

Année Universitaire 2009/2010



Polytechnique,
Premier Partenaire
des Professionnels

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
D'ANTANANARIVO



DEPARTEMENT ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR

Spécialité : ELECTRONIQUE

Option : Electronique/Automatique

CONCEPTION D'UN SYSTEME DE DOSAGE DE PRODUITS CHIMIQUES ASSISTE PAR ORDINATEUR

Présenté par:

RATIANARIVO Paul Ezekel

N° d'ordre : 12/EN/EA/2010

Date de soutenance : 20 Juin 2011

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ANTANANARIVO

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE

MEMOIRES DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR

Spécialité : ELECTRONIQUE

Option : Electronique Automatique

CONCEPTION D'UN SYSTEME DE DOSAGE DE PRODUITS CHIMIQUES ASSISTE PAR ORDINATEUR

Présenté par : RATIANARIVO Paul Ezekel

Le 20 juin 2011

Devant le jury :

Madame RABEHERIMANANA Lyliane Irène, *Présidente*

Monsieur ANDRIAMANANTSOA Guy Danielson, *Examinateur*

Monsieur RAKOTOSAONA Rija Lalaina, *Examinateur*

Monsieur RANDRIAMAROSON Rivo Mahandrisoa, *Examinateur*

Rapporteur

Monsieur RASTEFANO Elisée,

“Si l’Eternel ne bâtit la maison, ceux qui la bâtiennent travaillent en vain”

Psaume 127, 1

REMERCIEMENTS

Je manifeste mes profondes reconnaissances à Dieu Tout puissant pour toute sa bonté et sa générosité, m'ayant permis de garder force et santé tout au long du parcours dans la préparation de ce mémoire.

La réalisation de ce travail a été possible grâce au concours de nombreuses personnes. Je ne saurai constituer une liste exhaustive de toutes ces personnes, cependant mes premiers remerciements iront tout de même :

A Monsieur RATSIMBA Mamy Nirina, notre Chef de Département Electronique, qui a pris en charge notre promotion durant la dernière année de parcours étudiantin.

A Monsieur RASTEFANO Elisée, Ancien Chef de Département et Rapporteur de ce mémoire, pour son encadrement, ses conseils fort judicieux et pour ses éducations pour transformer des jeunes en des ingénieurs adultes responsables au service de la Nation.

A Madame et Messieurs les membres du jury pour avoir pris soin d'examiner et d'évaluer notre travail malgré leurs obligations :

Madame RABEHERIMANANA Lyliane Irène, Présidente du jury de ce mémoire,

Monsieur ANDRIAMANANTSOA Guy Danielson,

Monsieur RAKOTOSAONA Rija Lalaina,

Monsieur RANDRIAMAROSON Rivo Mahandrisoa,

A tous nos Professeurs de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, qui m'ont transmis leurs savoirs.

Au Département Génie Chimique, qui m'a soutenu techniquement et matériellement pendant la réalisation de cet ouvrage.

A tout le Personnel Administratif et Technique de l'ESPA, en particulier celui du Département Electronique.

A ma famille, pour tout le soutien, l'aide et l'affection qu'elles m'ont prodigués tout au long de mes études et recherches.

A mes amis, qui m'ont apporté leurs aides et leurs conseils.

Kekel

RESUME

Un système de dosage acide-base programmable a été réalisé à l'issue ce travail. On peut mesurer et afficher le pH et la température de la solution à caractériser à chaque instant, grâce à une électrode (plongé dans la solution) et un capteur de température.

Les commandes pour actionner les moteurs pas à pas pour le contrôle de la quantité de réactif à introduire dans la solution se font par l'envoie des signaux numériques générés par le *PC* et transitant via un port parallèle, dirigée vers le circuit de commande.

Les doseuses sont de simples seringues actionnées par les moteurs pas à pas. Les signaux pour les affichages à l'écran du *PC*, grâce à une interface utilisateur conçu, suivent le chemin inverse : capteur, CAN, et port parallèle. Deux ports parallèles sont nécessaires dans ce projet.

DoAO : « Dosage Assisté par Ordinateur », est le logiciel pilote qu'on a conçu et développé dans l'environnement C++.

TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i
RESUME	ii
TABLES DES MATIERES	iii
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES ABREVIATIONS	ix
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1. GENERALITES SUR LES MESURES DE PH ET DE TEMPERATURE.....	2
I. Le « Potentiel d'Hydrogène »	2
1. Introduction.....	2
2. Définition	2
3. Activités et concentrations.....	2
4. Echelle de pH et température	3
5. La mesure du pH.....	3
6. Le pH-mètre	4
6.1) Description	4
6.2) Principe d'un pH-mètre numérique	4
6.3) Spécifications d'un pH-mètre	6
7. Les électrodes de mesure.....	6
7.1) L'électrode de verre	6
7.2) L'électrode de référence	7
7.3) L'électrode combinée	9
8. Les solutions étalons ou solutions tampons.....	9
II. La mesure de la température	10
1. Généralités sur la chaleur et la température	10
1.1) La chaleur	10
1.2) La température.....	11
2. Capteur de température	11
2.1) Généralités	11
2.2) Les capteurs de température	12
a) Thermomètre à thermocouple.....	12
b) Capteur de température à résistances métalliques	15
c) Thermistance.....	15
d) Capteurs électroniques	16
e) Capteurs de température à rayonnement infrarouge	17
2.3) Domaine d'utilisation des capteurs de température	17
CHAPITRE 2. ETUDE DES PARTIES DU SYSTEME A CONCEVOIR.....	19
I. Introduction.....	19
II. Conception du système	19
1. pH-mètre et capteur de température	19
1.1) Rappel sur le pH-mètre	19

1.2) Rappel sur le capteur de température	20
2. Numérisation	20
2.1) Introduction.....	20
2.2) Les enjeux du CAN	21
2.3) Les Caractéristiques du CAN.....	22
a) Le temps de conversion.....	22
b) La plage de conversion.....	22
c) La résolution	22
2.4) Les défauts du CAN.....	23
2.5) Les différentes structures de CAN.....	24
a) Les convertisseurs à intégration.....	24
b) Le convertisseur à approximations successives	27
3. Interfaçage avec le PC	27
3.1) Généralité sur le port parallèle	27
3.2) Les types de liaison parallèle ou protocole de communication	28
a) Mode SPP (Standard Parallel Port).....	28
b) Mode 4 bits ou Nibble Mode.....	29
c) Byte Mode (enhanced bi-directional)	29
d) Mode EPP (port parallèle amélioré)	29
e) Mode ECP	29
3.3) Brochage du port parallèle	30
3.4) Registres de commande	30
3.5) Utilisation du port entrée/sortie parallèle	31
3.6) Sécurité du PC.....	31
4. Doseur	32
4.1) Seringue.....	32
4.2) Le moteur pas à pas.....	33
a) Généralités	33
b) Les différents types de moteurs.....	34
5. Circuit de commande	38
5.1) Commande par BJT (Bipolar Jonction Transistor)	38
5.2) Commande d'un moteur par l'utilisation des circuits intégrés.....	40
6. Le logiciel de commande « DoAO » ou « Dosage Assisté par Ordinateur ».....	40
6.1) Le langage C++.....	41
a) Généralité.....	41
b) Les avantages du langage C++	41
6.2) La MFC	41
6.3) Le Logiciel « DoAO »	42
a) Les principes fondamentaux	42
b) Algorithme de calcul général.....	43
c) Calcul du pH.....	43
d) Calcul de la température	45
e) Algorithme de commande du moteur.....	46
f) Relation entre les broches du port parallèle avec le contrôle du logiciel	48

g)	Les adresses des registres nécessaires à ces commandes	50
h)	L'interface du logiciel « DoAO»	50
i)	Caractéristiques du logiciel « DoAO »	51
	CONCLUSION	52
	ANNEXE A. L'étalonnage (calibrage) de la chaîne de mesure en pH-métrie	53
	ANNEXE B. L'échantillonneur-Bloqueur (Sample and Hold System) ou Circuit d'échantillonnage et de mémorisation	56
	ANNEXE C. les différents principes de fonctionnement des CAN.....	58
	REFERENCES	62

