lorsque l'on compte des fronts sur une entrée de comptage (broches T0 ou T1), on utilise alors la fonction "compteur" du module.

Le choix entre fonction de temporisation (avec prédiviseur de fréquence ou non) et fonction de comptage se fait par paramétrage de registres dédiés à la gestion des modules Timers/Counters.

**Génération de signaux périodiques :** les modules Timers/Counters sont assez complexes et chacun de ces modules peut générer deux signaux PWM dont le rapport cyclique est facilement modifiable.

**Remarque :** ces périphériques intégrés sont assez complexes (environ 70 pages du datasheet ATmega). Seule une vision simplifiée est fournie ici.

### 4.4.1 Timer/Counter 0 (comptage 8 bits)

C'est un module Timer/Counter avec registre de comptage 8 bits. En utilisant l'IDE Arduino, le timer 0 est implicitement utilisé par les fonctions de delay (ainsi que l'interruption correspondante). Ce module Timer/Counter n'est donc pas utilisable directement avec la carte ARDUINO.

### 4.4.2 Timer/Counter 2 (comptage 8 bits)

C'est un module Timer/Counter avec registre de comptage 8 bits.



## OCR2A – Output Compare Register A

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0xB3)	OCR2A[7:0]								OCR2A
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

The Output Compare Register A contains an 8-bit value that is continuously compared with the counter value (TCNT2). A match can be used to generate an Output Compare interrupt, or to generate a waveform output on the OC2A pin.

## OCR2B – Output Compare Register B

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0xB4)	OCR2B[7:0]								OCR2B
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	

## TCCR2A – Timer/Counter Control Register A

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0xB0)	COM2A1	COM2A0	COM2B1	COM2B0	–	–	WGM21	WGM20	TCCR2A
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R	R	R/W	R/W	

## TCCR2B – Timer/Counter Control Register B

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0xB1)	FOC2A	FOC2B	–	–	WGM22	CS22	CS21	CS20	TCCR2B
Read/Write	W	W	R	R	R	R	R/W	R/W	

## TIMSK2 – Timer/Counter2 Interrupt Mask Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0x70)	–	–	–	–	–	OCIE2B	OCIE2A	TOIE2	TIMSK2
Read/Write	R	R	R	R	R	R/W	R/W	R/W	

## TIFR2 – Timer/Counter2 Interrupt Flag Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
0x17 (0x37)	–	–	–	–	–	OCF2B	OCF2A	TOV2	TIFR2
Read/Write	R	R	R	R	R	R/W	R/W	R/W	

Les bits WGM22:20 définissent le mode de fonctionnement du module.

**Table 17-8.** Waveform Generation Mode Bit Description

Mode	WGM2	WGM1	WGM0	Timer/Counter Mode of Operation	TOP	Update of OCRx at	TOV Flag Set on <sup>(1)(2)</sup>
0	0	0	0	Normal	0xFF	Immediate	MAX
1	0	0	1	PWM, Phase Correct	0xFF	TOP	BOTTOM
2	0	1	0	CTC	OCRA	Immediate	MAX
3	0	1	1	Fast PWM	0xFF	BOTTOM	MAX
4	1	0	0	Reserved	–	–	–
5	1	0	1	PWM, Phase Correct	OCRA	TOP	BOTTOM
6	1	1	0	Reserved	–	–	–
7	1	1	1	Fast PWM	OCRA	BOTTOM	TOP

Notes: 1. MAX= 0xFF  
2. BOTTOM= 0x00

Selon le mode choisi par les bits WGM0:2 on a les options suivantes (mode PWM Phase correct non décrit)

**Bits 7:6 – COM2A1:0: Compare Match Output A Mode.** Ces bits configurent le rôle de la broche OC2A/PB3. Si l'un des bits COM2A1:0 vaut 1, la broche OC2A a une fonction alternative (associée au module Timer/Counter 2). Néanmoins, le registre DDR doit être tel que OC2A/PB3 **soit une sortie (cf 4.2)**.

**Table 17-2 : Mode Normal ou CTC (non-PWM mode)**

**Table 17-2.** Compare Output Mode, non-PWM Mode

COM2A1	COM2A0	Description
0	0	Normal port operation, OC0A disconnected.
0	1	Toggle OC2A on Compare Match
1	0	Clear OC2A on Compare Match
1	1	Set OC2A on Compare Match

**Table 17-3 : Fast-PWM mode**

**Table 17-3.** Compare Output Mode, Fast PWM Mode<sup>(1)</sup>

COM2A1	COM2A0	Description
0	0	Normal port operation, OC2A disconnected.
0	1	WGM22 = 0: Normal Port Operation, OC0A Disconnected. WGM22 = 1: Toggle OC2A on Compare Match.
1	0	Clear OC2A on Compare Match, set OC2A at BOTTOM, (non-inverting mode).
1	1	Set OC2A on Compare Match, clear OC2A at BOTTOM, (inverting mode).

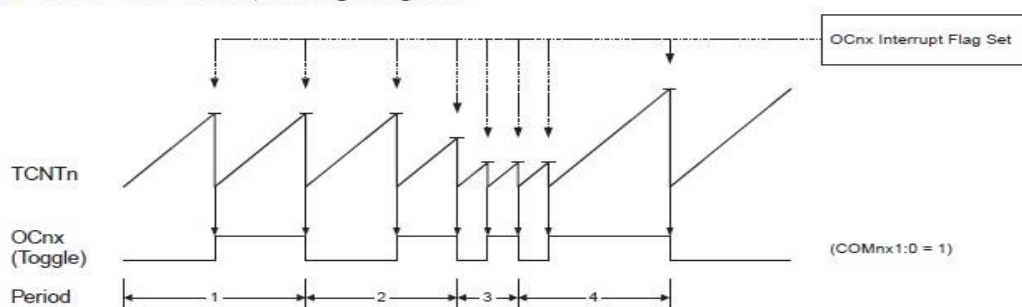
### Clear Timer on Compare Match (CTC) Mode

En mode CTC (WGM22:0 = 2), le registre OCR2A règle la résolution. Le compteur TCTN2 est remis à zéro après l'égalité (match) TCTN2=OCR2A. Le registre OCR2A définit la valeur maximale pour le compteur, et donc sa



résolution. On peut configurer le module 2 pour inverser l'état de la sortie OC2A (PB3) il faut alors (COM2A1:0 = 1).

**Figure 17-5.** CTC Mode, Timing Diagram



## Prescaler Timer 2 (réglage de la vitesse de débordement en fonction de l'horloge)

**Table 17-9.** Clock Select Bit Description

CS22	CS21	CS20	Description
0	0	0	No clock source (Timer/Counter stopped).
0	0	1	$clk_{T2S}/(\text{No prescaling})$
0	1	0	$clk_{T2S}/8$ (From prescaler)
0	1	1	$clk_{T2S}/32$ (From prescaler)
1	0	0	$clk_{T2S}/64$ (From prescaler)
1	0	1	$clk_{T2S}/128$ (From prescaler)
1	1	0	$clk_{T2S}/256$ (From prescaler)
1	1	1	$clk_{T2S}/1024$ (From prescaler)

### 4.4.3 Timer/Counter 1 (comptage 16 bits)

Le registre de comptage TCNT1, ainsi que les registres de comparaison OCR1A et OCR1B, sont cette fois-ci sur 16 bits.

**Note:** en langage d'assemblage, il faut deux accès 8 bits pour lire/écrire ces registres 16 bits. En langage C, on peut manipuler symboliquement des données 16 bits via les symboles TCNT1, OCR1A et OCR1B sans se soucier de la façon dont le code sera généré.





## TIMSK1 – Timer/Counter1 Interrupt Mask Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0x6F)	–	–	ICIE1	–	–	OCIE1B	OCIE1A	TOIE1	TIMSK1
Read/Write	R	R	R/W	R	R	R/W	R/W	R/W	

## TIFR1 – Timer/Counter1 Interrupt Flag Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
0x16 (0x36)	–	–	ICF1	–	–	OCF1B	OCF1A	TOV1	TIFR1
Read/Write	R	R	R/W	R	R	R/W	R/W	R/W	

## TCCR1A – Timer/Counter1 Control Register A

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0x80)	COM1A1	COM1A0	COM1B1	COM1B0	–	–	WGM11	WGM10	TCCR1A
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R	R	R/W	R/W	

## TCCR1B – Timer/Counter1 Control Register B

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0x81)	ICNC1	ICES1	–	WGM13	WGM12	CS12	CS11	CS10	TCCR1B
Read/Write	R/W	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	

Selon le mode choisi par les bits WGM10:3 on a les options suivantes (mode PWM Phase correct non décrit)

**Table 15-4.** Waveform Generation Mode Bit Description<sup>(1)</sup>

Mode	WGM13	WGM12 (CTC1)	WGM11 (PWM11)	WGM10 (PWM10)	Timer/Counter Mode of Operation	TOP	Update of OCR1x at	TOV1 Flag Set on
0	0	0	0	0	Normal	0xFFFF	Immediate	MAX
1	0	0	0	1	PWM, Phase Correct, 8-bit	0x00FF	TOP	BOTTOM
2	0	0	1	0	PWM, Phase Correct, 9-bit	0x01FF	TOP	BOTTOM
3	0	0	1	1	PWM, Phase Correct, 10-bit	0x03FF	TOP	BOTTOM
4	0	1	0	0	CTC	OCR1A	Immediate	MAX
5	0	1	0	1	Fast PWM, 8-bit	0x00FF	BOTTOM	TOP
6	0	1	1	0	Fast PWM, 9-bit	0x01FF	BOTTOM	TOP
7	0	1	1	1	Fast PWM, 10-bit	0x03FF	BOTTOM	TOP
8	1	0	0	0	PWM, Phase and Frequency Correct	ICR1	BOTTOM	BOTTOM
9	1	0	0	1	PWM, Phase and Frequency Correct	OCR1A	BOTTOM	BOTTOM
10	1	0	1	0	PWM, Phase Correct	ICR1	TOP	BOTTOM
11	1	0	1	1	PWM, Phase Correct	OCR1A	TOP	BOTTOM
12	1	1	0	0	CTC	ICR1	Immediate	MAX
13	1	1	0	1	(Reserved)	–	–	–
14	1	1	1	0	Fast PWM	ICR1	BOTTOM	TOP
15	1	1	1	1	Fast PWM	OCR1A	BOTTOM	TOP

Note: 1. The CTC1 and PWM11:0 bit definition names are obsolete. Use the WGM12:0 definitions. However, the functionality and location of these bits are compatible with previous versions of the timer.

**Table 15-1 : Mode Normal ou CTC (non-PWM mode)**

**Table 15-1.** Compare Output Mode, non-PWM

COM1A1/COM1B1	COM1A0/COM1B0	Description
0	0	Normal port operation, OC1A/OC1B disconnected.
0	1	Toggle OC1A/OC1B on Compare Match.
1	0	Clear OC1A/OC1B on Compare Match (Set output to low level).
1	1	Set OC1A/OC1B on Compare Match (Set output to high level).

**Table 15-2 : Fast-PWM mode**

**Table 15-2.** Compare Output Mode, Fast PWM<sup>(1)</sup>

COM1A1/COM1B1	COM1A0/COM1B0	Description
0	0	Normal port operation, OC1A/OC1B disconnected.
0	1	WGM13:0 = 14 or 15: Toggle OC1A on Compare Match, OC1B disconnected (normal port operation). For all other WGM1 settings, normal port operation, OC1A/OC1B disconnected.
1	0	Clear OC1A/OC1B on Compare Match, set OC1A/OC1B at BOTTOM (non-inverting mode)
1	1	Set OC1A/OC1B on Compare Match, clear OC1A/OC1B at BOTTOM (inverting mode)

Note: 1. A special case occurs when OCR1A/OCR1B equals TOP and COM1A1/COM1B1 is set. In this case the compare match is ignored, but the set or clear is done at BOTTOM. See Section "15.9.3" on page 126. for more details.

## Prescaler Timer 1 (réglage de la vitesse de débordement en fonction de l'horloge)

**Table 15-5.** Clock Select Bit Description

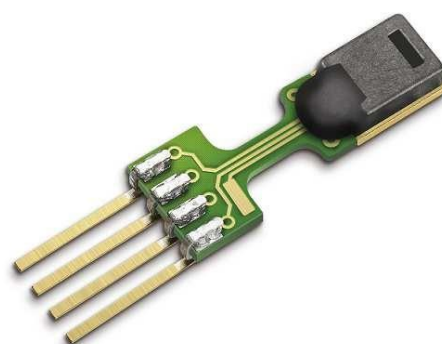
CS12	CS11	CS10	Description
0	0	0	No clock source (Timer/Counter stopped).
0	0	1	$clk_{i/O}/1$ (No prescaling)
0	1	0	$clk_{i/O}/8$ (From prescaler)
0	1	1	$clk_{i/O}/64$ (From prescaler)
1	0	0	$clk_{i/O}/256$ (From prescaler)
1	0	1	$clk_{i/O}/1024$ (From prescaler)
1	1	0	External clock source on T1 pin. Clock on falling edge.
1	1	1	External clock source on T1 pin. Clock on rising edge.

## Annex C : SHT-75

### Datasheet SHT7x (SHT71, SHT75)

#### Humidity and Temperature Sensor IC

- Fully calibrated
- Digital output
- Low power consumption
- Excellent long term stability
- Pin type package – easy integration



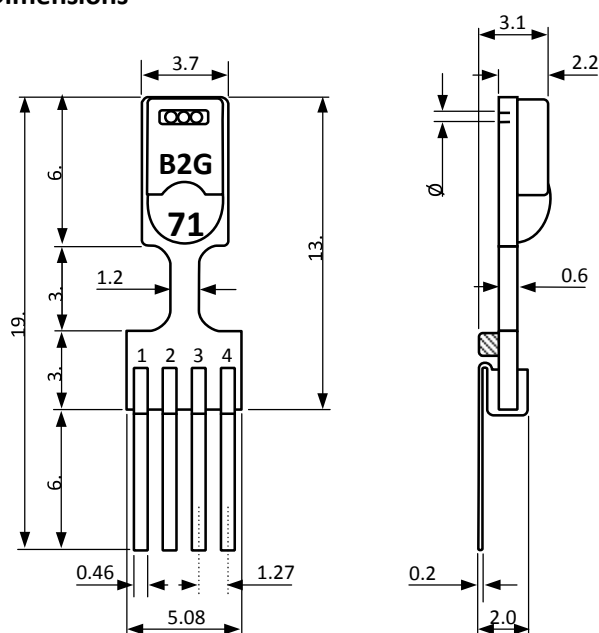
#### Product Summary

SHT7x (including SHT71 and SHT75) is Sensirion's family of relative humidity and temperature sensors with pins. The sensors integrate sensor elements plus signal processing in compact format and provide a fully calibrated digital output. A unique capacitive sensor element is used for measuring relative humidity while temperature is measured by a band-gap sensor. The applied CMOSens® technology guarantees excellent reliability and long term stability. Both sensors are seamlessly coupled to a 14bit analog to digital converter and a serial interface circuit. This results in superior signal quality, a fast response time and insensitivity to external disturbances (EMC).

Each SHT7x is individually calibrated in a precision humidity chamber. The calibration coefficients are programmed into an OTP memory on the chip. These coefficients are used to internally calibrate the signals from the sensors. The 2-wire serial interface and internal voltage regulation allows for easy and fast system integration. The small size and low power consumption makes SHT7x the ultimate choice for even the most demanding applications.

SHT7x is supplied on FR4 with pins which allows for easy integration or replacement. The same sensor is also available as surface mountable packaging (SHT1x) or on flex print (SHTA1).

## Dimensions



## Sensor Chip

SHT7x V4 – for which this datasheet applies – features a version 4 Silicon sensor chip. Besides a humidity and a temperature sensor the chip contains an amplifier, A/D converter, OTP memory and a digital interface. V4 sensors can be identified by the alpha-numeric traceability code on the sensor cap – see example “B2G” code on Figure 1.

## Material Contents

While the sensor is made of a CMOS chip the sensor housing consists of an LCP cap with epoxy glob top on an FR4 substrate. Pins are made of a Cu/Be alloy coated with Ni and Au. The device is fully RoHS and WEEE compliant, thus it is free of Pb, Cd, Hg, Cr(6+), PBB and PBDE.

## Evaluation Kits

For sensor trial measurements, for qualification of the sensor or even experimental application (data logging) of

**Figure 1:** Drawing of SHT7x (applies to SHT71 and SHT75) sensor packaging, dimensions in mm (1mm = 0.039inch). Contact assignment: 1: SCK, 2: VDD, 3: GND, 4: DATA. Hatched item on backside of PCB is a 100nF capacitor – see Section 2.1 for more information.

the sensor there is an evaluation kit *EK-H4* available including SHT71 (same sensor chip as SHT1x) and 4 sensor channels, hard and software to interface with a computer. For other evaluation kits please check [www.sensirion.com/humidity](http://www.sensirion.com/humidity).

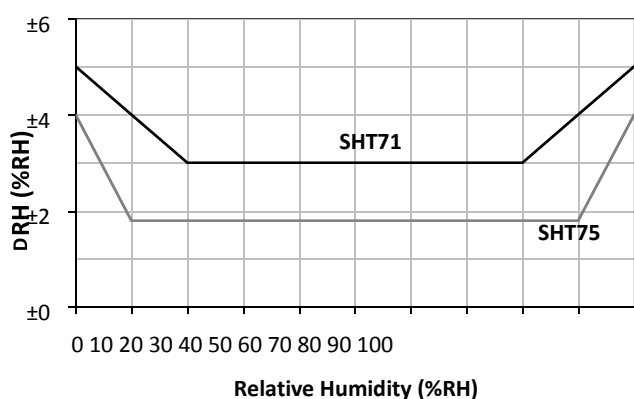
## Sensor Performance

### Relative Humidity

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution <sup>1</sup>		0.4	0.05	0.05	%RH

<sup>1</sup> The default measurement resolution of is 14bit for temperature and 12bit for humidity. It can be reduced to 12/8bit by command to status register.

		8	12	12	bit
Accuracy <sup>2</sup> SHT71	typ		±3.0		%RH
	max	see Figure 2			
Accuracy <sup>2</sup> SHT75	typ		±1.8		%RH
	max	see Figure 2			
Repeatability			±0.1		%RH
Hysteresis			±1		%RH
Nonlinearity	raw data		±3		%RH
	linearized		<<1		%RH
Response time <sup>3</sup>	tau 63%		8		s
Operating Range		0		100	%RH
Long term drift <sup>4</sup>	normal		< 0.5		%RH/yr



**Figure 2:** Maximal RH-tolerance at 25°C per sensor type.

<sup>2</sup> Accuracies are tested at Outgoing Quality Control at 25°C (77°F) and 3.3V. Values exclude hysteresis and are only applicable to non-condensing environments.

<sup>3</sup> Time for reaching 63% of a step function, valid at 25°C and 1 m/s airflow.

## Electrical and General Items

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Source Voltage		2.4	3.3	5.5	V
Power Consumption <sup>56</sup>	sleep		2	5	μW
	measuring		3		mW
	average		90		μW
Communication	digital 2-wire interface, see Communication				
Storage	10 – 50°C (0 – 80°C peak), 20 – 60%RH				

## Temperature

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution <sup>1</sup>		0.04	0.01	0.01	°C
		12	14	14	bit
Accuracy <sup>2</sup> SHT71	typ		±0.4		°C
	max	see Figure 3			
Accuracy <sup>2</sup> SHT75	typ		±0.3		°C
	max	see Figure 3			
Repeatability			±0.1		°C
Operating Range		-40		123.8	°C
		-40		254.9	°F
Response Time <sup>6</sup>	tau 63%	5		30	s
Long term drift			< 0.04		°C/yr

<sup>4</sup> Value may be higher in environments with high contents of volatile organic compounds. See Section 1.3 of Users Guide.