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1-1 Indicateur coloré</i>	3
<i>Figure 1-2 Schéma d'un pH-mètre muni d'une sonde de température</i>	4
<i>Figure 1-3 Schéma synoptique d'un pH-mètre numérique</i>	5
<i>Figure 1-4 Electrode de verre</i>	7
<i>Figure 1-5 Structure d'une Electrode au Calomel Saturée</i>	7
<i>Figure 1-6 Constitution d'une électrode de référence au calomel (Hg/Hg₂Cl₂)</i>	8
<i>Figure 1-7 Electrode combinée, (a) Vue d'ensemble, (b) Zoom</i>	9
<i>Figure 1-8 Principe général d'un capteur</i>	11
<i>Figure 1-9 Schéma simplifié permettant d'expliquer le fonctionnement d'un thermocouple</i>	12
<i>Figure 1-10 Principe de l'Effet Thompson</i>	13
<i>Figure 1-11 Principe d'Effet Peltier</i>	13
<i>Figure 1-12 Symbole d'un capteur à thermocouple</i>	14
<i>Figure 1-13 Symboles des thermistances</i>	15
<i>Figure 1-14 Montage utilisant la Diode comme capteur de température</i>	16
<i>Figure 1-15 Montage utilisant un BJT comme capteur de température</i>	17
<i>Figure 2-1 Schéma bloc de système à concevoir</i>	19
<i>Figure 2-2 Organisation générale de la fonction conversion</i>	20
<i>Figure 2-3 Schéma bloc d'un CAN à N bits</i>	21
<i>Figure 2-4 Caractéristique de transfert d'un CAN 3 bits</i>	22
<i>Figure 2-5 Schéma simulant l'effet d'erreur de quantification</i>	23
<i>Figure 2-6 Comparaison des RSB de quantification théorique et calculé</i>	24
<i>Figure 2-7 (a) Principe du convertisseur simple rampe (b) chronogramme du convertisseur simple rampe</i>	25
<i>Figure 2-8 Principe du convertisseur à simple rampe numérique</i>	26
<i>Figure 2-9 : Architecture du convertisseur double rampe</i>	26
<i>Figure 2-10 Schéma des phases du convertisseur double rampe</i>	26
<i>Figure 2-11 Prise DB25, (a) male ; (b) femelle</i>	28
<i>Figure 2-12 Protection du PC en utilisant le CI 74LS571</i>	32
<i>Figure 2-13 Principe de la pompe doseuse</i>	32
<i>Figure 2-14 Vue d'ensemble d'un moteur pas à pas</i>	33
<i>Figure 2-15 Schéma simplifié d'un moteur à aimant</i>	34
<i>Figure 2-16 Fonctionnement schématique d'un moteur pas à pas</i>	34
<i>Figure 2-17 (a) : Représentation schématique d'un moteur unipolaire (b) : Séquence de rotation simple</i>	35
<i>Figure 2-18 Représentation schématique d'un moteur bipolaire</i>	36
<i>Figure 2-19 Moteurs à reluctance variable</i>	37
<i>Figure 2-20 Principe interne d'un moteur hybride</i>	38
<i>Figure 2-21 Commande d'un moteur unipolaire par transistors</i>	39
<i>Figure 2-22 Commande des moteurs pas à pas, (a) moteurs unipolaire (b) moteurs bipolaire</i>	39
<i>Figure 2-23 Commande de moteur bipolaire avec alimentation symétrique</i>	40
<i>Figure 2-24 Commande d'un moteur bipolaire avec alimentation simple</i>	40

<i>Figure 2-25 Relation entre logiciel et port parallèle</i>	42
<i>Figure 2-26 Variation du type de variable</i>	42
<i>Figure 2-27 Organigramme du fonctionnement du logiciel</i>	43
<i>Figure 2-28 Algorithme de calcul du Ph</i>	44
<i>Figure 2-29 Organigramme du calcul de la température</i>	45
<i>Figure 2-30 Algorithme de contrôle pour faire avancer le moteur</i>	47
<i>Figure 2-31 Algorithme de remise à position initiale du moteur</i>	47
<i>Figure 2-32 Interface utilisateur du logiciel « DoAO »</i>	51

LISTE DES TABLEAUX

<i>Table 1 -Potentiel V de l'électrode au calomel non saturée par rapport à l'électrode à hydrogène, en fonction de la concentration en KCl à 25 °C</i>	8
<i>Table 2 -Potentiel Vs de l'électrode au calomel saturée, par rapport à l'électrode à hydrogène, en fonction de la température.....</i>	8
<i>Table 3 - Potentiel de jonction liquide en fonction de quelques solutions tampons</i>	10
<i>Table 4 - Constantes spécifiques avec leur composition relative aux solutions étalons</i>	10
<i>Table 5 - Echelle de température.....</i>	11
<i>Table 6 - Tableau représentatif des différents types de thermocouple selon les matériaux utilisés....</i>	14
<i>Table 7 - Tableau représentant le domaine d'utilisation et la sensibilité selon différents capteurs</i>	14
<i>Table 8 - Variation de la résistance électrique d'un conducteur avec la température.....</i>	15
<i>Table 9 - Représentation des différents brochages du port parallèle</i>	30
<i>Table 10 - Correspondance entre broches et registres de donnée</i>	30
<i>Table 11 - Correspondance entre broches et registres d'état</i>	31
<i>Table 12 - Correspondance entre broches et registres de contrôle</i>	31
<i>Table 13 - Adresse de chaque registre pour commander le port parallèle.....</i>	31
<i>Table 14 - Ordre des différentes commandes des moteurs unipolaires suivant le mode monophasé, biphasé et demi-pas</i>	35
<i>Table 15 - Ordre des différentes commandes des moteurs bipolaires suivant le mode monophasé, biphasé et demi-pas</i>	36
<i>Table 16 - Ordre des différentes commandes des moteurs à reluctance variable suivant le mode monophasé, biphasé et demi-pas.....</i>	37
<i>Table 17 - Comparaison de performance des trois types de moteurs pas à pas</i>	38
<i>Table 18 - La commande du CAN, du thermomètre, et du pH-mètre avec les valeurs entrantes du registre de contrôle</i>	49
<i>Table 19 - La commande du CAN, du thermomètre, et pH-mètre avec les valeurs sortantes du registre de contrôle.....</i>	49
<i>Table 20 - Commandes du moteur B qui verse la substance basique</i>	49
<i>Table 21 - Commandes de remise à la position initiale du moteur qui verse la substance basique</i>	50
<i>Table 22 - Commandes du moteur qui verse la substance acide.....</i>	50
<i>Table 23 - Adresse du registre utilisé.....</i>	50

LISTE DES ABREVIATIONS

3D	Trois dimension
API	Application Programming Interface
BIOS	Basic Input Output System
BJT	Bipolar Jonction Transistor
CAN	Convertisseur Analogique Numérique
CC	Conversion Complete
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CNA	Convertisseur Numérique Analogique
CTN	Coefficient de Température Négatif
CTP	Coefficient de Température Positif
DB25	DATA BUS 25
DDP	Différence De Potentiel
DLL	Dynamic Link Library
DMA	Direct Memory Access
DoAO	Dosage Assisté par Ordinateur
ECP	Extended Capability Port
ECS	Electrode au Calomel Saturée
EPP	Enhanced Parallel Port
FET	Field Effect Transistor
FIFO	First In First Out
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineer
KCl	Chlorure de potassium
LPT	Line Printer Terminal ou Line PrinTer
LSB	Last Significant Bit
MFC	Microsoft Foundation Class
MOS	Metal Oxide Semiconductor
MSB	Most Significant Bit
nJFET	Jonction Field Effect Transistor
PC	Personal Computer
pH	Potentiel Hydrogène
RSB	Rapport Signal Bruit
SAR	Successive Approximation Register
SHS	Sample and Hold System
SPP	Standard Parallel Port
TTL	Transistor Transistor Logic

INTRODUCTION

De nos jours, l'évolution de la technologie est devenue incontournable. Presque tous les domaines sont concernés. C'est l'un des piliers du développement de la société et surtout de l'économie. L'un des éléments de base de cette croissance est l'électronique, qui, à partir des années 50 du 20^{ème} siècle, a su répondre aux besoins de l'homme pour s'épanouir et faciliter les productions en grande quantité dans nombreux secteurs comme l'industrie et les recherches scientifiques. Sur ce point de vue, le domaine de la chimie a pu profiter des avantages de la technologie par l'intermédiaire de l'électronique, un des disciplines auquel l'Ecole Supérieur Polytechnique d'Antananarivo enseigne. L'utilisation des machines dans le concept « Assisté par ordinateur » a porté dans les laboratoires de chimie des transformations exponentielles.

C'est pour entretenir cette évolution qu'on a travaillé sur ce mémoire intitulé : « Conception d'un système de dosage de produits chimiques assisté par ordinateur ». Son but est d'élaborer un pH-mètre numérique dont l'utilisation est assistée par *PC*.

Ce mémoire est organisé de la manière qui suit :

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les mesures de ph et de température, l'étude des parties du système à réaliser est présentée au deuxième chapitre.

CHAPITRE 1. GENERALITES SUR LES MESURES DE PH ET DE TEMPERATURE

I. Le « Potentiel d'Hydrogène »

1. Introduction

Dans les laboratoires d'analyse, la mesure du *pH* (*Potentiel Hydrogène*) est une des plus courantes. Elle est souvent répétée et parfois en série importantes. Cependant, cette routine ne doit pas faire oublier que la mesure du pH met en jeu des phénomènes complexes, qu'elle dépend de nombreux paramètres qu'il est parfois difficile à maîtriser, et qu'en définitive cette mesure n'est pas aussi simple qu'il est possible de le penser.

La réalisation de mesure du pH fiables et d'un bon niveau d'exactitude dépend en tout premier lieu de la qualité de la chaîne de mesure utilisée, de son entretien et sa maintenance, ainsi que du respect des bonnes pratiques de laboratoire par l'utilisateur.

2. Définition

Le *pH* est un paramètre qui sert à définir si un milieu est acide ou basique. La valeur du *pH* s'exprime sur une échelle graduée de 0 à 14 où la valeur 1 désigne une substance fortement acide, 7 une substance neutre (ni acide ni basique comme l'eau pure à 25°C), et 14, une substance fortement basique. Ainsi, les substances ayant un *pH* inférieur à 7 sont acides tandis que les substances ayant un *pH* supérieur à 7 sont basiques.

Cependant, la plupart des réactions chimiques et biochimiques sont régies par l'activité de l'ion hydrogène plutôt que par sa concentration. Cette définition fut modifiée pour donner la relation actuellement utilisée:

$$pH = -\log 10 [OH^+]$$

3. Activités et concentrations

Le pH résulte de l'activité électrochimique de l'ion hydrogène et non de sa concentration, car seuls les ions électro chimiquement actifs participent réellement à l'acidité [1].

Deux phénomènes interviennent :

Les électrolytes faibles ont une réaction de dissociation réversible, qui aboutit à un équilibre, et seule une fraction de l'acide mis en solution aboutit à la formation d'ions hydrogène.

Pour les électrolytes forts, la dissociation, et donc la formation d'ions hydrogène est totale, mais les ions formés ne sont réellement indépendants que dans une solution de dilution infinie. Lorsque la concentration augmente, les interactions entre les ions ne sont plus négligeables, et l'effet réel est inférieur à ce que l'on pourrait en attendre. Par exemple 0,1 mole d'acide chlorhydrique

dilué dans un litre d'eau déminéralisée ne donnera pas une valeur de pH de 1,0 comme on pourrait le prévoir par calcul mais une valeur de pH de 1,1.

On traduit ces deux phénomènes par l'expression suivante, valable pour tous les ions :

$$a = g \cdot c$$

Où a est l'activité des ions H^+ ; g le coefficient d'activité (nombre compris entre 0 et 1) et c la concentration des ions H^+ .

Le coefficient d'activité dépend, non seulement de la concentration des ions hydrogène, mais également des autres ions présents en solution, c'est-à-dire de la force ionique globale de la solution.

4. Echelle de pH et température

L'échelle du pH dans l'eau se définit à partir de l'équilibre de dissociation ionique de l'eau, donc du produit ionique de l'eau qui est de $1,008 \cdot 10^{-14}$ à 25°C , d'où les valeurs extrêmes 0 à 14 du pH. Mais il est important de noter que cet équilibre de dissociation se déplace lorsque la température varie : le produit ionique de l'eau est de $9,614 \cdot 10^{-14}$ à 60°C , donc l'échelle de pH se rétrécit lorsque la température augmente. Et la neutralité à 60°C n'est plus à pH 7,00 mais à pH 6,51.

5. La mesure du pH

Il existe de nombreuses façons de mesurer le pH d'une solution aqueuse.

Indicateur de pH ou Indicateur acide-base :

Ce sont des substances qui changent de couleur, selon l'acidité du milieu environnant. Une échelle de couleur est illustrée à la Fig. 1.1, [3].

Le mélange de plusieurs indicateurs colorés permet d'obtenir un indicateur universel. Le papier pH, très utilisé pour mesurer l'acidité, est un papier imbibé d'un indicateur universel. C'est une méthode encore très utilisée en raison de sa simplicité et de son faible coût. Ses principaux inconvénients sont : l'inexactitude de mesure, à cause de la largeur de la zone du virage de l'indicateur coloré, la subjectivité d'appréciation des couleurs par l'utilisateur, ainsi que sa difficulté d'utilisation dans les milieux troubles ou colorés, et l'impossibilité de son automatisation.



Figure 1-1 Indicateur coloré [3]

Le plus universellement employé pour la mesure du *pH* reste la méthode de mesure potentiométrique grâce à une électrode de verre, on l'appelle aussi « pH-mètre » (millivoltmètre à haute impédance d'entrée). Il est généralement constitué d'un boîtier électronique permettant l'affichage de la valeur numérique du pH et d'une sonde de *pH* constitué d'électrode permettant la mesure.

Comme l'indique la *Fig. 1.2*, cette méthode utilise une chaîne de mesure composée : d'une électrode combinée ou d'une électrode de verre associée à une électrode de référence, d'une sonde de température, de solutions étalon de valeurs connus, aussi appelées « solutions tampons ».