<sup>5</sup> Values for VDD=3.3V at 25°C, average value at one 12bit measurement per second.

<sup>6</sup> Response time depends on heat capacity of and thermal resistance to sensor substrate.

Temperature (°C)

**Figure 3:** Maximal T-tolerance per sensor type.

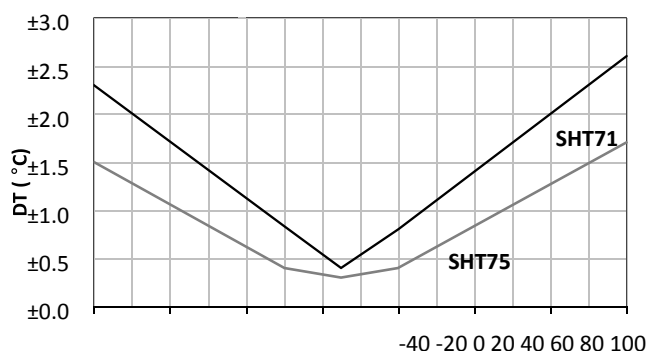


## Users Guide SHT7x

### 1 Application Information

#### 1.1 Operating Conditions

Sensor works stable within recommended normal range – see Figure 4. Long term exposures to conditions outside normal range, especially at humidity >80%RH, may temporarily offset the RH signal (+3 %RH after 60h). After return to normal range it will slowly return towards calibration state by itself. See Section 1.4 “Reconditioning Procedure” to accelerate eliminating the offset. Prolonged exposure to extreme conditions may accelerate ageing.



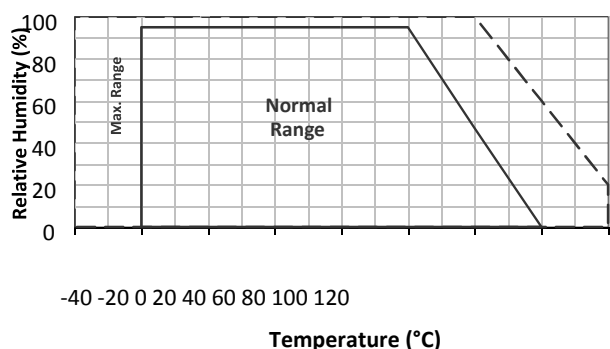
For these reasons it is recommended to store the sensors in original packaging including the sealed ESD bag at following conditions: Temperature shall be in the range of 10°C – 50°C (0 – 80°C for limited time) and humidity at 20 – 60%RH (sensors that are not stored in ESD bags). For sensors that have been removed from the original packaging we recommend to store them in ESD bags made of metal-in PE-HD<sup>8</sup>.

In manufacturing and transport the sensors shall be prevented of high concentration of chemical solvents and

#### Packaging Information

Sensor Type	Packaging	Quantity	Order Number
SHT71	Tape Stripes	50	1-100092-04
SHT75	Tape Stripes	50	1-100071-04

This datasheet is subject to change and may be amended without prior notice.



**Figure 4:** Operating Conditions

## 1.2 Sockets and Soldering

For maintain high accuracy specifications the sensor shall not be soldered. Sockets may be used such as “Preci-dip / Mill-Max R851-83-004-20-001” or similar.

Standard wave soldering ovens may be used at maximum 235°C for 20 seconds. For manual soldering contact time must be limited to 5 seconds at up to 350°C<sup>7</sup>.

After wave soldering the devices should be stored at >75%RH for at least 12h to allow the polymer to rehydrate. Alternatively the re-hydration process may be performed at ambient conditions (>40%RH) during more than 5 days.

In no case, neither after manual nor wave soldering, a board wash shall be applied. In case of application with exposure of the sensor to corrosive gases the soldering pads of pins and PCB shall be sealed to prevent loose contacts or short cuts.

## 1.3 Storage Conditions and Handling Instructions

It is of great importance to understand that a humidity sensor is not a normal electronic component and needs to be handled with care. Chemical vapors at high concentration in combination with long exposure times may offset the sensor reading.

long exposure times. Out-gassing of glues, adhesive tapes and stickers or out-gassing packaging material such as bubble foils, foams, etc. shall be avoided. Manufacturing area shall be well ventilated.

For more detailed information please consult the document “*Handling Instructions*” or contact Sensirion.

## 1.4 Reconditioning Procedure

As stated above extreme conditions or exposure to solvent vapors may offset the sensor. The following reconditioning procedure may bring the sensor back to calibration state:

Baking: 100 – 105°C at < 5%RH for 10h  
 Re-Hydration: 20 – 30°C at ~ 75%RH for 12h<sup>9</sup>.

## 1.5 Temperature Effects

Relative humidity reading strongly depends on temperature. Therefore, it is essential to keep humidity sensors at the same temperature as the air of which the relative humidity is to be measured. In case of testing or qualification the reference sensor and test sensor must show equal temperature to allow for comparing humidity readings.

The packaging of SHT7x is designed for minimal heat transfer from the pins to the sensor. Still, if the SHT7x shares a PCB with electronic components that produce heat it should be mounted in a way that prevents heat transfer or keeps it as low as possible.

Furthermore, there are self-heating effects in case the measurement frequency is too high. Please refer to Section 3.3 for detailed information.



## 1.6 Light

The SHT7x is not light sensitive. Prolonged direct exposure to sunshine or strong UV radiation may age the housing.

## 1.7 Materials Used for Sealing / Mounting

Many materials absorb humidity and will act as a buffer increasing response times and hysteresis. Materials in the vicinity of the sensor must therefore be carefully chosen. Recommended materials are: Any metals, LCP, POM (Delrin), PTFE (Teflon), PE, PEEK, PP, PB, PPS, PSU, PVDF, PVF.

For sealing and gluing (use sparingly): Use high filled epoxy for electronic packaging (e.g. glob top, underfill), and Silicone. Out-gassing of these materials may also contaminate the SHT7x (see Section 1.3). Therefore try to add the sensor as a last manufacturing step to the assembly, store the assembly well ventilated after manufacturing or bake at 50°C for 24h to outgas contaminants before packing.

## 1.8 Wiring Considerations and Signal Integrity

SHT7x are often applied using wires. Carrying the SCK and DATA signal parallel and in close proximity more than 10cm may result in cross talk and loss of communication. This may be resolved by routing VDD and/or GND between the two data signals and/or using shielded cables. Furthermore, slowing down SCK frequency will possibly improve signal integrity.

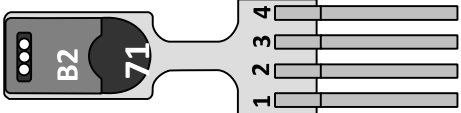
Please see the Application Note “ESD, Latch-up and EMC” for more information.

## 1.9 ESD (Electrostatic Discharge)

ESD immunity is qualified according to MIL STD 883E, method 3015 (Human Body Model at  $\pm 2$  kV). Latch-up immunity is provided at a force current of  $\pm 100$ mA with  $T_{amb} = 80^\circ\text{C}$  according to JEDEC78A. See Application Note “ESD, Latch-up and EMC” for more information.

## 2 Interface Specifications

Pin	Name	Comment
1	SCK	Serial Clock, input only
2	VDD	Source Voltage
3	GND	Ground
4	DATA	Serial Data, bidirectional

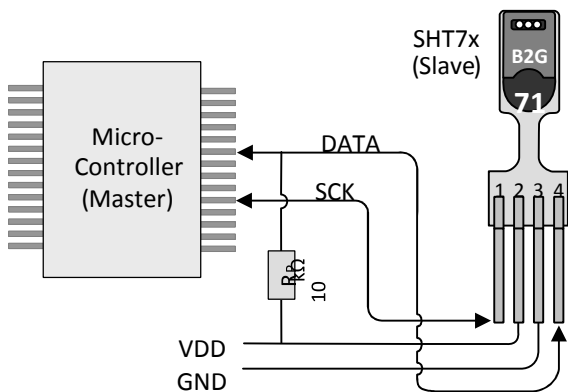


**Table 1:** SHT7x pin assignment.

### 2.1 Power Pins (VDD, GND)

The supply voltage of SHT7x must be in the range of 2.4 and 5.5V, recommended supply voltage is 3.3V. Decoupling of VDD and GND by a 100nF capacitor is integrated on the backside of the sensor packaging.

The serial interface of the SHT7x is optimized for sensor readout and effective power consumption. The sensor cannot be addressed by I<sup>2</sup>C protocol, however, the sensor can be connected to an I<sup>2</sup>C bus without interference with other devices connected to the bus. Microcontroller must switch between protocols.



**Figure 5:** Typical application circuit, including pull up resistor  $R_p$ .

## 2.2 Serial clock input (SCK)

SCK is used to synchronize the communication between microcontroller and SHT7x. Since the interface consists of fully static logic there is no minimum SCK frequency.

## 2.3 Serial data (DATA)

The DATA tri-state pin is used to transfer data in and out of the sensor. For sending a command to the sensor, DATA is valid on the rising edge of the serial clock (SCK) and must remain stable while SCK is high. After the falling edge of SCK the DATA value may be changed. For safe communication DATA valid shall be extended  $T_{SU}$  and  $T_{HO}$  before the rising and after the falling edge of SCK, respectively – see Figure 6. For reading data from the sensor, DATA is valid  $T_V$  after SCK has gone low and remains valid until the next falling edge of SCK.

To avoid signal contention the microcontroller must only drive DATA low. An external pull-up resistor (e.g. 10 k $\Omega$ ) is required to pull the signal high – it should be noted that pull-up resistors may be included in I/O circuits of microcontrollers. See Table 2 for detailed I/O characteristic of the sensor.

## 2.4 Electrical Characteristics

The electrical characteristics such as power consumption, low and high level, input and output voltages depend on the supply voltage. Table 2 gives electrical characteristics of SHT7x with the assumption of 5V supply voltage if not stated otherwise. For proper communication with the sensor it is essential to make sure that signal design is strictly within the limits given in Table 3 and Figure 6. Absolute maximum ratings for VDD versus GND are +7V and -0.3V. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect the sensor reliability (e.g. hot carrier degradation, oxide breakdown).

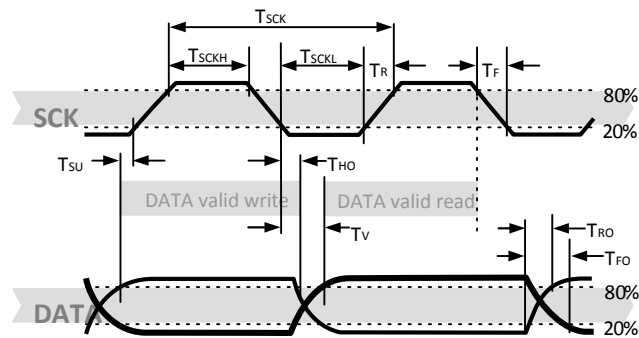
Parameter	Conditions	min	typ	max	Units
Power supply DC <sup>7</sup>		2.4	3.3	5.5	V
Supply current	measuring		0.55	1	mA
	average <sup>8</sup>	2	28		$\mu$ A
	sleep		0.3	1.5	$\mu$ A
Low level output voltage	$I_{OL} < 4$ mA	0		250	mV
High level output voltage	$R_p < 25$ k $\Omega$	90%		100%	VDD
Low level input voltage	Negative going	0%		20%	VDD

<sup>7</sup> Recommended voltage supply for highest accuracy is 3.3V, due to sensor calibration.

<sup>8</sup> Minimum value with one measurement of 8 bit resolution without OTP reload per second, typical value with one measurement of 12bit resolution per second.

High level input voltage	Positive going	80%		100%	VDD
Input current on pads				1	μA
Output current	on			4	mA
	Tri-stated (off)		10	20	μA

**Table 2:** SHT7x DC characteristics.  $R_p$  stands for pull up resistor, while  $I_{OL}$  is low level output current.



**Figure 6:** Timing Diagram, abbreviations are explained in Table 3. Bold DATA line is controlled by the sensor, plain DATA line is controlled by the micro-controller. Note that DATA valid read time is triggered by falling edge of anterior toggle.

	Parameter	Conditions	min	typ	max	Units
$F_{SCK}$	SCK Frequency	$VDD > 4.5V$	0	0.1	5	MHz
		$VDD < 4.5V$	0	0.1	1	MHz
$T_{SCKx}$	SCK hi/low time		100			ns
$T_R/T_F$	SCK rise/fall time		1	200	*	ns
$T_{FO}$	DATA fall time	$OL = 5pF$	3.5	10	20	ns
		$OL = 100pF$	30	40	200	ns
$T_{RO}$	DATA rise time		**	**	**	ns
$T_V$	DATA valid time		200	250	***	ns
$T_{SU}$	DATA setup time		100	150	***	ns

$T_{HO}$	DATA hold time		10	15	****	ns
----------	----------------	--	----	----	------	----

\*  $T_{R,max} + T_{F,max} = (F_{SCK})^{-1} - T_{SCKH} - T_{SCKL}$

\*\*  $T_{RO}$  is determined by the  $R_p \cdot C_{bus}$  time-constant at DATA line

\*\*\*  $T_{V,max}$  and  $T_{SU,max}$  depend on external pull-up resistor ( $R_p$ ) and total bus line capacitance ( $C_{bus}$ ) at DATA line

\*\*\*\*  $T_{HO,max} < T_V - \max(T_{RO}, T_{FO})$

**Table 3:** SHT7x I/O signal characteristics, OL stands for Output Load, entities are displayed in Figure 6.

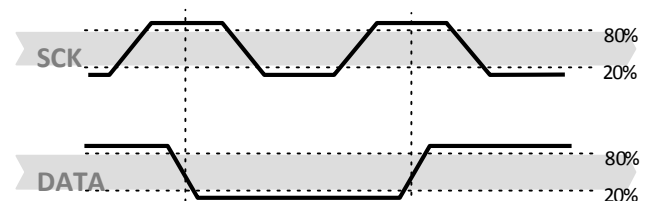
## 3 Communication with Sensor

### 3.1 Start up Sensor

As a first step the sensor is powered up to chosen supply voltage VDD. The slew rate during power up shall not fall below 1V/ms. After power-up the sensor needs 11ms to get to Sleep State. No commands must be sent before that time.

### 3.2 Sending a Command

To initiate a transmission, a Transmission Start sequence has to be issued. It consists of a lowering of the DATA line while SCK is high, followed by a low pulse on SCK and raising DATA again while SCK is still high – see Figure 7.



**Figure 7:** "Transmission Start" sequence

The subsequent command consists of three address bits (only '000' is supported) and five command bits. The SHT7x indicates the proper reception of a command by pulling the DATA pin low (ACK bit) after the falling edge of the 8th SCK clock. The DATA line is released (and goes high) after the falling edge of the 9th SCK clock.

Command	Code
Reserved	0000x
<b>Measure Temperature</b>	<b>00011</b>
<b>Measure Relative Humidity</b>	<b>00101</b>
Read Status Register	00111
Write Status Register	00110
Reserved	0101x-1110x
<b>Soft reset</b> , resets the interface, clears the status register to default values. Wait minimum 11 ms before next command	<b>11110</b>

**Table 4:** SHT7x list of commands

### 3.3 Measurement of RH and T

After issuing a measurement command ('00000101' for relative humidity, '00000011' for temperature) the controller has to wait for the measurement to complete. This takes a maximum of 20/80/320 ms for a 8/12/14bit measurement. The time varies with the speed of the internal oscillator and can be lower by up to 30%. To signal the completion of a measurement, the SHT7x pulls data line low and enters Idle Mode. The controller must wait for this Data Ready signal before restarting SCK to readout the data. Measurement data is stored until readout, therefore the controller can continue with other tasks and readout at its convenience.

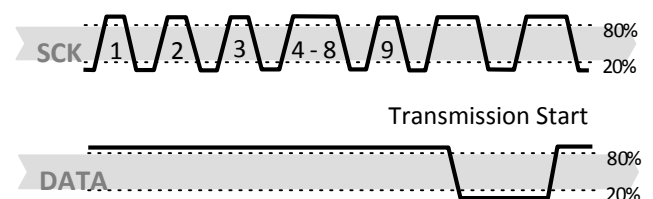
Two bytes of measurement data and one byte of CRC checksum (optional) will then be transmitted. The micro controller must acknowledge each byte by pulling the DATA line low. All values are MSB first, right justified (e.g. the 5<sup>th</sup> SCK is MSB for a 12bit value, for a 8bit result the first byte is not used).

Communication terminates after the acknowledge bit of the CRC data. If CRC-8 checksum is not used the controller may terminate the communication after the measurement data LSB by keeping ACK high. The device automatically returns to Sleep Mode after measurement and communication are completed.

Important: To keep self heating below 0.1°C, SHT7x should not be active for more than 10% of the time – e.g. maximum one measurement per second at 12bit accuracy shall be made.

### 3.4 Connection reset sequence

If communication with the device is lost the following signal sequence will reset the serial interface: While leaving DATA high, toggle SCK nine or more times – see Figure 8. This must be followed by a Transmission Start sequence preceding the next command. This sequence resets the interface only. The status register preserves its content.



**Figure 8:** Connection Reset Sequence

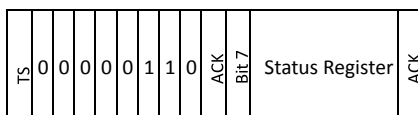
### 3.5 CRC-8 Checksum calculation

The whole digital transmission is secured by an 8bit checksum. It ensures that any wrong data can be detected and eliminated. As described above this is an additional feature of which may be used or abandoned. Please consult Application Note “CRC Checksum” for information on how to calculate the CRC.

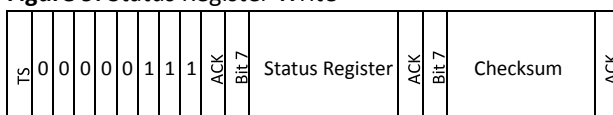
### 3.6 Status Register

Some of the advanced functions of the SHT7x such as selecting measurement resolution, end-of-battery notice, use of OTP reload or using the heater may be activated by sending a command to the status register. The following section gives a brief overview of these features.

After the command Status Register Read or Status Register Write – see Table 4 – the content of 8 bits of the status register may be read out or written. For the communication compare Figure 9 and Figure 10 – the assignation of the bits is displayed in Table 5.