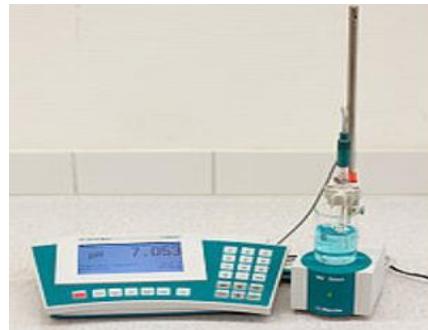


Figure 1-2 Schéma d'un pH-mètre muni d'une sonde de température [4]

6. Le pH-mètre

6.1) Description

Un pH-mètre est constitué d'une sonde de mesure reliée à un voltmètre électronique gradué en unité de *pH*. La sonde de mesure est constituée d'une électrode de verre et d'une électrode de référence. Ces deux électrodes peuvent être séparées ou combinées.

La différence de potentiel *V* qui apparaît aux bornes de la sonde est donnée par:

$$V = \Delta E = a(pH_a - pH_b) + b$$

Où ΔE est la différence de potentiel entre les deux électrodes ; pH_a est le *pH* de la solution à mesurer, pH_b le *pH* de la solution de référence ; et a et b sont des coefficients positifs qui dépendent de la température et de la nature des deux électrodes. L'étalonnage du ph mètre est donc nécessaire avant toute mesure.

L'étalonnage du pH-mètre est nécessaire avant toute mesure (*ANNEXE A*). Le pH-mètre peut être analogique ou numérique.

6.2) Principe d'un pH-mètre numérique

En pH-métrie, on doit mesurer avec précision une *ddp* (*Difference De Potentiel*) inférieure à 1 *V* entre un couple d'électrode, dans un circuit dont la résistance est de l'ordre de 100 MΩ, puis de transformer cette tension en unité *pH*, en prenant en compte un certain nombre de corrections.

La différence de potentiel entre l'électrode de verre et l'électrode de référence est amplifiée avant d'être transmise numériquement au microprocesseur par le convertisseur analogique numérique pour y être traitée par un algorithme de calcul et être enfin affichée par le pH-mètre. La chaîne de mesure est décrite à la Fig. 1.3.

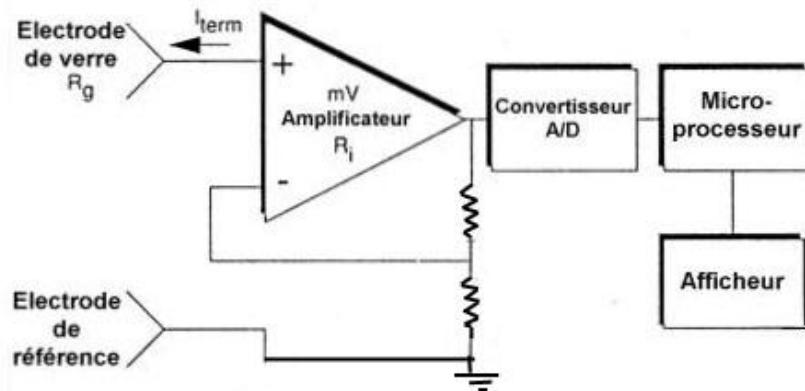


Figure 1-3 Schéma synoptique d'un pH-mètre numérique

Comme une électrode de verre a une résistance interne R_g de l'ordre de $10^8 \Omega$, la résistance d'entrée de l'amplificateur, R_i , doit être supérieure à $10^{12} \Omega$ pour effectuer une mesure correcte. Pour la même raison, l'intensité I_{term} envoyée par l'amplificateur à l'électrode de verre ne doit pas dépasser $10^{-12} A$, car cela influerait sur le potentiel mesuré et risquerait de perturber l'électrode. Et comme la résistance d'entrée, R_i , est très largement supérieure à la résistance interne de l'électrode de verre, R_g , l'erreur introduite sur le potentiel mesuré peut être calculée suivant l'équation :

$$V_{erreur} = I_{term} \times R_g = 10^{-12} \times 10^8 = 10^{-4} V = 0,1 mV.$$

Pour obtenir des résultats fiables, l'amplificateur et les autres circuits électroniques doivent avoir un coefficient de température faible, c'est à dire que l'influence de leur variation de température doit être maîtrisée. Le choix des composants utilisés et leur tri pour la fabrication doit être donc très rigoureux.

Généralement le résultat de mesure est lu sur un afficheur numérique même s'il existe encore dans les laboratoires des pH-mètres à affichage analogique, c'est à dire avec une lecture par galvanomètre. Les termes analogique et numérique sont souvent utilisés pour distinguer ces deux types d'affichage. Cependant ils sont aussi utilisés pour différencier les deux types de circuits qui transmettent le signal.

Avec ce type de pH-mètre, l'utilisation d'une sonde de température permet également, d'effectuer une compensation automatique de température et d'afficher la température de mesure. Généralement, un logiciel permet aussi la reconnaissance automatique des solutions d'étalonnage et le contrôle automatique de la stabilité du signal provenant de l'électrode.

6.3) Spécifications d'un pH-mètre

Depuis son invention, le pH-mètre a évolué considérablement, suivant les progrès de l'électronique : lecture par galvanomètre, puis par afficheur numérique; amplificateurs à lampe, puis à transistors, et enfin à amplificateur intégré; électronique analogique, puis numérique avec microprocesseurs.

L'impédance d'entrée du pH-mètre doit être supérieure à $10^{12} \Omega$ et le courant envoyé à l'électrode de verre, inférieur à $10^{-12} A$.

La résolution de l'afficheur numérique du pH-mètre comporte généralement deux décimales pour les pH-mètres courants et 3 décimales pour les pH-mètres haut de gamme.

Le pH-mètre doit permettre un étalonnage sur au moins deux points afin de tenir compte des variations possibles de la sensibilité de l'électrode de verre. A noter qu'il existe actuellement des pH-mètres haut de gamme permettant un étalonnage sur 9 points.

Le pH-mètre doit permettre la connexion d'une sonde de température et gérer une compensation automatique de température.

7. Les électrodes de mesure

7.1) L'électrode de verre

Le principe de l'électrode de verre repose sur le fait qu'une membrane de verre mise au contact de deux solutions de valeurs de *pH* différentes, développe entre ses parois une différence de potentiel électrique proportionnelle à cette différence de valeurs de *pH*. La théorie explique le phénomène par le transport des ions alcalins à travers le verre [5].

Une électrode de verre doit être de très bonne qualité car si la structure de la membrane de verre n'est pas uniforme, un potentiel d'asymétrie peut apparaître, même pour des solutions de valeurs de *pH* identiques de part et d'autre de la membrane de verre, entraînant ainsi une erreur systématique sur le potentiel mesuré.

La *figure 1.4* représente la constitution d'une électrode de verre simple.

Pour rendre mesurable le phénomène électrochimique dépendant de la valeur du *pH* de l'échantillon de mesure, la membrane de verre est intégrée dans une chaîne de mesure électrochimique. Elle comprend deux électrodes de référence, la première interne à l'électrode de verre et baignant dans une solution de *pH* connu et stable ; la deuxième externe à l'électrode de verre.

Cette dernière est plongée, soit directement dans la solution mesurée, soit par l'intermédiaire d'un pont électrochimique aussi appelé : « *allonge de protection* », soit encore intégrée à l'électrode de verre pour former une électrode unique communément appelée : « *électrode combinée* ».