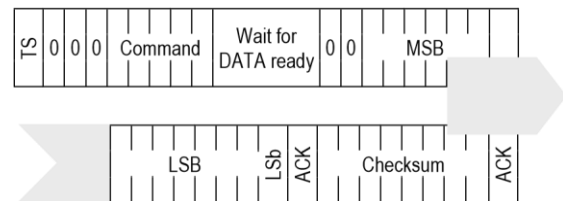


**Figure 9:** Status Register Write

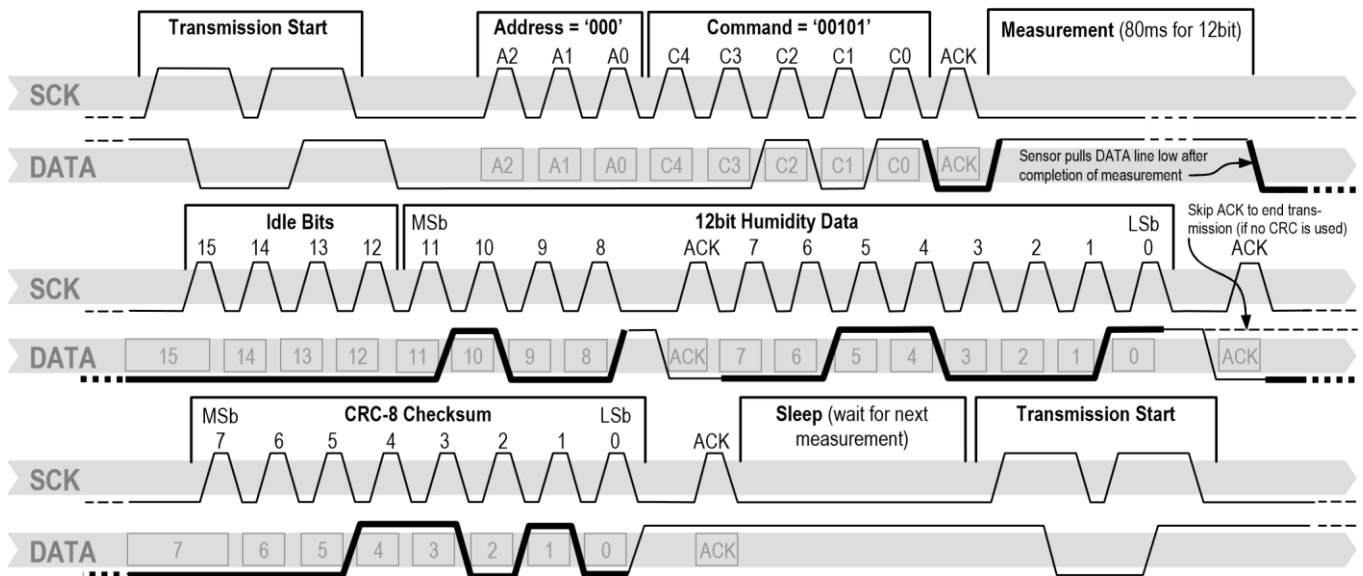


**Figure 10:** Status Register Read

Examples of full communication cycle are displayed in Figure 11 and Figure 12.



**Figure 11:** Overview of Measurement Sequence. TS = Transmission Start, MSB = Most Significant Byte, LSB = Last Significant Byte, Lsb = Last Significant Bit.



**Figure 12:** Example RH measurement sequence for value “0000’0100’0011’0001” = 1073 = 35.50%RH (without temperature compensation). DATA valid times are given and referenced in boxes on DATA line. Bold DATA lines are controlled by sensor while plain lines are controlled by the micro-controller.

Bit	Type	Description	Default
7		reserved	0
6	R	End of Battery (low voltage detection) '0' for VDD > 2.47 '1' for VDD < 2.47	X No default value, bit is only updated after a measurement
5		reserved	0
4		reserved	0
3		For Testing only, do not use	0
2	R/W	Heater	0 off
1	R/W	no reload from OTP	0 reload
0	R/W	'1' = 8bit RH / 12bit Temp. resolution '0' = 12bit RH / 14bit Temp. resolution	0 12bit RH 14bit Temp.

**Table 5:** Status Register Bits

**Measurement resolution:** The default measurement resolution of 14bit (temperature) and 12bit (humidity) can be reduced to 12 and 8bit. This is especially useful in high speed or extreme low power applications.

**End of Battery** function detects and notifies VDD voltages below 2.47 V. Accuracy is ±0.05 V.

**Heater:** An on chip heating element can be addressed by writing a command into status register. The heater may increase the temperature of the sensor by 5 – 10°C<sup>9</sup> beyond ambient temperature. The heater draws roughly 8mA @ 5V supply voltage.

<sup>9</sup> Corresponds to 9 – 18°F

For example the heater can be helpful for functionality analysis: Humidity and temperature readings before and after applying the heater are compared. Temperature shall increase while relative humidity decreases at the same time. Dew point shall remain the same.

Please note: The temperature reading will display the temperature of the heated sensor element and not ambient temperature. Furthermore, the sensor is not qualified for continuous application of the heater.

OTP reload: With this operation the calibration data is uploaded to the register before each measurement. This may be deactivated for reducing measurement time by about 10ms.

## 4 Conversion of Signal Output

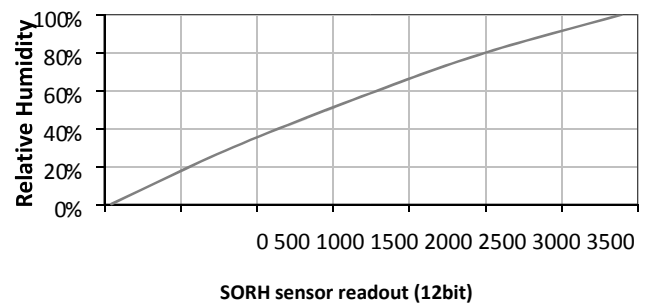
### 4.1 Relative Humidity

For compensating non-linearity of the humidity sensor – see Figure 13 – and for obtaining the full accuracy of the sensor it is recommended to convert the humidity readout ( $SO_{RH}$ ) with the following formula with coefficients given in Table 6:

$$RH_{linear} = C_1 + C_2 \cdot SO_{RH} + C_3 \cdot SO_{RH}^2 \text{ (%RH)}$$

$SO_{RH}$	$C_1$	$C_2$	$C_3$
12 bit	-2.0468	0.0367	-1.5955E-6
8 bit	-2.0468	0.5872	-4.0845E-4

**Table 6:** Humidity conversion coefficients  
Values higher than 99%RH indicate fully saturated air and must be processed and displayed as 100%RH<sup>10</sup>. Please note that the humidity sensor has no significant voltage dependency.



**Figure 13:** Conversion from  $SO_{RH}$  to relative humidity

### 4.2 Temperature compensation of Humidity Signal

For temperatures significantly different from 25°C (~77°F) the humidity signal requires temperature compensation. The temperature correction corresponds roughly to 0.12%RH/°C @ 50%RH. Coefficients for the temperature compensation are given in Table 8.

$$RH_{true} = (T^{\circ}C - 25) \cdot (t_1 + t_2 \cdot SO_{RH}) + RH_{linear}$$

$SO_{RH}$	$t_1$	$t_2$
12 bit	0.01	0.00008
8 bit	0.01	0.00128

**Table 7:** Temperature compensation coefficients

<sup>10</sup> If wetted excessively (strong condensation of water on sensor surface), sensor output signal can drop below 100%RH (even below 0%RH in some cases), but the sensor

will recover completely when water droplets evaporate. The sensor is not damaged by water immersion or condensation.

## 4.3 Temperature

The band-gap PTAT (Proportional To Absolute Temperature) temperature sensor is very linear by design. Use the following formula to convert digital readout (SO<sub>T</sub>) to temperature value, with coefficients given in Table 9:

$$T = d_1 + d_2 \cdot SO_T$$

VDD	d <sub>1</sub> (°C)	SO <sub>T</sub>	d <sub>2</sub> (°C)	d <sub>2</sub> (°F)
5V	-40.1	14bit	0.01	0.018
		12bit	0.04	0.072
4V	-39.8	-39.6		
3.5V	-39.7	-39.5		
3V	-39.6	-39.3		
2.5V	-39.4	-38.9		

**Table 8:** Temperature conversion coefficients.

## 4.4 Dew Point

SHT7x is not measuring dew point directly, however dew point can be derived from humidity and temperature readings. Since humidity and temperature are both measured on the same monolithic chip, the SHT7x allows superb dew point measurements.

For dew point (T<sub>d</sub>) calculations there are various formulas to be applied, most of them quite complicated. For the temperature range of -40 – 50°C the following approximation provides good accuracy with parameters given in Table 10:

$$T_d = \frac{m \cdot \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + T}{m}$$

$$T_d = \frac{m \cdot \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + T}{m}$$

Temperature Range	T <sub>n</sub> (°C)	m
Above water, 0 – 50°C	243.12	17.62
Above ice, -40 – 0°C	272.62	22.46

**Table 9:** Parameters for dew point (T<sub>d</sub>) calculation.

Please note that “ln(...)” denotes the natural logarithm. For RH and T the linearized and compensated values for relative humidity and temperature shall be applied.

For more information on dew point calculation see Application Note “Introduction to Humidity”.

## 5 Environmental Stability

If sensors are qualified for assemblies or devices, please make sure that they experience same conditions as the reference sensor. It should be taken into account that response times in assemblies may be longer, hence enough dwell time for the measurement shall be granted. For detailed information please consult Application Note “Testing Guide”.

SHT7x have been tested according to the test conditions given in Table 11. Sensor performance under other test conditions cannot be guaranteed and is not part of the sensor specifications. Especially, no guarantee can be given for sensor



performance in the field or for customer’s specific application.

Please contact Sensirion for detailed information.

Environment	Standard	Results <sup>11</sup>
HTOL	125°C, 1000 h	Within specifications
TC	-40°C - 125°C, 500 cycles Acc. JESD22-A104-C	Within specifications
THU	85°C / 85%RH, 1000h	Within specifications
ESD immunity	MIL STD 883E, method 3015 (Human Body Model at ±2kV)	Qualified
Latch-up	force current of ±100mA with T <sub>amb</sub> = 80°C, acc. JEDEC 17	Qualified

**Table 10:** Qualification tests: HTSL = High Temperature Storage Lifetime, TC = Temperature Cycles, UHST = Unbiased Highly accelerated temperature and humidity Test, THU = Temperature humidity unbiased

## 6 Packaging

### 6.1 Packaging type

The device is supplied in a single-in-line pin type package. The sensor housing consists of a Liquid Crystal Polymer (LCP) cap with epoxy glob top on a standard 0.6 mm FR4 substrate. The sensor head is connected to the pins, by a small bridge to minimize heat conduction and response times. The pins are made of Cu/Be alloy coated with 1.3µm Ni and 0.5µm Au, which are soldered to the FR4 substrate

by lead-free solder paste. The gold plated back side of the sensor head is connected to the GND pin. A 100nF capacitor is mounted on the back side between VDD and GND. The device is fully RoHS and WEEE compliant – thus it is free of of Pb, Cd, Hg, Cr(6+), PBB and PBDE.

Size including pins is 19.5 x 5.08 x 3.1mm. Total weight: 168 mg, weight of sensor head: 73 mg.

All pins are Au plated to avoid corrosion. They can be soldered or mate with most 1.27 mm (0.05”) sockets, for example: Preci-dip / Mill-Max R851-83-004-20-001 or similar.

### 6.2 Traceability Information

All SHT7x are marked with an alphanumeric, three digit code on the chip cap – see “B2G” on Figure 1. The lot numbers allow full traceability through production, calibration and testing. No information can be derived from the code directly, respective data is stored at Sensirion.

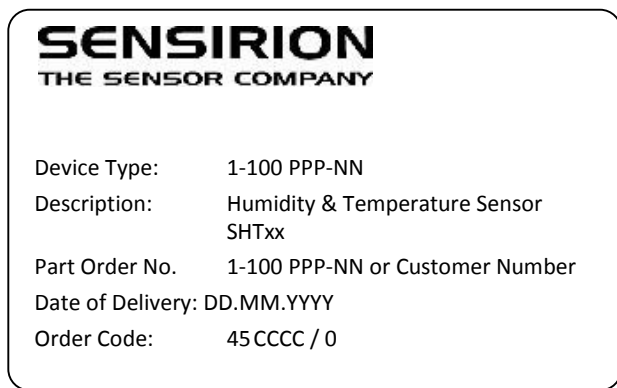
Labels on the reels are displayed in Figure 14 and Figure 15, they both give traceability information.



**Figure 14:** First label on reel: XX = Sensor Type (71 for SHT71), NN = Chip Version (04 for V4), Y = last digit of

<sup>11</sup> According to accuracy and long term drift specification given on Page 2.

year, RRR = number of sensors on reel divided by 10 (200 for 2000 units), TTTT = Traceability Code.



**Figure 15:** Second label on reel: For Device Type and Part Order Number please refer to Table 12, Delivery Date (also Date Code) is date of packaging of sensors (DD = day, MM = month, YYYY = year), CCCC = number of order.

### 6.3 Shipping Package

SHT7x are shipped in 32mm tape at 50pcs each – for details see Figure 16 and Table 12. Reels are individually labeled with barcode and human readable labels, see section 6.2.

Sensor Type	Packaging	Quantity	Order Number
SHT71	Tape Stripes	50	1-100092-04
SHT75	Tape Stripes	50	1-100071-04

**Table 11:** Packaging types per sensor type.

Dimensions of packaging tape are given in Figure 16. All tapes have a 7 pockets empty leader tape (first pockets of the tape) and a 7 pockets empty trailer tape (last pockets of the tape).

## Annex D: L'IGBT

International  
**IR** Rectifier

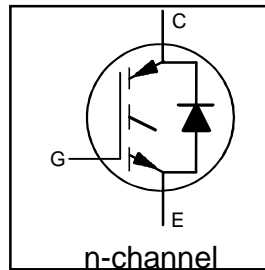
PD- 91788

# IRG4PF50WD

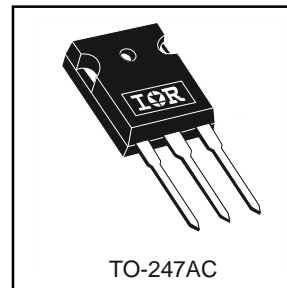
INSULATED GATE BIPOLAR  
TRANSISTOR WITH ULTRAFAST SOFT RECOVERY  
DIODE

### Features

- Optimized for use in Welding and Switch-Mode Power Supply applications
  - Industry benchmark switching losses improve efficiency of all power supply topologies
  - 50% reduction of Eoff parameter
  - Low IGBT conduction losses
  - Latest technology IGBT design offers tighter parameter distribution coupled with exceptional reliability
  - IGBT co-packaged with HEXFRED™ ultrafast, ultra-soft-recovery anti-parallel diodes for use in bridge configurations
  - Industry standard TO-247AC package
- ### Benefits
- Lower switching losses allow more cost-effective operation and hence efficient replacement of larger-die MOSFETs up to 100kHz
  - HEXFRED™ diodes optimized for performance with IGBTs. Minimized recovery characteristics reduce noise, EMI and switching losses



$V_{CES} = 900V$
$V_{CE(on)} \text{ typ.} = 2.25V$
@ $V_{GE} = 15V, I_C = 28A$



### Thermal Resistance

### Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$V_{CES}$	Collector-to-Emitter Breakdown Voltage	900	V
$I_C @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Collector Current	51	A

# Annexes

$I_C @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Collector Current	28	
$I_{CM}$	Pulsed Collector Current $\square$	204	
$I_{LM}$	Clamped Inductive Load Current ,	204	
$I_F @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Diode Continuous Forward Current	16	
$I_{FM}$	Diode Maximum Forward Current	204	
$V_{GE}$	Gate-to-Emitter Voltage	$\pm 20$	V
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Maximum Power Dissipation	200	W
$P_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Maximum Power Dissipation	78	
$T_J$ $T_{STG}$	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 150	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (0.063 in. (1.6mm) from case )	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw.	10 lbf•in (1.1N•m)	

## Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case – IGBT	—	—	0.64	°C/W	
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case – Diode	—	—	0.83		
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, flat, greased surface	—	0.24	—		
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient, typical socket mount	—	—	40		
$W_t$	Weight	—	6 (0.21)	—	g (oz)	
	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)CES}$	Collector-to-Emitter Breakdown Voltage	900	—	—	V	$V_{GE} = 0V, I_C = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)CES}/\Delta T_J$	Temperature Coeff. of Breakdown Voltage	—	0.295	—	V/°C	$V_{GE} = 0V, I_C = 3.5mA$

# Annexes

V <sub>CE(on)</sub>	Collector-to-Emitter Saturation Voltage	—	2.25	2.7	V	I <sub>C</sub> = 28A	V <sub>GE</sub> = 15V
		—	2.74	—		I <sub>C</sub> = 60A	See Fig. 2, 5
		—	2.12	—		I <sub>C</sub> = 28A, T <sub>J</sub> = 150°C	
V <sub>GE(th)</sub>	Gate Threshold Voltage	3.0	—	6.0		V <sub>CE</sub> = V <sub>GE</sub> , I <sub>C</sub> = 250μA	
ΔV <sub>GE(th)</sub> /ΔT <sub>J</sub>	Temperature Coeff. of Threshold Voltage	—	-13	—	mV/°C	V <sub>CE</sub> = V <sub>GE</sub> , I <sub>C</sub> = 250μA	
g <sub>fe</sub>	Forward Transconductance $\square$	26	39	—	S	V <sub>CE</sub> = 50V, I <sub>C</sub> = 28A	
I <sub>CES</sub>	Zero Gate Voltage Collector Current	—	—	500	μA	V <sub>GE</sub> = 0V, V <sub>CE</sub> = 900V	
		—	—	2.0		V <sub>GE</sub> = 0V, V <sub>CE</sub> = 10V, T <sub>J</sub> = 25°C	
		—	—	6.5	mA	V <sub>GE</sub> = 0V, V <sub>CE</sub> = 900V, T <sub>J</sub> = 150°C	
V <sub>FM</sub>	Diode Forward Voltage Drop	—	2.5	3.5	V	I <sub>C</sub> = 16A	See Fig. 13
		—	2.1	3.0		I <sub>C</sub> = 16A, T <sub>J</sub> = 150°C	
I <sub>GES</sub>	Gate-to-Emitter Leakage Current	—	—	±100	nA	V <sub>GE</sub> = ±20V	

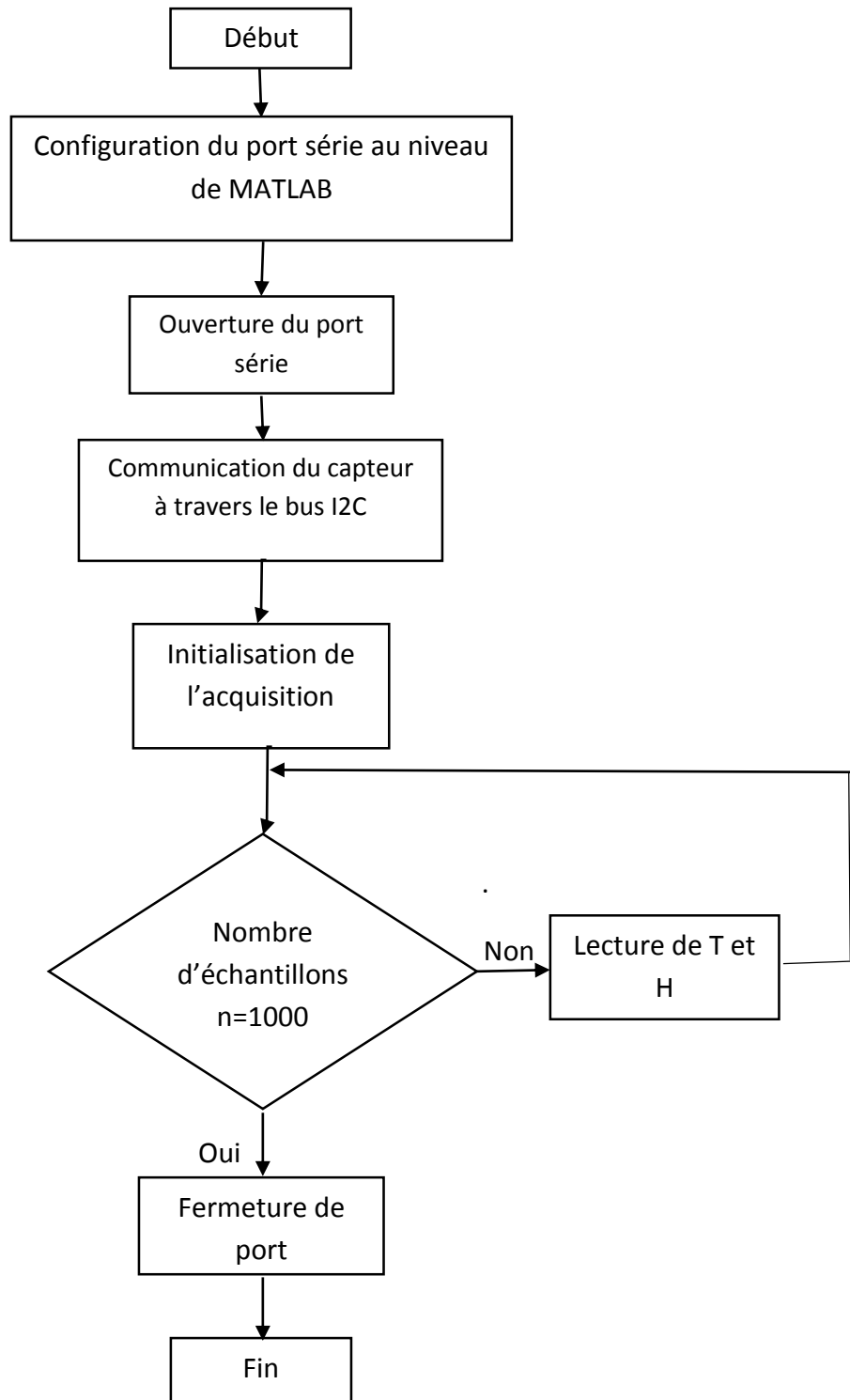
## Switching Characteristics @ T<sub>J</sub> = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
Q <sub>g</sub>	Total Gate Charge (turn-on)	—	160	240	nC	I <sub>C</sub> = 28A V <sub>CC</sub> = 400V V <sub>GE</sub> = 15V See Fig. 8
Q <sub>ge</sub>	Gate - Emitter Charge (turn-on)	—	19	29		
Q <sub>gc</sub>	Gate - Collector Charge (turn-on)	—	53	80		
t <sub>d(on)</sub>	Turn-On Delay Time	—	71	—	ns	T <sub>J</sub> = 25°C I <sub>C</sub> = 28A, V <sub>CC</sub> = 720V V <sub>GE</sub> = 15V, R <sub>G</sub> = 5.0Ω Energy losses include "tail" and diode reverse recovery. See Fig. 9, 10, 18
t <sub>r</sub>	Rise Time	—	50	—		
t <sub>d(off)</sub>	Turn-Off Delay Time	—	150	220		
t <sub>f</sub>	Fall Time	—	110	170		
E <sub>on</sub>	Turn-On Switching Loss	—	2.63	—		