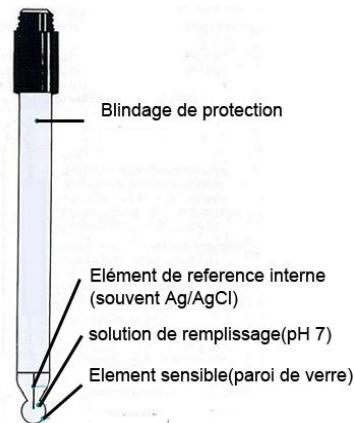


Figure 1-4 Electrode de verre [1]

La forme de la membrane de verre est liée à ses applications :

Sphérique (*à boule*) : pour les applications les plus fréquentes, elle présente la meilleure exactitude de mesure et le temps de réponse le plus court, tout en ayant une bonne solidité (en particulier, les verres de fabrication récente).

Cylindrique : la robustesse est plus grande, elle est surtout utilisée dans les liquides visqueux et pâteux, mais l'exactitude de mesure est moins bonne.

Conique : encore mieux adaptée pour les mesures dans les produits très pâteux, très visqueux ou semi-solides (mesure directe dans les sols, charcuteries, viandes...), mais l'exactitude de mesure est également moins bonne que celle de la boule.

Plane : pour les mesures de surface (mesure directe sur les cuirs...) cependant, l'exactitude de mesure est également moins bonne que celle de la boule.

7.2 L'électrode de référence

L'électrode de verre constitue une « demi-pile ». Pour effectuer des mesures, il faut l'opposer à une autre demi-pile, dite de référence, dont le potentiel reste constant à une température donnée, quelque soit le milieu dans lequel elle est plongée.

De nombreux assemblages permettent cette fonction, cependant les deux modèles les plus fréquemment utilisés pour les mesures de pH sont :

L'Electrode au Calomel Saturée(ECS), qui est constituée de la chaîne :

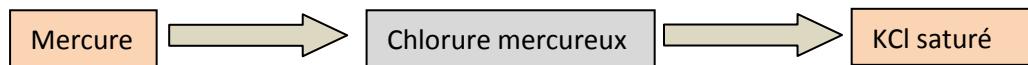


Figure 1-5 Structure d'une Electrode au Calomel Saturée

C'est la plus utilisée en raison de sa grande stabilité dans le temps et de son faible coefficient de température.

Pour l'électrode de la Fig.1.6, l'élément de référence est un tube de verre dans lequel on a placé une goutte de mercure au contact d'un fil de platine, puis une pâte composée de chlorure mercureux et de chlorure de potassium, le tout maintenu en place par un coton hydrophile. Un tel élément baigné dans une solution de chlorures fournit un potentiel qui dépend de la teneur en chlorures de la solution.

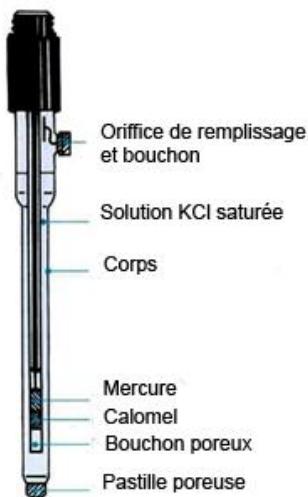


Figure 1-6 Constitution d'une électrode de référence au calomel (Hg/Hg₂Cl₂) [5]

La solution de *KCl* saturée fixe le potentiel à une température donnée. (Remarquons au passage, que dans une solution saturée, des cristaux de sel sont visibles). Et comme le montre le tableau 1, la variation du potentiel d'une électrode au calomel en fonction de la concentration en *KCl* n'est pas négligeable. Par conséquent, il est important de toujours veiller à une saturation effective de la solution de remplissage de l'électrode, afin de garantir des mesures fiables.

Table 1 -Potentiel V de l'électrode au calomel non saturée par rapport à l'électrode à hydrogène, en fonction de la concentration en KCl à 25 °C

Concentration (mol.l ⁻¹)	Sat.	3,5	1,0	0,1
V (mV)	244,4	252,0	283,0	335,6

D'autre part, comme le montre le tableau 2, la variation du potentiel d'une *ECS* en fonction de la température n'est pas non plus négligeable. Par conséquent, il est aussi important de s'assurer d'une stabilité relative de la température des solutions d'étalonnage et des échantillons à analyser.

Table 2 -Potentiel Vs de l'électrode au calomel saturée, par rapport à l'électrode à hydrogène, en fonction de la température

Température (°C)	0	10	20	25	30	40	50
Vs (mV)	260,2	254,1	247,7	244,4	241,1	234,3	227,2

7.3) L'électrode combinée

Comme il est plus facile de manipuler une seule électrode plutôt que deux, l'électrode combinée est très largement répandue. Ce type d'électrode combine en une seule entité une électrode de verre et une électrode de référence. Un deuxième avantage est que cela aide à s'assurer que les deux électrodes soient bien à la même température pendant le déroulement des mesures.

Les meilleures électrodes combinées sont les électrodes dites "symétriques", (Fig.1.7), pour lesquelles la nature et la dimension des éléments de référence sont les mêmes pour l'électrode de verre et pour l'électrode de référence, et pour lesquelles les solutions internes sont de composition les plus proches possibles. Dans ces conditions les variations de potentiels des éléments de référence interne et externe dus aux variations de température s'équilibrivent, ce qui permet de renforcer la fiabilité des mesures effectuées.

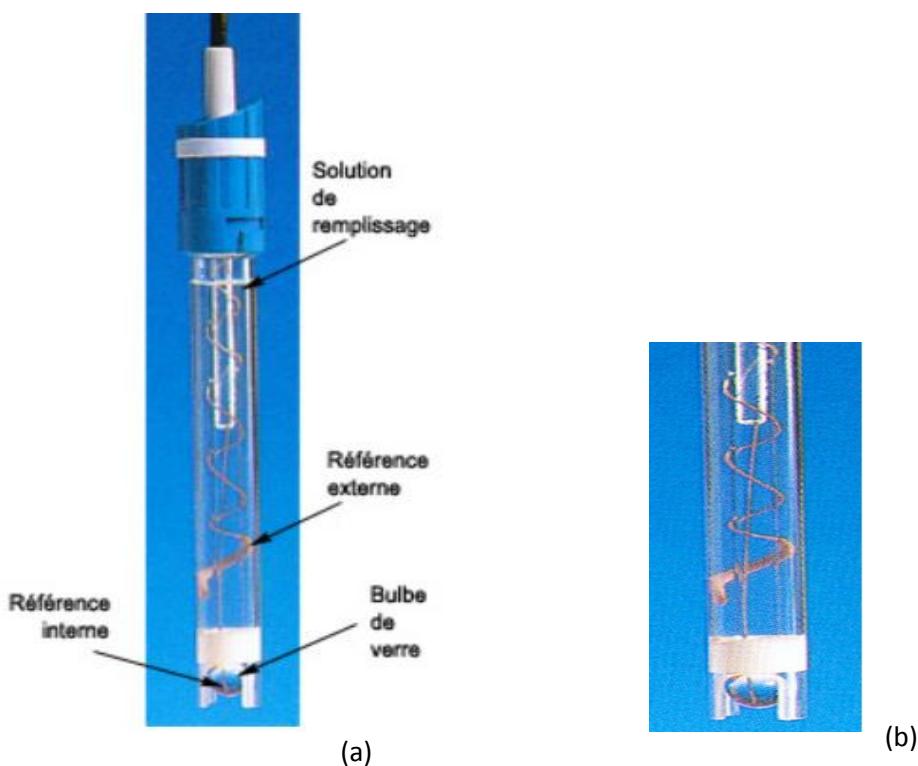


Figure 1-7 Electrode combinée, (a) Vue d'ensemble, (b) Zoom [5]

8. Les solutions étalons ou solutions tampons

La mesure du pH par potentiométrie au moyen d'une électrode de verre étant une méthode relative, elle nécessite des solutions d'étalonnage de valeurs de pH connus, couramment appelées solutions tampons. Les réactifs chimiques utilisés pour fabriquer ces solutions étalons doivent être d'une grande pureté et stables dans le temps. De plus, le pH de ces solutions doit être parfaitement connu sur une large gamme de température. Leur potentiel de jonction liquide, qui se caractérise par

le débit d'électrolyte vers l'extérieur de l'électrode, au contact d'une électrode de référence doit être le plus proche possible de celui de l'échantillon à mesurer.