# Annexes

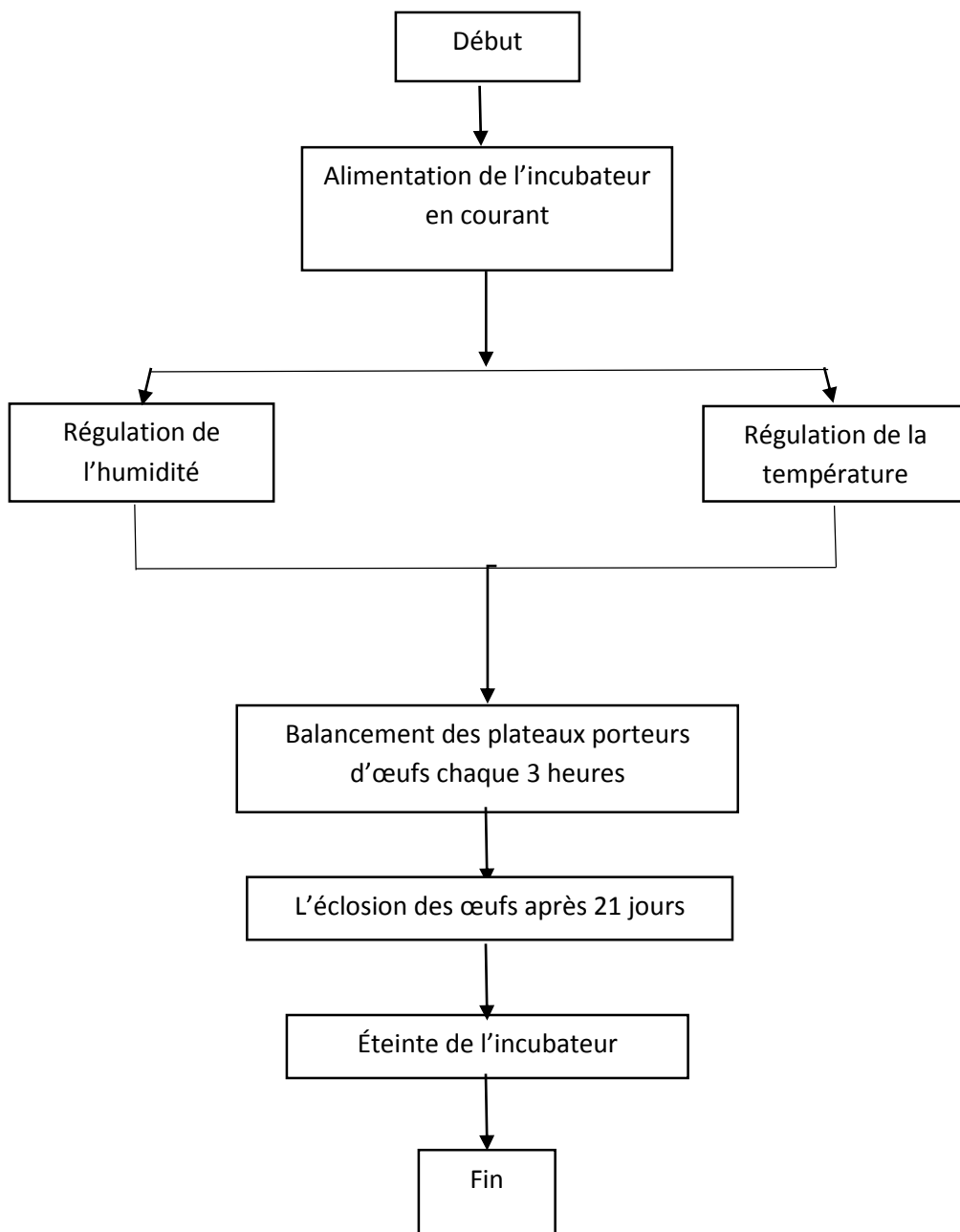
E <sub>off</sub>	Turn-Off Switching Loss	—	1.34	—			
E <sub>ts</sub>	Total Switching Loss	—	3.97	5.3			
t <sub>d(on)</sub>	Turn-On Delay Time	—	69	—	ns	T <sub>J</sub> = 150°C, See Fig. 11, 18 I <sub>C</sub> = 28A, V <sub>CC</sub> = 720V V <sub>GE</sub> = 15V, R <sub>G</sub> = 5.0Ω Energy losses include "tail" and diode reverse recovery.	
t <sub>r</sub>	Rise Time	—	52	—			
t <sub>d(off)</sub>	Turn-Off Delay Time	—	270	—			
t <sub>f</sub>	Fall Time	—	190	—			
E <sub>ts</sub>	Total Switching Loss	—	6.0	—	mJ		
L <sub>E</sub>	Internal Emitter Inductance	—	13	—	nH	Measured 5mm from package	
C <sub>ies</sub>	Input Capacitance	—	3300	—		V <sub>GE</sub> = 0V V <sub>CC</sub> = 30V f = 1.0MHz See Fig. 7	
C <sub>oes</sub>	Output Capacitance	—	200	—	pF		
C <sub>res</sub>	Reverse Transfer Capacitance	—	45	—			
t <sub>rr</sub>	Diode Reverse Recovery Time	—	90	135	ns	T <sub>J</sub> = 25°C See Fig. 14	I <sub>F</sub> = 16A V <sub>R</sub> = 200V
		—	164	245		T <sub>J</sub> = 125°C	
I <sub>rr</sub>	Diode Peak Reverse Recovery Current	—	5.8	10	A	T <sub>J</sub> = 25°C See Fig. 15	di/dt = 200A/μs
		—	8.3	15		T <sub>J</sub> = 125°C	
Q <sub>rr</sub>	Diode Reverse Recovery Charge	—	260	675	nC	T <sub>J</sub> = 25°C See Fig. 16	
		—	680	1838		T <sub>J</sub> = 125°C	
d <sub>i(rec)M</sub> /dt	Diode Peak Rate of Fall of Recovery During t <sub>b</sub>	—	120	—	A/μs	T <sub>J</sub> = 25°C See Fig. 17	
		—	76	—		T <sub>J</sub> = 125°C	

## Annexe E: L'organigramme de l'acquisition des E/S



---

## Annexe F: L'organigramme de la manipulation sur le système





## Annexe A : Protocole I2C

### a) Codage de l'information :

L'I2C est basé sur le codage de type binaire (0 ou 1), qui ne connaît pas de valeur intermédiaire que ces deux états.

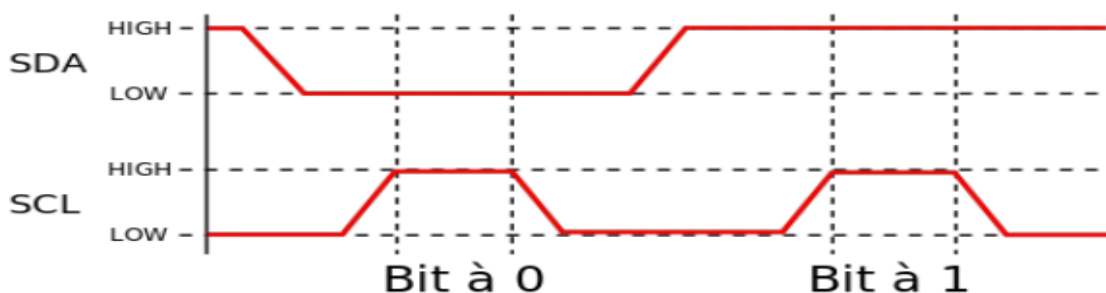


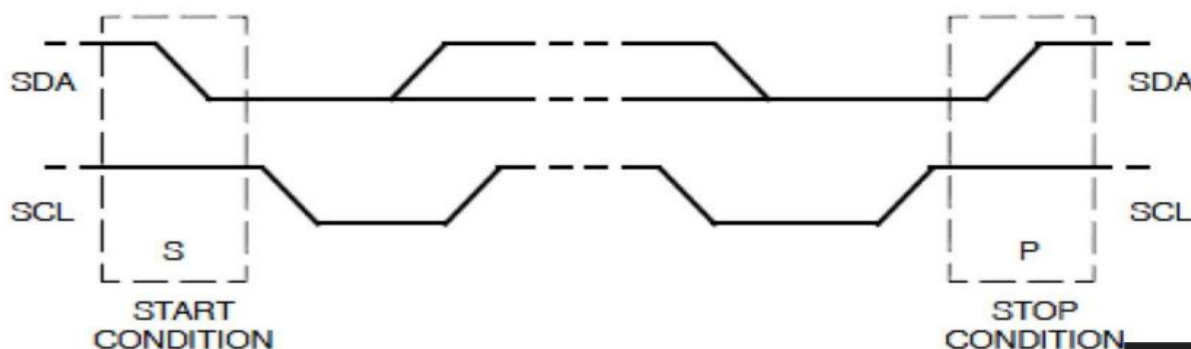
Fig.II.1 condition de fonctionnement de bus.

Sur le graphique ci-dessus, on voit qu'il faut que le niveau High ou Low de la ligne des données(SDA) soit à un niveau stable au moment du passage au niveau High sur la ligne d'horloge(SCL) pour que le bit soit lu. De plus, on peut aussi voir que l'état logique 0, représenté par l'état LOW sur le graphique correspond à l'état dit « dominant » pour la ligne d'horloge et que l'état logique 1, représenté par l'état HIGH correspond à l'état dit « récessif ».

Ce bus utilise des résistances de type « pull up » qui sont des résistances de tirage vers le 5V, c'est pourquoi, lorsque le bus n'est pas utilisé, SDA et SCL sont aux niveaux hauts.

### b) Condition de départ et condition d'arrêt :

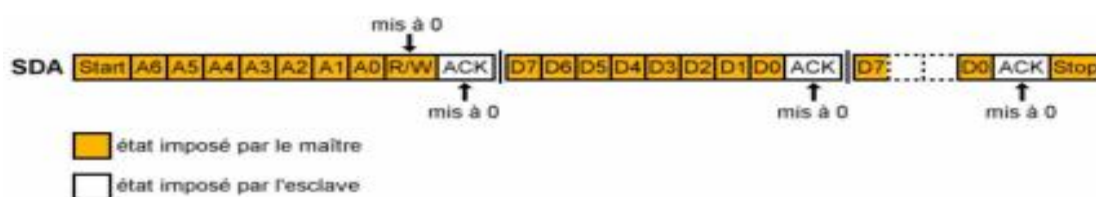
Il y a une séquence particulière appelée « Start-condition » qui est toujours nécessaire pour débiter les échanges de données, cela se traduit par le passage de l'état logique 1(niveau haut) à l'état 0 (niveau bas) pour la ligne SDA avec le niveau haut pour ligne SCL. La séquence « Stop-condition » détermine la fin des échanges avec le passage de la ligne SDA de l'état 0(niveau bas) à l'état logique 1(niveau haut) avec la ligne SCL à 1.



### c) Le bit Read/Write:

C'est un bit qui indique au récepteur si les données envoyés par le maître sont à écrire (R/W=0) ou à lire (R/W=1). Si le bit est à 0, cela veut dire que le maître va envoyer des données, l'esclave va donc devoir lire ses données, à l'inverse, si le bit est à 1, cela veut dire que le maître attend des données, et donc l'esclave doit lui en envoyer.

Exemple d'échange entre maître et esclave dans le cas d'une écriture de données :

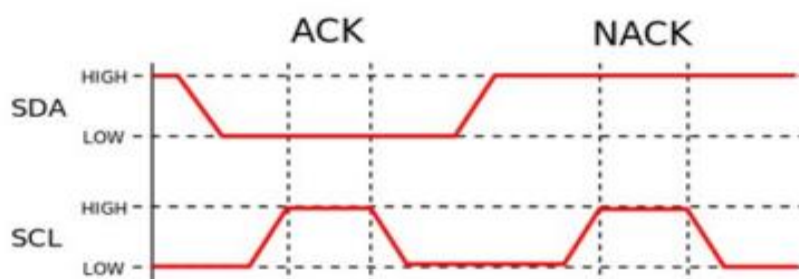


Exemple d'échange entre maître et esclave dans le cas d'une lecture de données :



### d) . La condition « acquittement et non acquittement » :

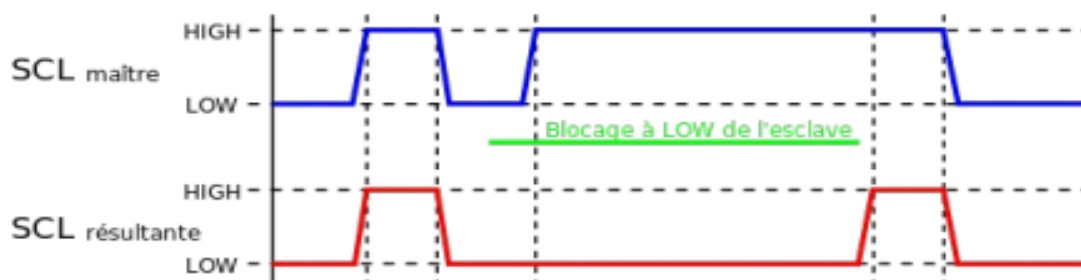
L'acquittement "Acknowledge" est en fait l'accusé de réception de l'information envoyé. En effet c'est le récepteur qui doit émettre ce bit pour indiquer qu'il a bien lu l'octet ou l'adresse envoyé par l'émetteur. Cette indication est lu comme un bit classique, elle vaudra 0 si l'accusé de réception est faites elle est symbolisé par ACK. Sinon ça sera un NOACK pour tout autre raison. Schématiquement, voici à quoi ressemble la condition d'acquittement ou de non-acquittement :



### e) La condition « Pause » :

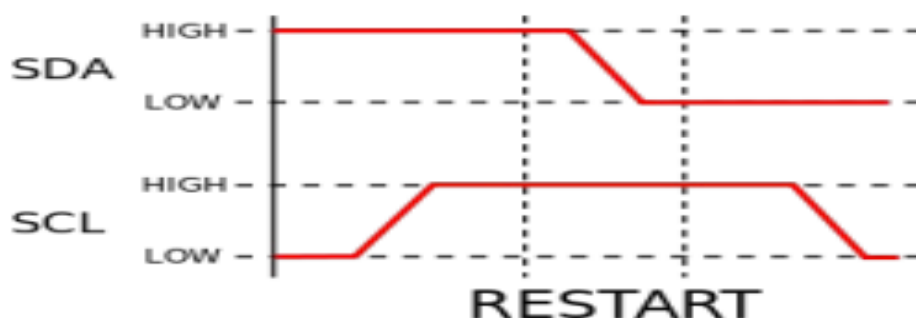
Cette condition est en fait un cas particulier lors de l'écriture. En effet c'est le récepteur qui demande au maître de patienter une durée de temps pour qu'il puisse traiter l'information. Le récepteur bloque la ligne d'horloge à l'état bas durant la pause demandée. En effet le maître n'arrive pas à envoyer l'impulsion d'horloge, donc il ne peut pas envoyer l'information jusqu'à ce que le récepteur soit prêt et libère la ligne SCL, qui prend alors l'état haut. Le maître peut maintenant poursuivre.

Schématiquement, voici à quoi ressemble la condition de Pause :



## f) La condition de « Restart » :

Le bus I2C permet une alternance d'échange d'écriture et de lecture sans pour autant arrêter le dialogue à chaque changement d'état. En effet, il existe une condition appelée «Restart-condition ». Le cas le plus propice à l'utilisation de cette condition, est le cas du dialogue avec une RAM. Le maître commence par envoyer l'adresse du composant avec le bit R/W positionné sur écriture. La RAM adressée en esclave renvoie le bit d'acquittement (ACK) à 0. Ensuite, le maître transmet l'adresse interne de la case mémoire demandée. Une fois encore, l'esclave répond par ACK = 0. Le maître envoie alors à nouveau une condition de départ (sans passer par une condition d'arrêt), puis de nouveau l'adresse du composant sélectionné, mais en plaçant le bit R/W sur la position lecture, soit le bit de R/W à 1. L'esclave va répondre par un bit d'acquittement (ACK) à 0 et enchaîner par la transmission du contenu de la case mémoire demandée. C'est toujours le maître qui impose l'horloge SCL mais c'est l'esclave, ici la RAM, qui contrôle la ligne SDA. Une fois les 8 bits de données transmis par la RAM, si le maître veut lire le contenu de la case mémoire suivante, il placera le bit ACK à 0. Dans ce cas, la RAM recommence la lecture avec la case mémoire suivante. En revanche, si le maître souhaite en terminer avec la lecture, il placera le bit ACK à 1 et il générera ensuite la condition arrêt. Schématiquement, voici la condition de Restart :



## g) L'adressage des esclaves :

Le bus I2C peut mettre en relation un maître à plusieurs esclaves. Il définit à qu'il va envoyer telle ou telle information. Les esclaves possèdent tous un adressage différent, c'est une adresse sur 8 bits : 7 bits destinés à l'adresse et le 8ème est réservé au bit qui désigne l'état de lecture ou d'écriture.

Cependant, les esclaves ne peuvent pas prendre toutes les adresses, en effet, il y a certaines adresses qui sont réservées, en voici la liste :

-« 00000000 » : est une adresse utilisée pour s'adresser à tous les esclaves.

-« 0000001X » : est une adresse utilisée pour accéder aux composants CBUS qui

est l'ancêtre de l'PC.

-« 0000010X » : réservée pour d'autres systèmes de bus.

-« 0000011X » : réservée pour des utilisations spécifiques.

-« 00001XXX » : adresse utilisée pour les composants haute-vitesse.

-« 11111XXX » : réservée pour des utilisations spécifiques.

-« 11110yzX » : adresse permettant de préciser une adresse sur 10 bits

---

## Annexe B : L'ATMega 328

Le microcontrôleur utilisé sur la carte Arduino UNO est un microcontrôleur **ATMega328**. C'est un microcontrôleur ATMEL de la famille AVR 8bits.

Les principales caractéristiques sont :

**FLASH** = mémoire programme de 32Ko

**SRAM** = données (volatiles) 2Ko

**EEPROM** = données (non volatiles) 1Ko

**Digital I/O (entrées-sorties Tout Ou Rien)**

=

3 ports PortB, PortC, PortD (soit 23 broches en tout I/O)

**Timers/Counters** : Timer0 et Timer2

(comptage 8 bits), Timer1 (comptage 16bits) Chaque timer peut être utilisé pour générer deux signaux PWM. (6 broches OCxA/OCxB)

**Plusieurs broches multi-fonctions** : certaines broches peuvent avoir plusieurs fonctions différentes choisies par programmation

**PWM** = 6 broches **OC0A(PD6)**, **OC0B(PD5)**, **OC1A(PB1)**, **OC1B(PB3)**, **OC2A(PB3)**, **OC2B(PD3)**

**Analog to Digital Converter** (résolution 10bits) = 6 entrées multiplexées **ADC0(PC0)** à **ADC5(PC5)**

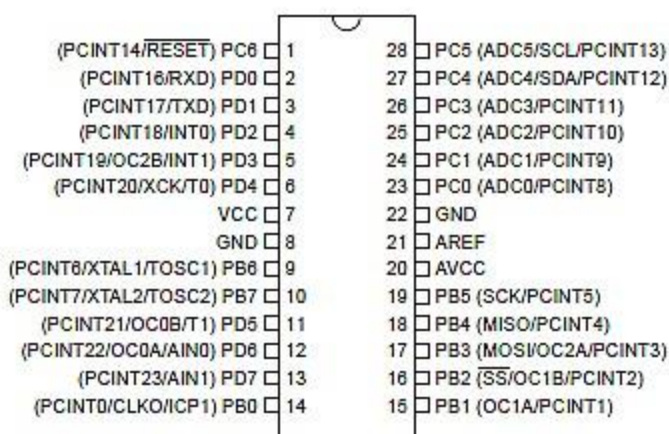
**Gestion bus I2C** (TWI Two Wire Interface) = le bus est exploité via les broches **SDA(PC5)/SCL(PC4)**.

**Port série (USART)** = émission/réception série via les broches **TXD(PD1)/RXD(PD0)** Comparateur Analogique =

broches **AIN0(PD6)** et **AIN1(PD7)** peut déclencher interruption

**Watchdog Timer programmable.**

**Gestion d'interruptions (24 sources possibles (cf interrupt vectors))** : en résumé



- Interruptions liées aux entrées **INT0 (PD2) et INT1 (PD3)**
- Interruptions sur changement d'état des broches **PCINT0 à PCINT23**
- Interruptions liées aux Timers 0, 1 et 2 (plusieurs causes configurables)
- Interruption liée au comparateur analogique
- Interruption de fin de conversion **ADC**
- Interruptions du port série **USART**
- Interruption du bus **TWI (I2C)**

## 4 Structure interne de l'ATMega328 (extraits des documentations ATMEL)

L'utilisation des périphériques intégrés (Entrées Sorties TOR, Timers, ...) repose sur l'exploitation (lecture/écriture) de registres internes. Ces registres, essentiellement 8 bits, sont décrits par un nom, y compris dans la programmation en C. Cette section fournit quelques détails importants sur les registres internes du microcontrôleur ATMega328.

**Notation** : par la suite, pour un registre nommé **R**, la notation **R.n** désigne le bit de rang **n** du registre **R**. Le bit **R.0** est le bit de poids faible de **R**.

### 4.1 Status Register (SREG)

Le registre **SREG** contient des indicateurs liés aux opérations et le bit d'autorisation générale des interruptions. Les bits de ce registre sont : **Z** (Zero), **C** (Carry), **S** (Sign) ... Le bit d'activation général du système d'interruptions est le bit **I (SREG.7)**

**Note** : en langage C, ce bit **I** est modifiable via les appels **sei ()** (setIT) **cli ()** (ClearIT)

#### SREG – AVR Status Register

The AVR Status Register – SREG – is defined as:

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
0x3F (0x5F)	<b>I</b>	<b>T</b>	<b>H</b>	<b>S</b>	<b>V</b>	<b>N</b>	<b>Z</b>	<b>C</b>	<b>SREG</b>
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

#### • Bit 7 – I: Global Interrupt Enable

The Global Interrupt Enable bit must be set for the interrupts to be enabled. The individual interrupt enable control is then performed in separate control registers. If the Global Interrupt Enable Register is cleared, none of the interrupts are enabled independent of the individual interrupt enable settings. The I-bit is cleared by hardware after an interrupt has occurred, and is set by the RETI instruction to enable subsequent interrupts. The I-bit can also be set and cleared by the application with the SEI and CLI instructions, as described in the instruction set reference.

## 4.2 Digital I/O (Entrées Sorties Tout Ou Rien TOR)

Souvent, les microcontrôleurs disposent de broches d'entrée/sortie TOR, comme sur un automate programmable industriel (cf cours Automatismes Industriels). Pour placer l'état d'une sortie à 0 ou 1, ou lire l'état d'une entrée, il faut exploiter des registres internes, décrits ci-dessous.

Les entrées-sorties sont réparties dans 3 groupes de broches appelés *ports*. Le port B regroupe les broches notées PBx, le port C les broches PCx et le port D les broches PDx. Chaque port est configuré/exploité grâce à 3 registres.

**PORTx** = pour l'écriture de valeurs en sortie

**DDRx** = détermine la direction de chaque broche du port (1-sortie 0-entrée) **PINx** = permet la lecture de la valeur en entrée

Chaque broche de port E/S a une résistance de pull-up interne qui peut être désactivée. Le bit **PUD** du registre MCUCR permet la désactivation des résistances de pull-up.

**Direction des ports** : si le bit **DDRB.2** vaut 1 alors la broche **PB2** est une sortie TOR.

**Ecriture des sorties TOR** : si une broche est configurée en sortie ( $DDR_x.n=1$ ) alors l'écriture du bit **PORTx.n** permet de définir l'état de la sortie (0 ou 1).

**Ex** : **DDRB.5=1** (donc **PB5 en sortie**) écrire 0 ou 1 dans le bit **PORTB.5** permet de définir l'état de la sortie **PB5**.

**Lectures des entrées TOR** : si une broche est configurée en entrée ( $DDR_x.n=0$ ) alors la lecture du bit **PINx.n** permet de connaître l'état de l'entrée.

**Ex** : **DDRB.4=0** (donc **PB4 en entrée**), lire **PINB.4** permet de connaître l'état de l'entrée **PB4**.



## MCUCR – MCU Control Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
0x35 (0x55)	–	BODS	BODSE	PUD	–	–	IVSEL	IVCE	MCUCR
Read/Write	R	R	R	R/W	R	R	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

- **Bit 4 – PUD: Pull-up Disable**

When this bit is written to one, the pull-ups in the I/O ports are disabled even if the DDxn and PORTxn Registers are configured to enable the pull-ups ( $\{DDxn, PORTxn\} = 0b01$ ). See "Configuring the Pin" on page 76 for more details about this feature.

## PORTB – The Port B Data Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
0x05 (0x25)	PORTB7	PORTB6	PORTB5	PORTB4	PORTB3	PORTB2	PORTB1	PORTB0	PORTB
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

## DDRB – The Port B Data Direction Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
0x04 (0x24)	DDB7	DDB6	DDB5	DDB4	DDB3	DDB2	DDB1	DDB0	DDRB
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

## PINB – The Port B Input Pins Address

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
0x03 (0x23)	PINB7	PINB6	PINB5	PINB4	PINB3	PINB2	PINB1	PINB0	PINB
Read/Write	R	R	R	R	R	R	R	R	
Initial Value	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	

## Gestion des résistances pull-up internes

En technologie MOS, une entrée "en l'air" a un état indéterminé. Lorsqu'on veut exploiter des boutons poussoir, on les branche de façon à ramener l'entrée à 0 quand on ferme le contact. Lorsque le contact est ouvert, l'état de l'entrée est ramené à 1 par des résistances de tirage à 1 (pull-up).

**PORTx.n=1 ET DDRx.n=0 ALORS pull-interne de Pxn activée**

**PORTx.n=0 OU DDRx.n=1 ALORS pull-interne de Pxn désactivée**

Si **PUD=1** ALORS toutes les résistances de pull-up -interne de tous les ports désactivées

## 4.3 Sources d'interruption exploitables sur ATmega328 (carte Arduino UNO)

Le vecteur d'interruptions décrit toutes les sources pouvant, sous-réserve de bonne configuration, conduire à un déclenchement d'interruption.

### 11.4 Interrupt Vectors in ATmega328P

**Table 11-6.** Reset and Interrupt Vectors in ATmega328P

VectorNo.	Program Address <sup>(2)</sup>	Source	Interrupt Definition
1	0x0000 <sup>(1)</sup>	RESET	External Pin, Power-on Reset, Brown-out Reset and Watchdog System Reset
2	0x0002	INT0	External Interrupt Request 0
3	0x0004	INT1	External Interrupt Request 1
4	0x0006	PCINT0	Pin Change Interrupt Request 0
5	0x0008	PCINT1	Pin Change Interrupt Request 1
6	0x000A	PCINT2	Pin Change Interrupt Request 2
7	0x000C	WDT	Watchdog Time-out Interrupt
8	0x000E	TIMER2 COMPA	Timer/Counter2 Compare Match A
9	0x0010	TIMER2 COMPB	Timer/Counter2 Compare Match B
10	0x0012	TIMER2 OVF	Timer/Counter2 Overflow
11	0x0014	TIMER1 CAPT	Timer/Counter1 Capture Event
12	0x0016	TIMER1 COMPA	Timer/Counter1 Compare Match A
13	0x0018	TIMER1 COMPB	Timer/Counter1 Compare Match B
14	0x001A	TIMER1 OVF	Timer/Counter1 Overflow
15	0x001C	TIMER0 COMPA	Timer/Counter0 Compare Match A
16	0x001E	TIMER0 COMPB	Timer/Counter0 Compare Match B
17	0x0020	TIMER0 OVF	Timer/Counter0 Overflow
18	0x0022	SPI, STC	SPI Serial Transfer Complete
19	0x0024	USART, RX	USART Rx Complete
20	0x0026	USART, UDRE	USART, Data Register Empty
21	0x0028	USART, TX	USART, Tx Complete
22	0x002A	ADC	ADC Conversion Complete

**Table 11-1.** Reset and Interrupt Vectors in ATmega48PA (Continued)

Vector No.	Program Address	Source	Interrupt Definition
24	0x017	ANALOG COMP	Analog Comparator
25	0x018	TWI	2-wire Serial Interface
26	0x019	SPM READY	Store Program Memory Ready

### 4.3.1 Interruptions Externes

Il s'agit d'interruptions liées à des niveaux ou des changements d'états de broches du microcontrôleur. Les broches impliquées doivent être configurées en entrée (cf. 4.2 DIGITAL I/O).

**Broches INT0 (PD2)/INT1(PD3) :** configurables pour déclencher les interruptions (n° 2 et 3) sur niveau 0, front négatif ou positif.

## La cause d'interruption est choisie par le registre EICRA

### EICRA – External Interrupt Control Register A

The External Interrupt Control Register A contains control bits for interrupt sense control.

Bit (0x69)	7	6	5	4	3	2	1	0	
	-	-	-	-	ISC11	ISC10	ISC01	ISC00	EICRA
Read/Write	R	R	R	R	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

**Table 12-2.** Interrupt 0 Sense Control

ISC01	ISC00	Description
0	0	The low level of INT0 generates an interrupt request.
0	1	Any logical change on INT0 generates an interrupt request.
1	0	The falling edge of INT0 generates an interrupt request.
1	1	The rising edge of INT0 generates an interrupt request.

**Note :** Pour l'interruption INT1, les bits ISC11 et ISC10 ont le même sens que ci-dessus.

## Activation des interruptions INT0/INT1 = bit SREG.7 (I)=1 et mise à 1 de EIMSK.0/EIMSK.1

### EIMSK – External Interrupt Mask Register

Bit 0x1D (0x3D)	7	6	5	4	3	2	1	0	
	-	-	-	-	-	-	INT1	INT0	EIMSK
Read/Write	R	R	R	R	R	R	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

**Flags internes =** lorsqu'une cause d'IT est détectée, un flag interne de EIFR est positionné

### EIFR – External Interrupt Flag Register

Bit 0x1C (0x3C)	7	6	5	4	3	2	1	0	
	-	-	-	-	-	-	INTF1	INTF0	EIFR
Read/Write	R	R	R	R	R	R	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

**Exemple :** on souhaite qu'un front négatif sur INT1 (PD3) conduise à une interruption INT1. Il faut donc

**SREG.7=1** (bit général d'activation des IT, sans lui aucune IT)

**EIMSK.1 (INT1)= 1** (pour prise en compte des IT INT1)

**EICRA.2(ISC10)=0 ET EICRA.3(ISC11)=1** (IT sur front négatif sur INT1)

**Broches PCINT0 à PCINT23 :** configurables pour déclencher des interruptions (n° 4,5 et 6) sur des changements d'état ("Pin Change") des broches (configurées en entrée DDRx.n=1). Les broches sont séparées en 3 sous -groupes,





**Exemple** : on souhaite qu'un changement d'état de la broche **PCINT2** (PB2) conduise à une interruption **PCIE0**. Il faut donc

- SREG.7=1** (bit général d'activation des IT, sans lui aucune IT)
- PCICR.0 = PCIE0=1** (pour que le sous-groupe 0 puisse conduire à IT)
- PCMSK0.2 = PCINT2 = 1** (pour que la broche PCINT2 soit prise en compte)

## 4.3.2 Interruptions Timers

Plusieurs sources d'interruptions sont liées à un même timer.

**Les indicateurs internes liés aux interruptions timers 0 sont dans le registre TIFR0**

**TIFR0 – Timer/Counter 0 Interrupt Flag Register**

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
0x15 (0x35)	–	–	–	–	–	OCF0B	OCF0A	TOV0	TIFR0
Read/Write	R	R	R	R	R	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

**Activation des interruptions Timer 0 (3 sources n°14, 15 et 16)**

**TIMSK0 – Timer/Counter Interrupt Mask Register**

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0x6E)	–	–	–	–	–	OCIE0B	OCIE0A	TOIE0	TIMSK0
Read/Write	R	R	R	R	R	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

- **Bit 2 – OCIE0B: Timer/Counter Output Compare Match B Interrupt Enable**

When the OCIE0B bit is written to one, and the I-bit in the Status Register is set, the Timer/Counter Compare Match B interrupt is enabled. The corresponding interrupt is executed if a Compare Match in Timer/Counter occurs, i.e., when the OCF0B bit is set in the Timer/Counter Interrupt Flag Register – TIFR0.

- **Bit 1 – OCIE0A: Timer/Counter0 Output Compare Match A Interrupt Enable**

When the OCIE0A bit is written to one, and the I-bit in the Status Register is set, the Timer/Counter0 Compare Match A interrupt is enabled. The corresponding interrupt is executed if a Compare Match in Timer/Counter0 occurs, i.e., when the OCF0A bit is set in the Timer/Counter 0 Interrupt Flag Register – TIFR0.

- **Bit 0 – TOIE0: Timer/Counter0 Overflow Interrupt Enable**

When the TOIE0 bit is written to one, and the I-bit in the Status Register is set, the Timer/Counter0 Overflow interrupt is enabled. The corresponding interrupt is executed if an overflow in Timer/Counter0 occurs, i.e., when the TOV0 bit is set in the Timer/Counter 0 Interrupt Flag Register – TIFR0.

**Remarque** : pour les Timers 1 et 2, les configurations sont similaires.

**Exemple :** on souhaite que chaque débordement du Timer 0 conduise à une interruption.

**SREG.7=1** (bit général d'activation des IT, sans lui aucune IT)  
**TIMSK0.0 (TOIE0)=1** (interruption sur débordement du timer 0)

## 4.4 Timers/Counters de ATmega328

Les microcontrôleurs AVR disposent de modules de temporisation/comptage internes, fonctionnant pour certains avec des registres de comptage sur 8 bits, et pour d'autres sur 16 bits. Dans tous les cas, chaque événement de comptage conduit à une modification du registre de comptage (+1 ou -1). L'événement de comptage peut être un "tick" de l'horloge du microcontrôleur, ce qui revient à mesurer l'écoulement du temps. L'événement de comptage peut aussi être un front sur une broche d'entrée du microcontrôleur (les broches T0 et T1 peuvent servir d'entrée de comptage).

**Fonction Temporisateur :** lorsque l'on compte des "ticks" de l'horloge qui cadence le microcontrôleur, on mesure du temps. Les modules Timers/Counters permettent de compter les ticks du signal d'horloge ou un signal de fréquence plus faible obtenu par un diviseur appelé **prescaler**.

**Fonction Compteur :** lorsque l'on compte des fronts sur une entrée de comptage (broches T0 ou T1), on utilise alors la fonction "compteur" du module.

Le choix entre fonction de temporisation (avec prédiviseur de fréquence ou non) et fonction de comptage se fait par paramétrage de registres dédiés à la gestion des modules Timers/Counters.

**Génération de signaux périodiques :** les modules Timers/Counters sont assez complexes et chacun de ces modules peut générer deux signaux PWM dont le rapport cyclique est facilement modifiable.

**Remarque :** ces périphériques intégrés sont assez complexes (environ 70 pages du datasheet ATmega). Seule une vision simplifiée est fournie ici.

### 4.4.1 Timer/Counter 0 (comptage 8 bits)

C'est un module Timer/Counter avec registre de comptage 8 bits. En utilisant l'IDE Arduino, le timer 0 est implicitement utilisé par les fonctions de delay (ainsi que l'interruption correspondante). Ce module Timer/Counter n'est donc pas utilisable directement avec la carte ARDUINO.

### 4.4.2 Timer/Counter 2 (comptage 8 bits)

C'est un module Timer/Counter avec registre de comptage 8 bits.



## OCR2A – Output Compare Register A

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0xB3)	OCR2A[7:0]								OCR2A
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	
Initial Value	0	0	0	0	0	0	0	0	

The Output Compare Register A contains an 8-bit value that is continuously compared with the counter value (TCNT2). A match can be used to generate an Output Compare interrupt, or to generate a waveform output on the OC2A pin.

## OCR2B – Output Compare Register B

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0xB4)	OCR2B[7:0]								OCR2B
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	

## TCCR2A – Timer/Counter Control Register A

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0xB0)	COM2A1	COM2A0	COM2B1	COM2B0	–	–	WGM21	WGM20	TCCR2A
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R	R	R/W	R/W	

## TCCR2B – Timer/Counter Control Register B

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0xB1)	FOC2A	FOC2B	–	–	WGM22	CS22	CS21	CS20	TCCR2B
Read/Write	W	W	R	R	R	R	R/W	R/W	

## TIMSK2 – Timer/Counter2 Interrupt Mask Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0x70)	–	–	–	–	–	OCIE2B	OCIE2A	TOIE2	TIMSK2
Read/Write	R	R	R	R	R	R/W	R/W	R/W	

## TIFR2 – Timer/Counter2 Interrupt Flag Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
0x17 (0x37)	–	–	–	–	–	OCF2B	OCF2A	TOV2	TIFR2
Read/Write	R	R	R	R	R	R/W	R/W	R/W	

Les bits WGM22:20 définissent le mode de fonctionnement du module.