En effet, on sait que toute jonction entre deux liquides introduit un potentiel parasite.

Le *tableau 3* présente quelques exemples de potentiels de jonction liquide obtenus par immersion d'une électrode de référence au calomel remplie avec du *KCl* saturé, dans différents échantillons.

Table 3 - Potentiel de jonction liquide en fonction de quelques solutions tampons

Échantillon	Potentiel de jonction liquide
Solution tampon pH 1,679 à 25°C	3,3 mV
Solution tampon pH 4,005 à 25°C	2,6 mV
Solution tampon pH 4,650 à 25°C	3,1 mV
Solution tampon pH 7,000 à 25°C	1,9 mV
Solution tampon pH 10,012 à 25°C	1,8 mV

L'influence de la température sur les solutions étalons peut être exprimée par la relation [1].

$$pH = \frac{A}{T} + B + C \cdot T + D \cdot T^2$$

Ou : T est la température en Kelvin et A, B, C, D des constantes spécifiques à chaque étalon, dépendants de la composition.

Des valeurs pour ces différentes constantes sont données au *tableau 4*.

Table 4 - Constantes spécifiques avec leur composition relative aux solutions étalons

composition	Oxalate	tartrate	citrate	phtalate	phosphate
A	- 362.76	- 1727.96	1280.40	0	3459.39
B	6.1765	23.7406	- 4.1650	6.6146	- 21.0574
$10^2 \cdot C$	- 1.8710	- 7.5947	1.2230	- 1.8509	7.330
$10^5 \cdot D$	2.5847	9.2873	0	3.2721	- 6.2266

L'étalonnage de la chaîne de mesure en pH-métrie est détaillé dans *l'ANNEXE A*.

II. La mesure de la température

1. Généralités sur la chaleur et la température

1.1) La chaleur

La chaleur est une forme d'énergie échangée entre deux corps. Ce transfert s'effectue sous forme d'énergie mécanique microscopique, correspondant au degré d'agitation des molécules. Ainsi, lorsqu'un corps reçoit de la chaleur, l'agitation de ses molécules s'intensifie, ce qui se traduit la plupart du temps par une augmentation de la température de ce corps. Cependant, un apport de chaleur peut également provoquer un changement d'état : un glaçon chauffé fond progressivement tout en restant à la température de 0 °C. Entre deux corps, la chaleur se propage spontanément du

corps ayant la température la plus élevée vers celui ayant la température la plus basse, éllevant donc la température de ce dernier, tout en abaissant la température du premier [6].

Il existe trois modes de transfert de chaleur : la conduction, le rayonnement et la convection. La conduction implique un contact physique entre les corps ou les parties des corps échangeant de la chaleur. Le transfert par rayonnement ne nécessite ni contact ni présence d'aucune matière entre les deux corps. La convection se produit lorsqu'un liquide ou un gaz est en contact avec une source plus chaude : il se produit alors un mouvement d'ensemble des molécules du fluide transportant la chaleur vers les zones plus froides.

1.2) La température

La température est une grandeur physique qui mesure le degré de chaleur d'un corps ou d'un milieu. Lorsque deux corps sont placés dans une enceinte adiabatique, le corps le plus chaud cède de la chaleur au corps le plus froid, jusqu'à ce que les deux corps aient la même température. Les termes *température* et *chaleur* désignent deux notions distinctes : la température est une propriété thermodynamique du corps et mesure l'agitation microscopique de la matière ; alors que la chaleur est une forme d'énergie qui peut être échangée entre deux corps [6].

On peut mesurer la température d'un corps en observant le changement de l'une de ses propriétés spécifiques, telle la résistivité électrique.

Le *tableau 5* donne les échelles de température utilisées aujourd'hui.

Table 5 - Echelle de température

	Kelvin(K)	Celsius (°C)	Rankin (°R)	Fahrenheit (°F)
Zéro absolu	0	-273,15	0	-459,67
Equilibre eau glace à 101325 Pa	273,15	0	491,67	32
Ebullition de l'eau à 101325 Pa	373,15	100	671,67	212

2. Capteur de température

2.1) Généralités

Un capteur est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée (température, pression,...) en une grandeur utilisable ou traitable (tension électrique, hauteur du mercure, déviation d'une aiguille,...).



Figure 1-8 Principe général d'un capteur

Avec : $S = f(m)$

Remarque : un transducteur qui est un dispositif convertissant une grandeur physique en une autre n'est pas un capteur. Le capteur se distingue de l'instrument de mesure, par le fait qu'il n'est qu'une

simple interface entre un processus physique et une information manipulable. L'instrument de mesure, lui, est un appareil autonome se suffisant à lui-même et disposant d'un afficheur ou d'un système de stockage de donnée. Pour faciliter l'exploitation de la réponse, on s'efforce de réaliser des capteurs dont la relation.

$S = f(m)$ est linéaire. Dans ce cas S et m sont proportionnels. Dans le cas contraire, des méthodes de linéarisation de la réponse sont nécessaires.

On peut classer les capteurs en 2 types :

- *Les Capteurs passifs* : Il s'agit d'impédances (très souvent des résistances) dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande.
- *Les Capteurs actifs* : Ils fonctionnent en générateurs en convertissant la forme d'énergie propre au mesurande en énergie électrique.

2.2) Les capteurs de température

a) Thermomètre à thermocouple

Le thermocouple est un capteur actif qui fournit une grandeur électrique traitable ou manipulable. Son principe de fonctionnement (*Effet Seebeck*) peut être décrit en partant du schéma représentant le thermocouple, (Fig.1.9) [7].

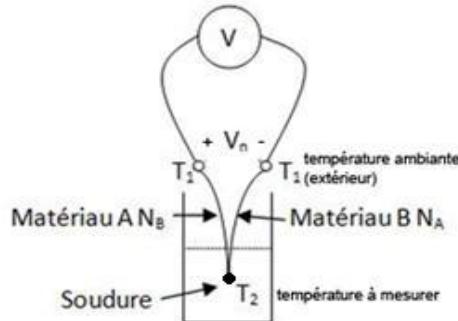


Figure 1-9 Schéma simplifié permettant d'expliquer le fonctionnement d'un thermocouple

N_A et N_B sont les concentrations en électron dans des matériaux A et B ; T_1 et T_2 sont les températures aux régions indiquées. Une condition nécessaire pour pouvoir mesurer $T_2 \geq T_1$ est que N_A soit supérieur à N_B .