**Table 17-8.** Waveform Generation Mode Bit Description

Mode	WGM2	WGM1	WGM0	Timer/Counter Mode of Operation	TOP	Update of OCRx at	TOV Flag Set on <sup>(1)(2)</sup>
0	0	0	0	Normal	0xFF	Immediate	MAX
1	0	0	1	PWM, Phase Correct	0xFF	TOP	BOTTOM
2	0	1	0	CTC	OCRA	Immediate	MAX
3	0	1	1	Fast PWM	0xFF	BOTTOM	MAX
4	1	0	0	Reserved	–	–	–
5	1	0	1	PWM, Phase Correct	OCRA	TOP	BOTTOM
6	1	1	0	Reserved	–	–	–
7	1	1	1	Fast PWM	OCRA	BOTTOM	TOP

Notes: 1. MAX= 0xFF  
2. BOTTOM= 0x00

Selon le mode choisi par les bits WGM0:2 on a les options suivantes (mode PWM Phase correct non décrit)

**Bits 7:6 – COM2A1:0: Compare Match Output A Mode.** Ces bits configurent le rôle de la broche OC2A/PB3. Si l'un des bits COM2A1:0 vaut 1, la broche OC2A a une fonction alternative (associée au module Timer/Counter 2). Néanmoins, le registre DDR doit être tel que OC2A/PB3 **soit une sortie (cf 4.2)**.

**Table 17-2 : Mode Normal ou CTC (non-PWM mode)**

**Table 17-2.** Compare Output Mode, non-PWM Mode

COM2A1	COM2A0	Description
0	0	Normal port operation, OC0A disconnected.
0	1	Toggle OC2A on Compare Match
1	0	Clear OC2A on Compare Match
1	1	Set OC2A on Compare Match

**Table 17-3 : Fast-PWM mode**

**Table 17-3.** Compare Output Mode, Fast PWM Mode<sup>(1)</sup>

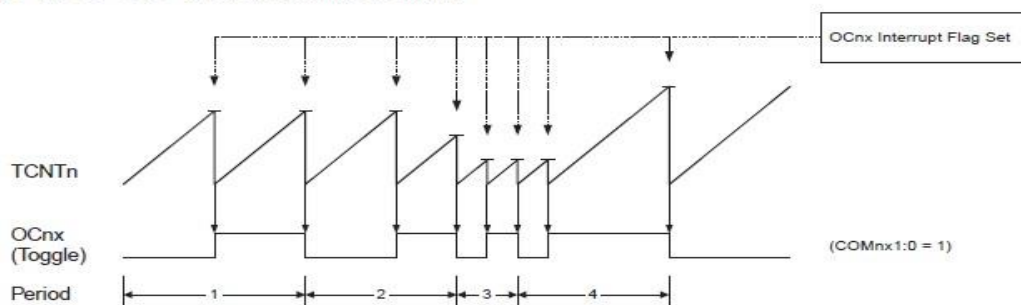
COM2A1	COM2A0	Description
0	0	Normal port operation, OC2A disconnected.
0	1	WGM22 = 0: Normal Port Operation, OC0A Disconnected. WGM22 = 1: Toggle OC2A on Compare Match.
1	0	Clear OC2A on Compare Match, set OC2A at BOTTOM, (non-inverting mode).
1	1	Set OC2A on Compare Match, clear OC2A at BOTTOM, (inverting mode).

### Clear Timer on Compare Match (CTC) Mode

En mode CTC (WGM22:0 = 2), le registre OCR2A règle la résolution. Le compteur TCTN2 est remis à zéro après l'égalité (match) TCTN2=OCR2A. Le registre OCR2A définit la valeur maximale pour le compteur, et donc sa

résolution. On peut configurer le module 2 pour inverser l'état de la sortie OC2A (PB3) il faut alors (COM2A1:0 = 1).

**Figure 17-5.** CTC Mode, Timing Diagram



## Prescaler Timer 2 (réglage de la vitesse de débordement en fonction de l'horloge)

**Table 17-9.** Clock Select Bit Description

CS22	CS21	CS20	Description
0	0	0	No clock source (Timer/Counter stopped).
0	0	1	$clk_{T2S}/(\text{No prescaling})$
0	1	0	$clk_{T2S}/8$ (From prescaler)
0	1	1	$clk_{T2S}/32$ (From prescaler)
1	0	0	$clk_{T2S}/64$ (From prescaler)
1	0	1	$clk_{T2S}/128$ (From prescaler)
1	1	0	$clk_{T2S}/256$ (From prescaler)
1	1	1	$clk_{T2S}/1024$ (From prescaler)

### 4.4.3 Timer/Counter 1 (comptage 16 bits)

Le registre de comptage TCNT1, ainsi que les registres de comparaison OCR1A et OCR1B, sont cette fois-ci sur 16 bits.

**Note:** en langage d'assemblage, il faut deux accès 8 bits pour lire/écrire ces registres 16 bits. En langage C, on peut manipuler symboliquement des données 16 bits via les symboles TCNT1, OCR1A et OCR1B sans se soucier de la façon dont le code sera généré.



## TIMSK1 – Timer/Counter1 Interrupt Mask Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0x6F)	–	–	ICIE1	–	–	OCIE1B	OCIE1A	TOIE1	TIMSK1
Read/Write	R	R	R/W	R	R	R/W	R/W	R/W	

## TIFR1 – Timer/Counter1 Interrupt Flag Register

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
0x16 (0x36)	–	–	ICF1	–	–	OCF1B	OCF1A	TOV1	TIFR1
Read/Write	R	R	R/W	R	R	R/W	R/W	R/W	

## TCCR1A – Timer/Counter1 Control Register A

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0x80)	COM1A1	COM1A0	COM1B1	COM1B0	–	–	WGM11	WGM10	TCCR1A
Read/Write	R/W	R/W	R/W	R/W	R	R	R/W	R/W	

## TCCR1B – Timer/Counter1 Control Register B

Bit	7	6	5	4	3	2	1	0	
(0x81)	ICNC1	ICES1	–	WGM13	WGM12	CS12	CS11	CS10	TCCR1B
Read/Write	R/W	R/W	R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	

Selon le mode choisi par les bits WGM10:3 on a les options suivantes (mode PWM Phase correct non décrit)

**Table 15-4.** Waveform Generation Mode Bit Description<sup>(1)</sup>

Mode	WGM13	WGM12 (CTC1)	WGM11 (PWM11)	WGM10 (PWM10)	Timer/Counter Mode of Operation	TOP	Update of OCR1x at	TOV1 Flag Set on
0	0	0	0	0	Normal	0xFFFF	Immediate	MAX
1	0	0	0	1	PWM, Phase Correct, 8-bit	0x00FF	TOP	BOTTOM
2	0	0	1	0	PWM, Phase Correct, 9-bit	0x01FF	TOP	BOTTOM
3	0	0	1	1	PWM, Phase Correct, 10-bit	0x03FF	TOP	BOTTOM
4	0	1	0	0	CTC	OCR1A	Immediate	MAX
5	0	1	0	1	Fast PWM, 8-bit	0x00FF	BOTTOM	TOP
6	0	1	1	0	Fast PWM, 9-bit	0x01FF	BOTTOM	TOP
7	0	1	1	1	Fast PWM, 10-bit	0x03FF	BOTTOM	TOP
8	1	0	0	0	PWM, Phase and Frequency Correct	ICR1	BOTTOM	BOTTOM
9	1	0	0	1	PWM, Phase and Frequency Correct	OCR1A	BOTTOM	BOTTOM
10	1	0	1	0	PWM, Phase Correct	ICR1	TOP	BOTTOM
11	1	0	1	1	PWM, Phase Correct	OCR1A	TOP	BOTTOM
12	1	1	0	0	CTC	ICR1	Immediate	MAX
13	1	1	0	1	(Reserved)	–	–	–
14	1	1	1	0	Fast PWM	ICR1	BOTTOM	TOP
15	1	1	1	1	Fast PWM	OCR1A	BOTTOM	TOP

Note: 1. The CTC1 and PWM11:0 bit definition names are obsolete. Use the WGM12:0 definitions. However, the functionality and location of these bits are compatible with previous versions of the timer.

**Table 15-1 : Mode Normal ou CTC (non-PWM mode)**

**Table 15-1.** Compare Output Mode, non-PWM

COM1A1/COM1B1	COM1A0/COM1B0	Description
0	0	Normal port operation, OC1A/OC1B disconnected.
0	1	Toggle OC1A/OC1B on Compare Match.
1	0	Clear OC1A/OC1B on Compare Match (Set output to low level).
1	1	Set OC1A/OC1B on Compare Match (Set output to high level).

**Table 15-2 : Fast-PWM mode**



**Table 15-2.** Compare Output Mode, Fast PWM<sup>(1)</sup>

COM1A1/COM1B1	COM1A0/COM1B0	Description
0	0	Normal port operation, OC1A/OC1B disconnected.
0	1	WGM13:0 = 14 or 15: Toggle OC1A on Compare Match, OC1B disconnected (normal port operation). For all other WGM1 settings, normal port operation, OC1A/OC1B disconnected.
1	0	Clear OC1A/OC1B on Compare Match, set OC1A/OC1B at BOTTOM (non-inverting mode)
1	1	Set OC1A/OC1B on Compare Match, clear OC1A/OC1B at BOTTOM (inverting mode)

Note: 1. A special case occurs when OCR1A/OCR1B equals TOP and COM1A1/COM1B1 is set. In this case the compare match is ignored, but the set or clear is done at BOTTOM. See Section "15.9.3" on page 126. for more details.

## Prescaler Timer 1 (réglage de la vitesse de débordement en fonction de l'horloge)

**Table 15-5.** Clock Select Bit Description

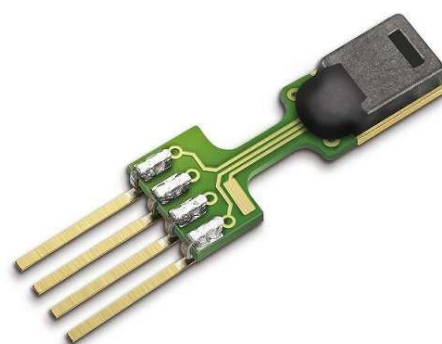
CS12	CS11	CS10	Description
0	0	0	No clock source (Timer/Counter stopped).
0	0	1	$clk_{i/O}/1$ (No prescaling)
0	1	0	$clk_{i/O}/8$ (From prescaler)
0	1	1	$clk_{i/O}/64$ (From prescaler)
1	0	0	$clk_{i/O}/256$ (From prescaler)
1	0	1	$clk_{i/O}/1024$ (From prescaler)
1	1	0	External clock source on T1 pin. Clock on falling edge.
1	1	1	External clock source on T1 pin. Clock on rising edge.

## Annex C : SHT-75

### Datasheet SHT7x (SHT71, SHT75)

Humidity and Temperature Sensor IC

- Fully calibrated
- Digital output
- Low power consumption
- Excellent long term stability
- Pin type package – easy integration



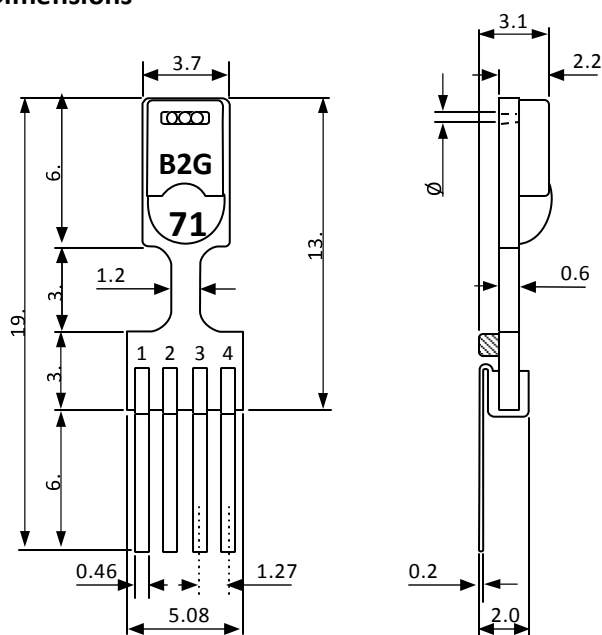
#### Product Summary

SHT7x (including SHT71 and SHT75) is Sensirion's family of relative humidity and temperature sensors with pins. The sensors integrate sensor elements plus signal processing in compact format and provide a fully calibrated digital output. A unique capacitive sensor element is used for measuring relative humidity while temperature is measured by a band-gap sensor. The applied CMOSens® technology guarantees excellent reliability and long term stability. Both sensors are seamlessly coupled to a 14bit analog to digital converter and a serial interface circuit. This results in superior signal quality, a fast response time and insensitivity to external disturbances (EMC).

Each SHT7x is individually calibrated in a precision humidity chamber. The calibration coefficients are programmed into an OTP memory on the chip. These coefficients are used to internally calibrate the signals from the sensors. The 2-wire serial interface and internal voltage regulation allows for easy and fast system integration. The small size and low power consumption makes SHT7x the ultimate choice for even the most demanding applications.

SHT7x is supplied on FR4 with pins which allows for easy integration or replacement. The same sensor is also available as surface mountable packaging (SHT1x) or on flex print (SHTA1).

## Dimensions



## Sensor Chip

SHT7x V4 – for which this datasheet applies – features a version 4 Silicon sensor chip. Besides a humidity and a temperature sensor the chip contains an amplifier, A/D converter, OTP memory and a digital interface. V4 sensors can be identified by the alpha-numeric traceability code on the sensor cap – see example “B2G” code on Figure 1.

## Material Contents

While the sensor is made of a CMOS chip the sensor housing consists of an LCP cap with epoxy glob top on an FR4 substrate. Pins are made of a Cu/Be alloy coated with Ni and Au. The device is fully RoHS and WEEE compliant, thus it is free of Pb, Cd, Hg, Cr(6+), PBB and PBDE.

## Evaluation Kits

For sensor trial measurements, for qualification of the sensor or even experimental application (data logging) of

**Figure 1:** Drawing of SHT7x (applies to SHT71 and SHT75) sensor packaging, dimensions in mm (1mm = 0.039inch). Contact assignment: 1: SCK, 2: VDD, 3: GND, 4: DATA. Hatched item on backside of PCB is a 100nF capacitor – see Section 2.1 for more information.

the sensor there is an evaluation kit *EK-H4* available including SHT71 (same sensor chip as SHT1x) and 4 sensor channels, hard and software to interface with a computer. For other evaluation kits please check [www.sensirion.com/humidity](http://www.sensirion.com/humidity).

## Sensor Performance

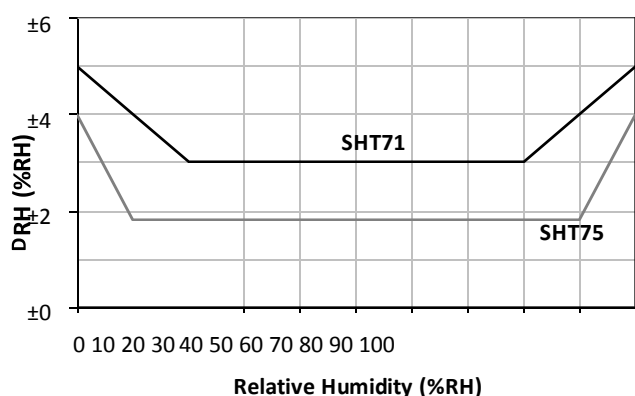
### Relative Humidity

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution <sup>1</sup>		0.4	0.05	0.05	%RH

<sup>1</sup> The default measurement resolution of is 14bit for temperature and 12bit for humidity. It can be reduced to 12/8bit by command to status register.



		8	12	12	bit
Accuracy <sup>2</sup> SHT71	typ		±3.0		%RH
	max	see Figure 2			
Accuracy <sup>2</sup> SHT75	typ		±1.8		%RH
	max	see Figure 2			
Repeatability			±0.1		%RH
Hysteresis			±1		%RH
Nonlinearity	raw data		±3		%RH
	linearized		<<1		%RH
Response time <sup>3</sup>	tau 63%		8		s
Operating Range		0		100	%RH
Long term drift <sup>4</sup>	normal		< 0.5		%RH/yr



**Figure 2:** Maximal RH-tolerance at 25°C per sensor type.

<sup>2</sup> Accuracies are tested at Outgoing Quality Control at 25°C (77°F) and 3.3V. Values exclude hysteresis and are only applicable to non-condensing environments.

<sup>3</sup> Time for reaching 63% of a step function, valid at 25°C and 1 m/s airflow.

## Electrical and General Items

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Source Voltage		2.4	3.3	5.5	V
Power Consumption <sup>56</sup>	sleep		2	5	μW
	measuring		3		mW
	average		90		μW
Communication	digital 2-wire interface, see Communication				
Storage	10 – 50°C (0 – 80°C peak), 20 – 60%RH				

## Temperature

Parameter	Condition	min	typ	max	Units
Resolution <sup>1</sup>		0.04	0.01	0.01	°C
		12	14	14	bit
Accuracy <sup>2</sup> SHT71	typ		±0.4		°C
	max	see Figure 3			
Accuracy <sup>2</sup> SHT75	typ		±0.3		°C
	max	see Figure 3			
Repeatability			±0.1		°C
Operating Range		-40		123.8	°C
		-40		254.9	°F
Response Time <sup>6</sup>	tau 63%	5		30	s
Long term drift			< 0.04		°C/yr

<sup>4</sup> Value may be higher in environments with high contents of volatile organic compounds. See Section 1.3 of Users Guide.

<sup>5</sup> Values for VDD=3.3V at 25°C, average value at one 12bit measurement per second.

<sup>6</sup> Response time depends on heat capacity of and thermal resistance to sensor substrate.

Temperature (°C)

**Figure 3:** Maximal T-tolerance per sensor type.



## Users Guide SHT7x

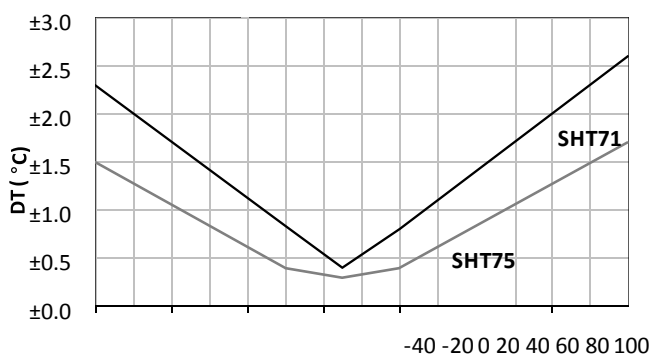
### 1 Application Information

#### 1.1 Operating Conditions

Sensor works stable within recommended normal range – see Figure 4. Long term exposures to conditions outside normal range, especially at humidity >80%RH, may temporarily offset the RH signal (+3 %RH after 60h). After return to normal range it will slowly return towards calibration state by itself. See Section 1.4 “Reconditioning Procedure” to accelerate eliminating the offset. Prolonged exposure to extreme conditions may accelerate ageing.

For these reasons it is recommended to store the sensors in original packaging including the sealed ESD bag at following conditions: Temperature shall be in the range of 10°C – 50°C (0 – 80°C for limited time) and humidity at 20 – 60%RH (sensors that are not stored in ESD bags). For sensors that have been removed from the original packaging we recommend to store them in ESD bags made of metal-in PE-HD<sup>8</sup>.

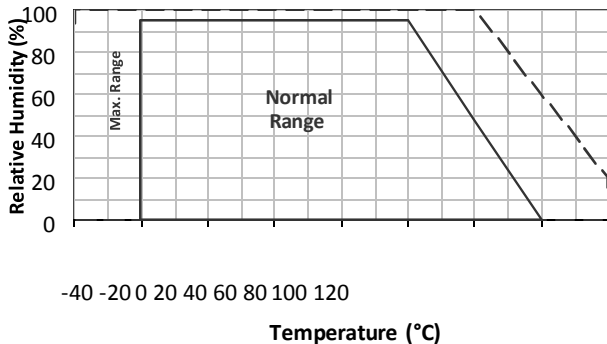
In manufacturing and transport the sensors shall be prevented of high concentration of chemical solvents and



#### Packaging Information

Sensor Type	Packaging	Quantity	Order Number
SHT71	Tape Stripes	50	1-100092-04
SHT75	Tape Stripes	50	1-100071-04

This datasheet is subject to change and may be amended without prior notice.