Pour T_2 différente de T_1 , il apparaît une tension V_n aux bornes de deux conducteurs soumis à une température T_1 c'est-à-dire une différence de température est présente aux bornes du conducteur électrique.

C'est l'*effet Thompson* (Fig. 1.10) qui va provoquer la circulation des électrons. Le flux de chaleur crée un mouvement d'électrons, ce qui génère une force électromotrice (f.é.m.) dans cette zone.

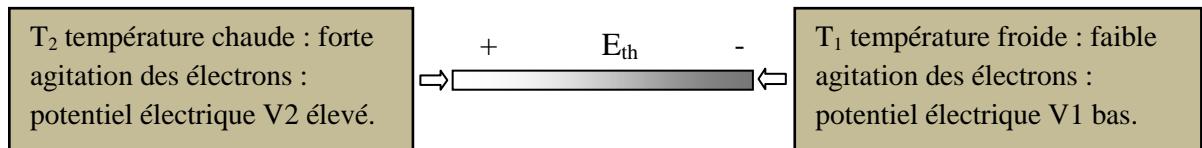


Figure 1-10 Principe de l'Effet Thompson

$$E_{th} = V_2 - V_1 = \alpha_A (T_2 - T_1)$$

La relation est valable pour une variation linéaire de température.

α_A : Coefficient pour le métal A

A la jonction de deux conducteurs différents situés à une température T , on observe également l'apparition d'une différence de potentiel. V_{AB} est due à la différence de matière (potentiel électrique différent) et r la résistance au passage du courant. Quand le courant circule, il y a échange d'énergie thermique avec l'extérieur d'une puissance :

$$P = V_{AB} \cdot i + r \cdot i^2$$

Remarque : si l'on inverse le sens du courant, cette puissance peut être négative pour des intensités suffisamment faibles. Dans ce dernier cas, il y a refroidissement : c'est l'*effet Peltier*, (Fig.1.11). Le passage d'un courant peut donc absorber de la chaleur ; on utilise cet effet dans certains petits réfrigérateurs ou pour le refroidissement des circuits électriques.

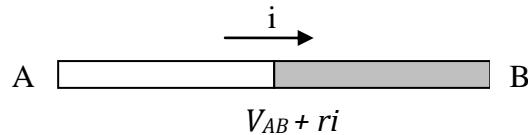


Figure 1-11 Principe d'Effet Peltier

La valeur de la tension V_{AB} est donnée par la relation suivante :

$$V_{AB} = 2,87 \cdot 10^{-7} (T_2 - T_1) \cdot \ln\left(\frac{N_A}{N_B}\right)$$

Pour des facteurs bien définis, on peut écrire :

$$v_n = k \cdot (T_2 - T_1)$$

Où $k = 2,87 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{N_A}{N_B}\right)$ est la constante du couple ou force électromotrice spécifique. L'*effet Seebeck* thermoélectrique est en fait la combinaison de l'*effet Thompson* et de l'*effet Peltier*.

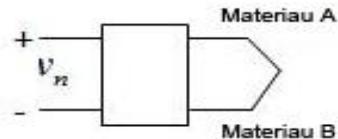


Figure 1-12 Symbole d'un capteur à thermocouple [7]

Le phénomène est aussi possible et vrai, si on applique une tension, alors, il aura un échauffement au point de liaison de 2 conducteurs, cas du module à *effet Peltier*. Le tableau 6 qui suit représente les différents types de thermocouple en fonction du matériau utilisé.

Table 6 - Tableau représentatif des différents types de thermocouple selon les matériaux utilisés

Lettre	Conducteur positif	Conducteur négatif
T	Cuivre	Nickel-Cuivre (Constantan)
J	Fer	Constantan
E	Nickel-Chrome (Chromel)	Constantan
K	Chromel	Nickel-Aluminium (Alumel)
S	Platine-10 % Rhodium	Platine-6 % Rhodium
R	Platine-13 % Rhodium	Platine
B	Platine-30 % Rhodium	Platine-6 % Rhodium
N	Nickel-Chrome-Silicium (Nicrosil)	Nickel-Chrome-Magnésium (Nisil)
U	Cuivre	Constantan
G	Tungstène	Tungstène-26 % Rhénium
C	Tungstène-5 % Rhénium	Tungstène-26 % Rhénium
D	Tungstène-3 % Rhénium	Tungstène-25 % Rhénium
Couple non normalisé	Platine	Or

En ce qui concerne le choix du thermocouple, l'un des premiers éléments pour choisir son capteur est souvent le domaine d'utilisation mais aussi sa sensibilité. Le tableau 7 donnera les valeurs de ces deux paramètres pour quelques capteurs.

Table 7 - Tableau représentant le domaine d'utilisation et la sensibilité selon différents capteurs

Lettre	Domaine d'utilisation (°C)	Sensibilité moyenne ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$)
T	-200 à 370	51
J	-40 à 800	55
E	-270 à 870	78,5
K	-270 à 1270	41
S	-50 à 1600	11,4
R	-50 à 1600	12,9
B	0 à 1700	10,6
N	-270 à 1300	38
G C et D	0 à 2600	20
Pt/Au	0 à 1000	25

b) Capteur de température à résistances métalliques

Le fonctionnement des thermomètres à résistance et des thermistances est basé sur un même phénomène physique, à savoir la variation de la résistance d'un conducteur avec la température, (*tableau 8*).

R_T est la résistance à la température T .

$$R_T = R_0 (1 + aT + bT^2 + cT^3 + \dots)$$

Où R_0 est la résistance à la température 0°C ; et a , b , c , ... sont des coefficients positifs spécifiques au métal. Le plus souvent, on se limite au 1^{er} terme :

$$R_T = R_0 (1 + aT)$$

Table 8 - Variation de la résistance électrique d'un conducteur avec la température

Métal	Résistivité à 0 °C	Point de fusion	Domaine d'emploi	R_{100}/R_0
	$\mu\Omega\cdot\text{cm}$	°C	°C	
Cuivre	7	1083	-190 à +150	1,427
Nickel	6,38	1453	-60 à +180	1,672
Platine	9,81	1769	-250 à +1100	1,392
Indium	9	153	-269 à +27	1,121

c) Thermistance

Une thermistance est une résistance dont la valeur varie en fonction de la température, suivant l'équation linéaire décrite précédemment :

$$R(T) = R_0 (1 + AT) \implies R(T) = R_0 [1 + A(T) \cdot T]$$

Où R_0 la résistance à 0°C , et $a(T)$ le coefficient de température de la thermistance.

Remarque : Si $A(T) > 0$, alors on a une thermistance à coefficient de température positif (*CTP*). Les *CTP* sont des résistances dont la résistance augmente avec la température. Si $A(T) < 0$, alors on a une thermistance à coefficient de température négatif (*CTN*).

Les symboles sont illustrés à la *Fig. 1.13*.