**Figure 4:** Operating Conditions

## 1.2 Sockets and Soldering

For maintain high accuracy specifications the sensor shall not be soldered. Sockets may be used such as “Preci-dip / Mill-Max R851-83-004-20-001” or similar.

Standard wave soldering ovens may be used at maximum 235°C for 20 seconds. For manual soldering contact time must be limited to 5 seconds at up to 350°C<sup>7</sup>.

After wave soldering the devices should be stored at >75%RH for at least 12h to allow the polymer to rehydrate. Alternatively the re-hydration process may be performed at ambient conditions (>40%RH) during more than 5 days.

In no case, neither after manual nor wave soldering, a board wash shall be applied. In case of application with exposure of the sensor to corrosive gases the soldering pads of pins and PCB shall be sealed to prevent loose contacts or short cuts.

## 1.3 Storage Conditions and Handling Instructions

It is of great importance to understand that a humidity sensor is not a normal electronic component and needs to be handled with care. Chemical vapors at high concentration in combination with long exposure times may offset the sensor reading.

long exposure times. Out-gassing of glues, adhesive tapes and stickers or out-gassing packaging material such as bubble foils, foams, etc. shall be avoided. Manufacturing area shall be well ventilated.

For more detailed information please consult the document “*Handling Instructions*” or contact Sensirion.

## 1.4 Reconditioning Procedure

As stated above extreme conditions or exposure to solvent vapors may offset the sensor. The following reconditioning procedure may bring the sensor back to calibration state:

Baking: 100 – 105°C at < 5%RH for 10h  
 Re-Hydration: 20 – 30°C at ~ 75%RH for 12h<sup>9</sup>.

## 1.5 Temperature Effects

Relative humidity reading strongly depends on temperature. Therefore, it is essential to keep humidity sensors at the same temperature as the air of which the relative humidity is to be measured. In case of testing or qualification the reference sensor and test sensor must show equal temperature to allow for comparing humidity readings.

The packaging of SHT7x is designed for minimal heat transfer from the pins to the sensor. Still, if the SHT7x shares a PCB with electronic components that produce heat it should be mounted in a way that prevents heat transfer or keeps it as low as possible.

Furthermore, there are self-heating effects in case the measurement frequency is too high. Please refer to Section 3.3 for detailed information.

## 1.6 Light

The SHT7x is not light sensitive. Prolonged direct exposure to sunshine or strong UV radiation may age the housing.

## 1.7 Materials Used for Sealing / Mounting

Many materials absorb humidity and will act as a buffer increasing response times and hysteresis. Materials in the vicinity of the sensor must therefore be carefully chosen. Recommended materials are: Any metals, LCP, POM (Delrin), PTFE (Teflon), PE, PEEK, PP, PB, PPS, PSU, PVDF, PVF.

For sealing and gluing (use sparingly): Use high filled epoxy for electronic packaging (e.g. glob top, underfill), and Silicone. Out-gassing of these materials may also contaminate the SHT7x (see Section 1.3). Therefore try to add the sensor as a last manufacturing step to the assembly, store the assembly well ventilated after manufacturing or bake at 50°C for 24h to outgas contaminants before packing.

## 1.8 Wiring Considerations and Signal Integrity

SHT7x are often applied using wires. Carrying the SCK and DATA signal parallel and in close proximity more than 10cm may result in cross talk and loss of communication. This may be resolved by routing VDD and/or GND between the two data signals and/or using shielded cables. Furthermore, slowing down SCK frequency will possibly improve signal integrity.

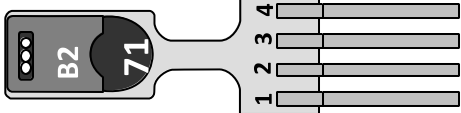
Please see the Application Note “ESD, Latch-up and EMC” for more information.

## 1.9 ESD (Electrostatic Discharge)

ESD immunity is qualified according to MIL STD 883E, method 3015 (Human Body Model at  $\pm 2$  kV). Latch-up immunity is provided at a force current of  $\pm 100$ mA with  $T_{amb} = 80^\circ\text{C}$  according to JEDEC78A. See Application Note “ESD, Latch-up and EMC” for more information.

## 2 Interface Specifications

Pin	Name	Comment
1	SCK	Serial Clock, input only
2	VDD	Source Voltage
3	GND	Ground
4	DATA	Serial Data, bidirectional

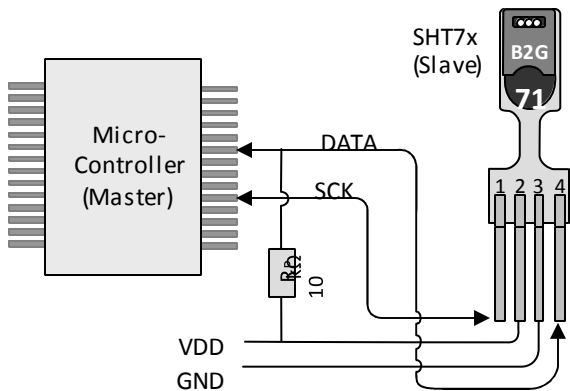


**Table 1:** SHT7x pin assignment.

### 2.1 Power Pins (VDD, GND)

The supply voltage of SHT7x must be in the range of 2.4 and 5.5V, recommended supply voltage is 3.3V. Decoupling of VDD and GND by a 100nF capacitor is integrated on the backside of the sensor packaging.

The serial interface of the SHT7x is optimized for sensor readout and effective power consumption. The sensor cannot be addressed by I<sup>2</sup>C protocol, however, the sensor can be connected to an I<sup>2</sup>C bus without interference with other devices connected to the bus. Microcontroller must switch between protocols.



**Figure 5:** Typical application circuit, including pull up resistor  $R_P$ .

## 2.2 Serial clock input (SCK)

SCK is used to synchronize the communication between microcontroller and SHT7x. Since the interface consists of fully static logic there is no minimum SCK frequency.

## 2.3 Serial data (DATA)

The DATA tri-state pin is used to transfer data in and out of the sensor. For sending a command to the sensor, DATA is valid on the rising edge of the serial clock (SCK) and must remain stable while SCK is high. After the falling edge of SCK the DATA value may be changed. For safe communication DATA valid shall be extended  $T_{SU}$  and  $T_{HO}$  before the rising and after the falling edge of SCK, respectively – see Figure 6. For reading data from the sensor, DATA is valid  $T_V$  after SCK has gone low and remains valid until the next falling edge of SCK.

To avoid signal contention the microcontroller must only drive DATA low. An external pull-up resistor (e.g. 10 kΩ) is required to pull the signal high – it should be noted that pull-up resistors may be included in I/O circuits of microcontrollers. See Table 2 for detailed I/O characteristic of the sensor.

## 2.4 Electrical Characteristics

The electrical characteristics such as power consumption, low and high level, input and output voltages depend on the supply voltage. Table 2 gives electrical characteristics of SHT7x with the assumption of 5V supply voltage if not stated otherwise. For proper communication with the sensor it is essential to make sure that signal design is strictly within the limits given in Table 3 and Figure 6. Absolute maximum ratings for VDD versus GND are +7V and -0.3V. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect the sensor reliability (e.g. hot carrier degradation, oxide breakdown).

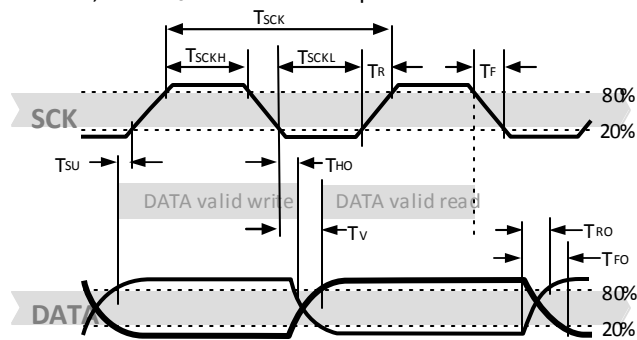
Parameter	Conditions	min	typ	max	Units
Power supply DC <sup>7</sup>		2.4	3.3	5.5	V
Supply current	measuring		0.55	1	mA
	average <sup>8</sup>	2	28		μA
	sleep		0.3	1.5	μA
Low level output voltage	$I_{OL} < 4 \text{ mA}$	0		250	mV
High level output voltage	$R_P < 25 \text{ k}\Omega$	90%		100%	VDD
Low level input voltage	Negative going	0%		20%	VDD

<sup>7</sup> Recommended voltage supply for highest accuracy is 3.3V, due to sensor calibration.

<sup>8</sup> Minimum value with one measurement of 8 bit resolution without OTP reload per second, typical value with one measurement of 12bit resolution per second.

High level input voltage	Positive going	80%		100%	VDD
Input current on pads				1	μA
Output current	on			4	mA
	Tri-stated (off)		10	20	μA

**Table 2:** SHT7x DC characteristics.  $R_p$  stands for pull up resistor, while  $I_{OL}$  is low level output current.



**Figure 6:** Timing Diagram, abbreviations are explained in Table 3. Bold DATA line is controlled by the sensor, plain DATA line is controlled by the micro-controller. Note that DATA valid read time is triggered by falling edge of anterior toggle.

	Parameter	Conditions	min	typ	max	Units
F <sub>SCK</sub>	SCK Frequency	VDD > 4.5V	0	0.1	5	MHz
		VDD < 4.5V	0	0.1	1	MHz
T <sub>SCKx</sub>	SCK hi/low time		100			ns
T <sub>R</sub> /T <sub>F</sub>	SCK rise/fall time		1	200	*	ns
T <sub>FO</sub>	DATA fall time	OL = 5pF	3.5	10	20	ns
		OL = 100pF	30	40	200	ns
T <sub>RO</sub>	DATA risetime		**	**	**	ns
T <sub>V</sub>	DATA valid time		200	250	***	ns
T <sub>SU</sub>	DATA setup time		100	150	***	ns

T <sub>HO</sub>	DATA hold time		10	15	****	ns
-----------------	----------------	--	----	----	------	----

\*  $T_{R\_max} + T_{F\_max} = (F_{SCK})^{-1} - T_{SCKH} - T_{SCKL}$

\*\* T<sub>RO</sub> is determined by the  $R_p * C_{bus}$  time-constant at DATA line

\*\*\* T<sub>V\\_max</sub> and T<sub>SU\\_max</sub> depend on external pull-up resistor ( $R_p$ ) and total bus line capacitance ( $C_{bus}$ ) at DATA line

\*\*\*\* T<sub>HO\\_max</sub> < T<sub>V</sub> - max (T<sub>RO</sub>, T<sub>FO</sub>)

**Table 3:** SHT7x I/O signal characteristics, OL stands for Output Load, entities are displayed in Figure 6.

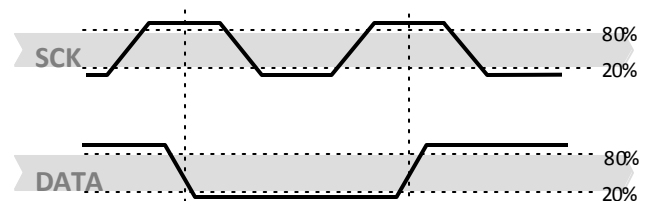
## 3 Communication with Sensor

### 3.1 Start up Sensor

As a first step the sensor is powered up to chosen supply voltage VDD. The slew rate during power up shall not fall below 1V/ms. After power-up the sensor needs 11ms to get to Sleep State. No commands must be sent before that time.

### 3.2 Sending a Command

To initiate a transmission, a Transmission Start sequence has to be issued. It consists of a lowering of the DATA line while SCK is high, followed by a low pulse on SCK and raising DATA again while SCK is still high – see Figure 7.



**Figure 7:** "Transmission Start" sequence

The subsequent command consists of three address bits (only '000' is supported) and five command bits. The SHT7x indicates the proper reception of a command by pulling the DATA pin low (ACK bit) after the falling edge of the 8th SCK clock. The DATA line is released (and goes high) after the falling edge of the 9th SCK clock.

Command	Code
Reserved	0000x
<b>Measure Temperature</b>	<b>00011</b>
<b>Measure Relative Humidity</b>	<b>00101</b>
Read Status Register	00111
Write Status Register	00110
Reserved	0101x-1110x
<b>Soft reset</b> , resets the interface, clears the status register to default values. Wait minimum 11 ms before next command	<b>11110</b>

**Table 4:** SHT7x list of commands

### 3.3 Measurement of RH and T

After issuing a measurement command ('00000101' for relative humidity, '00000011' for temperature) the controller has to wait for the measurement to complete. This takes a maximum of 20/80/320 ms for a 8/12/14bit measurement. The time varies with the speed of the internal oscillator and can be lower by up to 30%. To signal the completion of a measurement, the SHT7x pulls data line low and enters Idle Mode. The controller must wait for this Data Ready signal before restarting SCK to readout the data. Measurement data is stored until readout, therefore the controller can continue with other tasks and readout at its convenience.

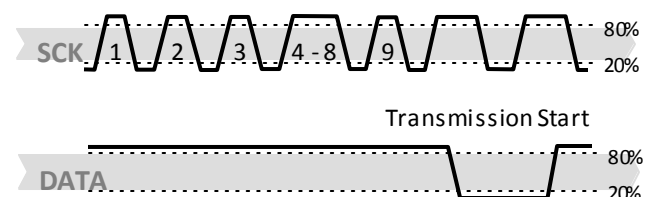
Two bytes of measurement data and one byte of CRC checksum (optional) will then be transmitted. The micro controller must acknowledge each byte by pulling the DATA line low. All values are MSB first, right justified (e.g. the 5<sup>th</sup> SCK is MSB for a 12bit value, for a 8bit result the first byte is not used).

Communication terminates after the acknowledge bit of the CRC data. If CRC-8 checksum is not used the controller may terminate the communication after the measurement data LSB by keeping ACK high. The device automatically returns to Sleep Mode after measurement and communication are completed.

Important: To keep self heating below 0.1°C, SHT7x should not be active for more than 10% of the time – e.g. maximum one measurement per second at 12bit accuracy shall be made.

### 3.4 Connection reset sequence

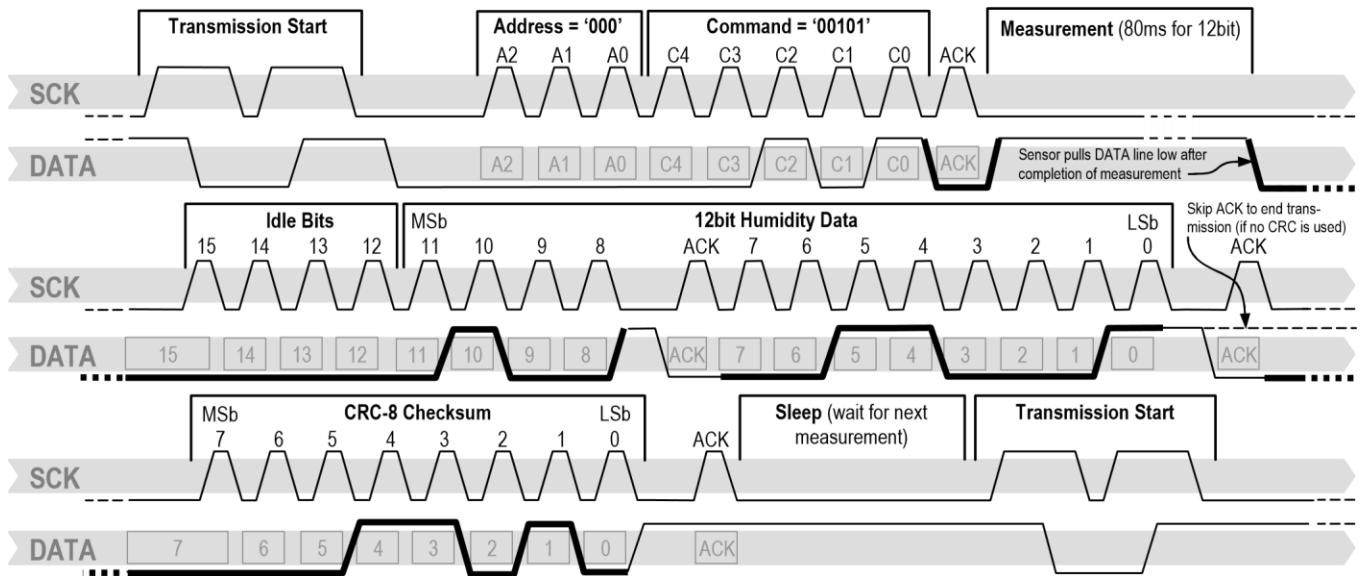
If communication with the device is lost the following signal sequence will reset the serial interface: While leaving DATA high, toggle SCK nine or more times – see Figure 8. This must be followed by a Transmission Start sequence preceding the next command. This sequence resets the interface only. The status register preserves its content.



**Figure 8:** Connection Reset Sequence







**Figure 12:** Example RH measurement sequence for value “0000’0100’0011’0001” = 1073 = 35.50%RH (without temperature compensation). DATA valid times are given and referenced in boxes on DATA line. Bold DATA lines are controlled by sensor while plain lines are controlled by the micro-controller.

**Table 5:** Status Register Bits

Bit	Type	Description	Default
7		reserved	0
6	R	End of Battery (low voltage detection) '0' for VDD > 2.47 '1' for VDD < 2.47	X No default value, bit is only updated after a measurement
5		reserved	0
4		reserved	0
3		For Testing only, do not use	0
2	R/W	Heater	0 off
1	R/W	no reload from OTP	0 reload
0	R/W	'1' = 8bit RH / 12bit Temp. resolution '0' = 12bit RH / 14bit Temp. resolution	0 12bit RH 14bit Temp.

**Measurement resolution:** The default measurement resolution of 14bit (temperature) and 12bit (humidity) can be reduced to 12 and 8bit. This is especially useful in high speed or extreme low power applications.

**End of Battery** function detects and notifies VDD voltages below 2.47V. Accuracy is  $\pm 0.05$  V.

**Heater:** An on chip heating element can be addressed by writing a command into status register. The heater may increase the temperature of the sensor by 5 – 10°C<sup>9</sup> beyond ambient temperature. The heater draws roughly 8mA @ 5V supply voltage.

<sup>9</sup> Corresponds to 9 – 18°F

For example the heater can be helpful for functionality analysis: Humidity and temperature readings before and after applying the heater are compared. Temperature shall increase while relative humidity decreases at the same time. Dew point shall remain the same.

Please note: The temperature reading will display the temperature of the heated sensor element and not ambient temperature. Furthermore, the sensor is not qualified for continuous application of the heater.

**OTP reload:** With this operation the calibration data is uploaded to the register before each measurement. This may be deactivated for reducing measurement time by about 10ms.

## 4 Conversion of Signal Output

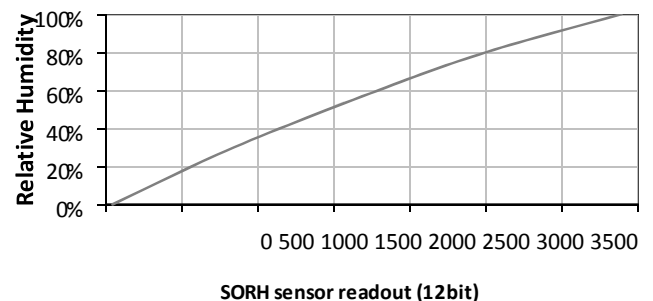
### 4.1 Relative Humidity

For compensating non-linearity of the humidity sensor – see Figure 13 – and for obtaining the full accuracy of the sensor it is recommended to convert the humidity readout ( $SO_{RH}$ ) with the following formula with coefficients given in Table 6:

$$RH_{linear} = C_1 + C_2 \cdot SO_{RH} + C_3 \cdot SO_{RH}^2 \text{ (%RH)}$$

$SO_{RH}$	$C_1$	$C_2$	$C_3$
12 bit	-2.0468	0.0367	-1.5955E-6
8 bit	-2.0468	0.5872	-4.0845E-4

**Table 6:** Humidity conversion coefficients  
Values higher than 99%RH indicate fully saturated air and must be processed and displayed as 100%RH<sup>10</sup>. Please note that the humidity sensor has no significant voltage dependency.



**Figure 13:** Conversion from  $SO_{RH}$  to relative humidity

### 4.2 Temperature compensation of Humidity Signal

For temperatures significantly different from 25°C (~77°F) the humidity signal requires temperature compensation. The temperature correction corresponds roughly to 0.12%RH/°C @ 50%RH. Coefficients for the temperature compensation are given in Table 8.

$$RH_{true} = (T^{\circ C} - 25) \cdot (t_1 + t_2 \cdot SO_{RH}) + RH_{linear}$$

$SO_{RH}$	$t_1$	$t_2$
12 bit	0.01	0.00008
8 bit	0.01	0.00128

**Table 7:** Temperature compensation coefficients

<sup>10</sup> If wetted excessively (strong condensation of water on sensor surface), sensor output signal can drop below 100%RH (even below 0%RH in some cases), but the sensor

will recover completely when water droplets evaporate. The sensor is not damaged by water immersion or condensation.

## 4.3 Temperature

The band-gap PTAT (Proportional To Absolute Temperature) temperature sensor is very linear by design. Use the following formula to convert digital readout ( $SO_T$ ) to temperature value, with coefficients given in Table 9:

$$T = d_1 + d_2 \cdot SO_T$$

VDD	d <sub>1</sub> (°C)	SO <sub>T</sub>	d <sub>2</sub> (°C)	d <sub>2</sub> (°F)
		14bit		
5V	-40.1	-40.2	0.01	0.018
		12bit		
4V	-39.8	-39.6	0.04	0.072
3.5V	-39.7	-39.5		
3V	-39.6	-39.3		
2.5V	-39.4	-38.9		

**Table 8:** Temperature conversion coefficients.

## 4.4 Dew Point

SHT7x is not measuring dew point directly, however dew point can be derived from humidity and temperature readings. Since humidity and temperature are both measured on the same monolithic chip, the SHT7x allows superb dew point measurements.

For dew point ( $T_d$ ) calculations there are various formulas to be applied, most of them quite complicated. For the temperature range of -40–50°C the following approximation provides good accuracy with parameters given in Table 10:

$$T_d = \frac{m \cdot \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + T_n}{m}$$

$$T_d = \frac{m \cdot \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + T_n}{m}$$

Temperature Range	T <sub>n</sub> (°C)	m
Above water, 0 – 50°C	243.12	17.62
Above ice, -40 – 0°C	272.62	22.46

**Table 9:** Parameters for dew point ( $T_d$ ) calculation.

Please note that “ln(...)” denotes the natural logarithm. For RH and T the linearized and compensated values for relative humidity and temperature shall be applied.

For more information on dew point calculation see Application Note “Introduction to Humidity”.

## 5 Environmental Stability

If sensors are qualified for assemblies or devices, please make sure that they experience same conditions as the reference sensor. It should be taken into account that response times in assemblies may be longer, hence enough dwell time for the measurement shall be granted. For detailed information please consult Application Note “Testing Guide”.

SHT7x have been tested according to the test conditions given in Table 11. Sensor performance under other test conditions cannot be guaranteed and is not part of the sensor specifications. Especially, no guarantee can be given for sensor

performance in the field or for customer’s specific application.

Please contact Sensirion for detailed information.

Environment	Standard	Results <sup>11</sup>
HTOL	125°C, 1000 h	Within specifications
TC	-40°C - 125°C, 500 cycles Acc. JESD22-A104-C	Within specifications
THU	85°C / 85%RH, 1000h	Within specifications
ESD immunity	MIL STD 883E, method 3015 (Human Body Model at ±2kV)	Qualified
Latch-up	force current of ±100mA with T <sub>amb</sub> = 80°C, acc. JEDEC 17	Qualified

**Table 10:** Qualification tests: HTSL = High Temperature Storage Lifetime, TC = Temperature Cycles, UHST = Unbiased Highly accelerated temperature and humidity Test, THU = Temperature humidity unbiased

## 6 Packaging

### 6.1 Packaging type

The device is supplied in a single-in-line pin type package. The sensor housing consists of a Liquid Crystal Polymer (LCP) cap with epoxy glob top on a standard 0.6 mm FR4 substrate. The sensor head is connected to the pins, by a small bridge to minimize heat conduction and response times. The pins are made of Cu/Be alloy coated with 1.3µm Ni and 0.5µm Au, which are soldered to the FR4 substrate

by lead-free solder paste. The gold plated back side of the sensor head is connected to the GND pin. A 100nF capacitor is mounted on the back side between VDD and GND. The device is fully RoHS and WEEE compliant – thus it is free of of Pb, Cd, Hg, Cr(6+), PBB and PBDE.

Size including pins is 19.5 x 5.08 x 3.1mm. Total weight: 168 mg, weight of sensor head: 73 mg.

All pins are Au plated to avoid corrosion. They can be soldered or mate with most 1.27 mm (0.05”) sockets, for example: Preci-dip / Mill-Max R851-83-004-20-001 or similar.

### 6.2 Traceability Information

All SHT7x are marked with an alphanumeric, three digit code on the chip cap – see “B2G” on Figure 1. The lot numbers allow full traceability through production, calibration and testing. No information can be derived from the code directly, respective data is stored at Sensirion.

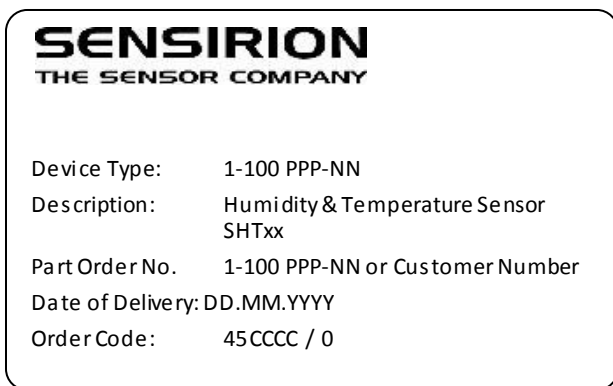
Labels on the reels are displayed in Figure 14 and Figure 15, they both give traceability information.



**Figure 14:** First label on reel: XX = Sensor Type (71 for SHT71), NN = Chip Version (04 for V4), Y = last digit of

<sup>11</sup> According to accuracy and long term drift specification given on Page 2.

year, RRR = number of sensors on reel divided by 10 (200 for 2000 units), TTTT = Traceability Code.



**Figure 15:** Second label on reel: For Device Type and Part Order Number please refer to Table 12, Delivery Date (also Date Code) is date of packaging of sensors (DD = day, MM = month, YYYY = year), CCCC = number of order.

### 6.3 Shipping Package

SHT7x are shipped in 32mm tape at 50pcs each – for details see Figure 16 and Table 12. Reels are individually labeled with barcode and human readable labels, see section 6.2.

Sensor Type	Packaging	Quantity	Order Number
SHT71	Tape Stripes	50	1-100092-04
SHT75	Tape Stripes	50	1-100071-04

**Table 11:** Packaging types per sensor type.

Dimensions of packaging tape are given in Figure 16. All tapes have a 7 pockets empty leader tape (first pockets of the tape) and a 7 pockets empty trailer tape (last pockets of the tape).

## Annex D: L'IGBT

International  
**IR** Rectifier

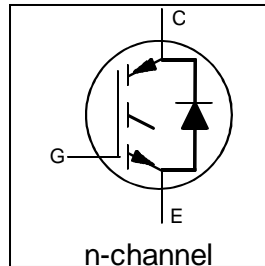
PD- 91788

# IRG4PF50WD

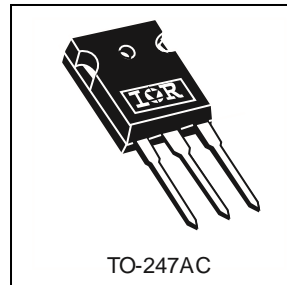
INSULATED GATE BIPOLAR  
TRANSISTOR WITH ULTRAFAST SOFT RECOVERY  
DIODE

### Features

- Optimized for use in Welding and Switch-Mode Power Supply applications
  - Industry benchmark switching losses improve efficiency of all power supply topologies
  - 50% reduction of Eoff parameter
  - Low IGBT conduction losses
  - Latest technology IGBT design offers tighter parameter distribution coupled with exceptional reliability
  - IGBT co-packaged with HEXFRED™ ultrafast, ultra-soft-recovery anti-parallel diodes for use in bridge configurations
  - Industry standard TO-247AC package
- ### Benefits
- Lower switching losses allow more cost-effective operation and hence efficient replacement of larger-die MOSFETs up to 100kHz
  - HEXFRED™ diodes optimized for performance with IGBTs. Minimized recovery characteristics reduce noise, EMI and switching losses



$V_{CES} = 900V$
$V_{CE(on)} \text{ typ.} = 2.25V$
@ $V_{GE} = 15V, I_c = 28A$



### Thermal Resistance

### Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$V_{CES}$	Collector-to-Emitter Breakdown Voltage	900	V
$I_c @ T_c = 25^\circ C$	Continuous Collector Current	51	A

# Annexes

$I_C @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Collector Current	28	
$I_{CM}$	Pulsed Collector Current $\square$	204	
$I_{LM}$	Clamped Inductive Load Current ,	204	
$I_F @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Diode Continuous Forward Current	16	
$I_{FM}$	Diode Maximum Forward Current	204	
$V_{GE}$	Gate-to-Emitter Voltage	$\pm 20$	V
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Maximum Power Dissipation	200	W
$P_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Maximum Power Dissipation	78	
$T_J$ $T_{STG}$	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +150	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (0.063 in. (1.6mm) from case )	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw.	10 lbf•in (1.1N•m)	

## Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case – IGBT	—	—	0.64	°C/W	
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case – Diode	—	—	0.83		
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, flat, greased surface	—	0.24	—		
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient, typical socket mount	—	—	40		
$W_t$	Weight	—	6 (0.21)	—	g (oz)	
	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
$V_{(BR)CES}$	Collector-to-Emitter Breakdown Voltage	900	—	—	V	$V_{GE} = 0V, I_C = 250\mu A$
$\Delta V_{(BR)CES}/\Delta T_J$	Temperature Coeff. of Breakdown Voltage	—	0.295	—	V/°C	$V_{GE} = 0V, I_C = 3.5mA$

# Annexes

V <sub>CE(on)</sub>	Collector-to-Emitter Saturation Voltage	—	2.25	2.7	V	l <sub>c</sub> = 28A	V <sub>GE</sub> = 15V
		—	2.74	—		l <sub>c</sub> = 60A	See Fig. 2, 5
		—	2.12	—		l <sub>c</sub> = 28A, T <sub>J</sub> = 150°C	
V <sub>GE(th)</sub>	Gate Threshold Voltage	3.0	—	6.0		V <sub>CE</sub> = V <sub>GE</sub> , l <sub>c</sub> = 250μA	
ΔV <sub>GE(th)</sub> /ΔT <sub>J</sub>	Temperature Coeff. of Threshold Voltage	—	-13	—	mV/°C	V <sub>CE</sub> = V <sub>GE</sub> , l <sub>c</sub> = 250μA	
g <sub>fe</sub>	Forward Transconductance $\bar{g}$	26	39	—	S	V <sub>CE</sub> = 50V, l <sub>c</sub> = 28A	
I <sub>CES</sub>	Zero Gate Voltage Collector Current	—	—	500	μA	V <sub>GE</sub> = 0V, V <sub>CE</sub> = 900V	
		—	—	2.0		V <sub>GE</sub> = 0V, V <sub>CE</sub> = 10V, T <sub>J</sub> = 25°C	
		—	—	6.5	mA	V <sub>GE</sub> = 0V, V <sub>CE</sub> = 900V, T <sub>J</sub> = 150°C	
V <sub>FM</sub>	Diode Forward Voltage Drop	—	2.5	3.5	V	l <sub>c</sub> = 16A	See Fig. 13
		—	2.1	3.0		l <sub>c</sub> = 16A, T <sub>J</sub> = 150°C	
I <sub>GES</sub>	Gate-to-Emitter Leakage Current	—	—	±100	nA	V <sub>GE</sub> = ±20V	

## Switching Characteristics @ T<sub>J</sub> = 25°C (unless otherwise specified)

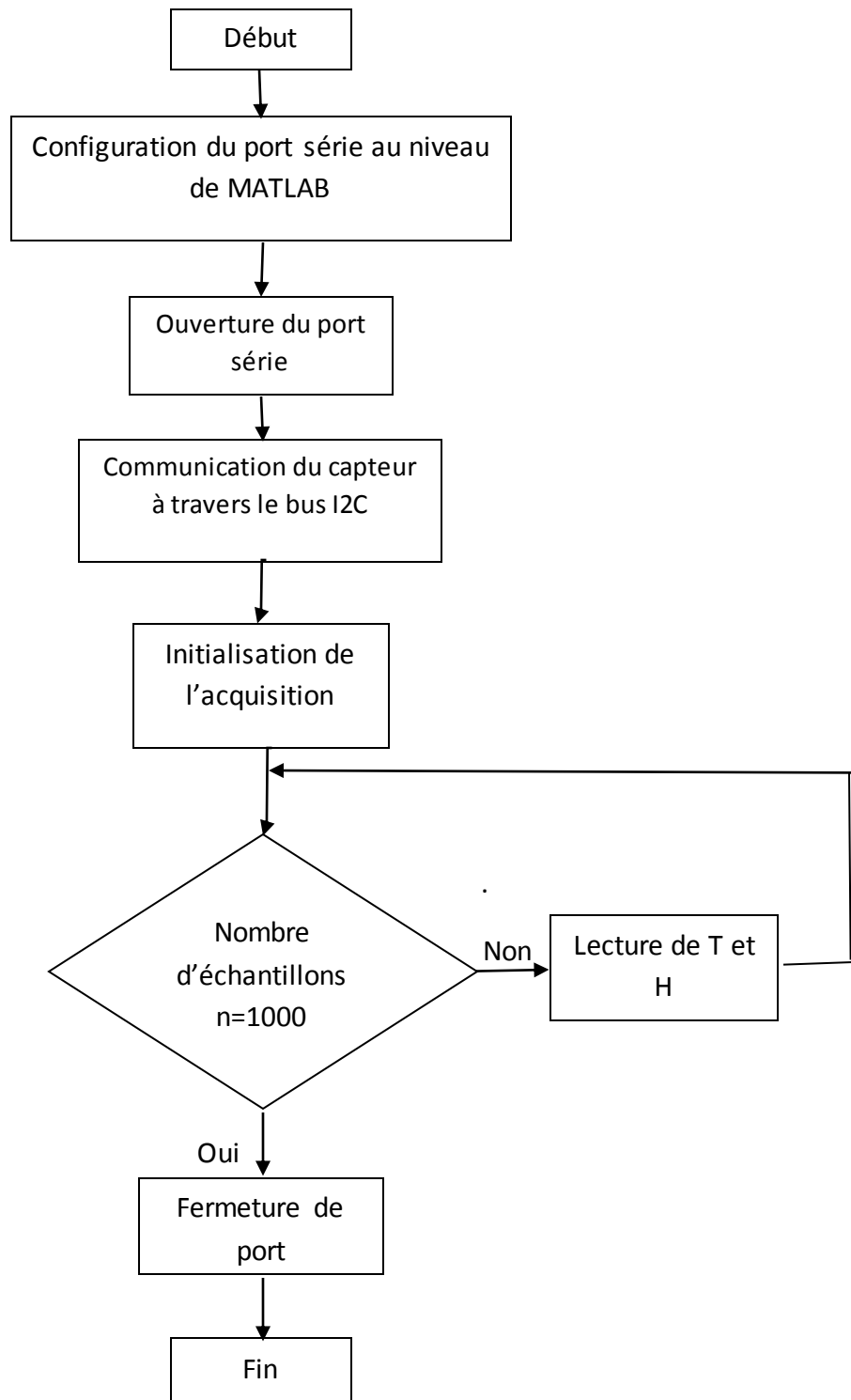
	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
Q <sub>g</sub>	Total Gate Charge (turn-on)	—	160	240	nC	l <sub>c</sub> = 28A V <sub>CC</sub> = 400V V <sub>GE</sub> = 15V See Fig. 8
Q <sub>ge</sub>	Gate - Emitter Charge (turn-on)	—	19	29		
Q <sub>gc</sub>	Gate - Collector Charge (turn-on)	—	53	80		
t <sub>d(on)</sub>	Turn-On Delay Time	—	71	—	ns	T <sub>J</sub> = 25°C l <sub>c</sub> = 28A, V <sub>CC</sub> = 720V V <sub>GE</sub> = 15V, R <sub>G</sub> = 5.0Ω Energy losses include "tail" and diode reverse recovery. See Fig. 9, 10, 18
t <sub>r</sub>	Rise Time	—	50	—		
t <sub>d(off)</sub>	Turn-Off Delay Time	—	150	220		
t <sub>f</sub>	Fall Time	—	110	170		
E <sub>on</sub>	Turn-On Switching Loss	—	2.63	—		



# Annexes

$E_{off}$	Turn-Off Sw itching Loss	—	1.34	—			
$E_{is}$	Total Sw itching Loss	—	3.97	5.3			
$t_{d(on)}$	Turn-On Delay Time	—	69	—	ns	$T_J = 150^\circ\text{C}$ , See Fig. 11, 18 $I_C = 28\text{A}$ , $V_{CC} = 720\text{V}$ $V_{GE} = 15\text{V}$ , $R_G = 5.0\Omega$ Energy losses include "tail" and diode reverse recovery.	
$t_r$	Rise Time	—	52	—			
$t_{d(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	270	—			
$t_f$	Fall Time	—	190	—			
$E_{is}$	Total Sw itching Loss	—	6.0	—	mJ		
$L_E$	Internal Emitter Inductance	—	13	—	nH	Measured 5mm from package	
$C_{ies}$	Input Capacitance	—	3300	—	pF	$V_{GE} = 0\text{V}$ $V_{CC} = 30\text{V}$ $f = 1.0\text{MHz}$	See Fig. 7
$C_{oes}$	Output Capacitance	—	200	—			
$C_{res}$	Reverse Transfer Capacitance	—	45	—			
$t_{rr}$	Diode Reverse Recovery Time	—	90	135	ns	$T_J = 25^\circ\text{C}$ See Fig. 14 $T_J = 125^\circ\text{C}$	$I_F = 16\text{A}$ $V_R = 200\text{V}$
		—	164	245			
$I_{rr}$	Diode Peak Reverse Recovery Current	—	5.8	10	A	$T_J = 25^\circ\text{C}$ See Fig. 15 $T_J = 125^\circ\text{C}$	$di/dt = 200\text{A}/\mu\text{s}$
		—	8.3	15			
$Q_{rr}$	Diode Reverse Recovery Charge	—	260	675	nC	$T_J = 25^\circ\text{C}$ See Fig. 16 $T_J = 125^\circ\text{C}$	
		—	680	1838			
$di_{(rec)M}/dt$	Diode Peak Rate of Fall of Recovery During $t_b$	—	120	—	A/ $\mu\text{s}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$ See Fig. 17 $T_J = 125^\circ\text{C}$	
		—	76	—			

## Annexe E: L'organigramme de l'acquisition des E/S



**Annexe F: L'organigramme de la manipulation sur le système**