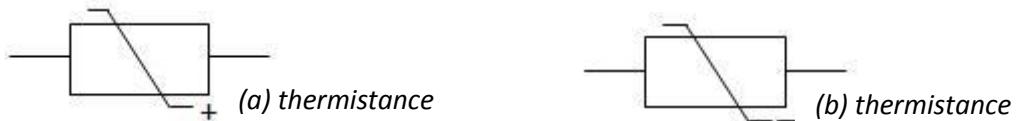


Figure 1-13 Symboles des thermistances

On peut insérer la thermistance dans un pont de jauge. On obtient ainsi une tension V en sortie du pont :

$$V = k(T - T_0)$$

On peut aussi alimenter la thermistance avec un générateur de courant. La tension à ses bornes sera donc proportionnelle à la résistance.

d) Capteurs électroniques

Il est possible d'utiliser des composants électroniques comme capteurs de températures. Ce ne sont pas principalement les caractéristiques fondamentales de ces composants qui nous intéressent, mais plutôt certaines de leurs particularités. Dans une jonction *pn* soumise à une tension *V*, le courant *I* est lié à la tension par la relation [8]:

$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{V}{\eta V_T}\right) - 1 \right] \quad \text{avec} \quad V_T = \frac{kT}{q} \quad \text{et} \quad V = \eta V_T \cdot \ln \frac{I}{I_s}$$

C'est la Loi de Schottky où *q* est la charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19} C$), *k* constante de Boltzmann ($(1,381 \cdot 10^{-23} J/K)$; *T* la température absolue en *K* ; *I_s* Courant de saturation qui dépend aussi de *T*.

Pour une diode, selon la loi de Schottky, si *I_D* constante, *V_D* est seulement fonction de la température. Le montage de la Fig.1.14 permet d'obtenir un courant de diode constant, relativement stable par rapport à la température. (Point de fonctionnement du BJT)

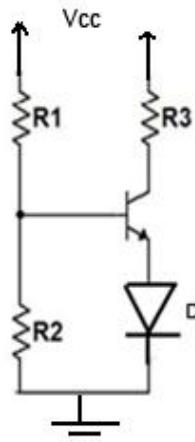


Figure 1-14 Montage utilisant la Diode comme capteur de température

On peut utiliser des standards comme 1N4007 ou 1N4004. Pour une plage de mesure de température assez modeste, la réponse est presque linéaire. Mais pour des variations assez considérables, un circuit de linéarisation est nécessaire [8]. (Plage entre -55°C et 150°C)

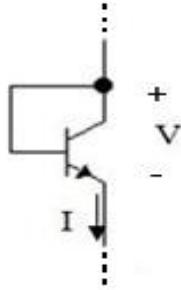


Figure 1-15 Montage utilisant un BJT comme capteur de température

Ici on peut aussi utiliser un BJT dont la base et le collecteur sont connectés. On a donc une diode.

On peut réunir ces deux dispositifs pour obtenir des capteurs intégrés comme les séries LM35 du « National Semi conductor » et l'AD590. Ces types de capteur utilisant des diodes et des transistors ont l'avantage d'être simple à fabriquer et à mettre en œuvre et ils sont très linéaires. Mais du fait de leur conception, ils ont une étendue de mesure limitée et peuvent être affectés par un champ magnétique.

e) Capteurs de température à rayonnement infrarouge

Le principe est basé sur le rayonnement thermique. Un corps chaud émet un flux thermique qui est un rayonnement de type électromagnétique. La mesure à distance utilise une propriété très utile : la thermographie. Celle-ci stipule que "*tout corps émet spontanément et en permanence un rayonnement électromagnétique dont le spectre continue à une répartition énergétique fonction de la température*".

La loi de Planck donne la luminance monochromatique du corps noir : L_λ^0

$$L_\lambda^0 = \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{\exp\left[\frac{hc}{k\lambda T}\right] - 1}$$

Où $h=6,6255.10^{-34} Js$ est la constante de Planck, $C=2.996.10^8 \text{ ms}^{-1}$ la vitesse des ondes électromagnétiques dans le vide et $k=1.3805.10^{-23}$ la constante de Boltzmann.

Le capteur principal sera un récepteur absorbant dont on détermine l'échauffement (énergie ΔQ) pendant une durée déterminée. On a donc accès à la puissance $P = \Delta Q / \Delta t$.

Les capteurs infrarouges n'ont pas besoin d'être alimentés ; ils ont un temps de réponse très rapide et offrent une prise de température sans contact.

2.3) Domaine d'utilisation des capteurs de température

Voici quelques domaines d'utilisation des capteurs de température :

- De -55 à 150°C : Capteur à semi conducteur
- De -259°C à 650°C : Capteur à résistance et thermistance
- De 300°C à 1300°C : Thermocouples
- Pour $T > 1200^\circ\text{C}$: température à rayonnement infrarouge, $L_\lambda = f(T)$

CHAPITRE 2. ETUDE DES PARTIES DU SYSTEME A CONCEVOIR

I. Introduction

Comme décrite à l'introduction générale, le système à réaliser est un système de dosage de solution couplé avec une mesure de la température, assistée par ordinateur.

Les commandes de la pompe doseuse sont issues d'un logiciel, stockées dans le *PC*, acheminées vers le *pH* via le port parallèle et un *CAN*. La lecture de la température du processus et la mesure du pH à chaque instant suivent le chemin inverse.

Le cœur de la pompe doseuse est un moteur pas à pas.

Le schéma bloc du système est illustré par la *Fig. 2.1*.

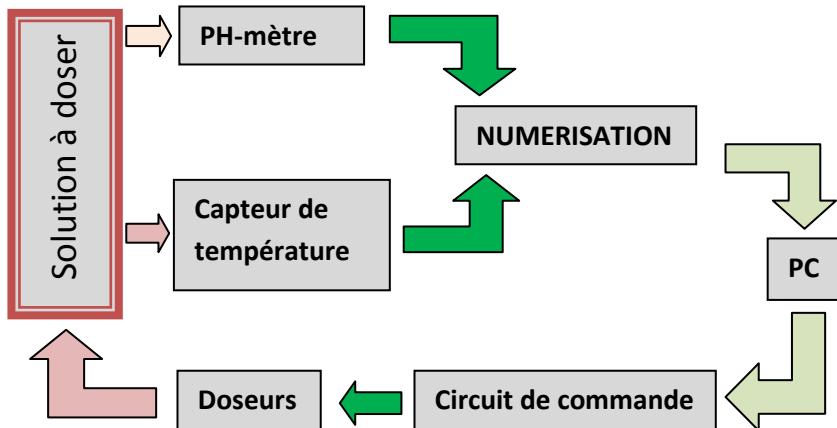


Figure 2-1 Schéma bloc de système à concevoir

II. Conception du système

1. pH-mètre et capteur de température

1.1) Rappel sur le pH-mètre

On a déjà vu dans le chapitre (1) que pour connaître le pH d'une solution, d'abord il faut connaître aussi la concentration des ions OH^+ . D'où la formule du pH d'une solution :

$$\text{pH} = -\log 10 [\text{OH}^+]$$

Nous avons beaucoup de possibilités pour mesurer le pH grâce à l'évolution de la technologie. D'après tous ce que nous avons vu dans le chapitre précédent : *Indicateur de pH ou Indicateur acide-base, une électrode de verre, L'électrode de référence, L'électrode combinée*. Donc on peut choisir l'un des ces électrodes.

1.2) Rappel sur le capteur de température

La température est aussi une grandeur physique, donc on peut mesurer. Il existe plusieurs capteurs de température comme *Thermomètre à thermocouple*, *Capteur de température à résistances métalliques*, *Thermistance*, *Capteurs électroniques*, *Capteurs de température à rayonnement infrarouge*.

Voici quelques domaines d'utilisation des capteurs de température :

- De -55 à 150°C : Capteur à semi conducteur
- De -259°C à 650°C : Capteur à résistance et thermistance
- De 300°C à 1300°C : Thermocouples
- Pour $T > 1200^\circ\text{C}$: température à rayonnement infrarouge, $L_\lambda = f(T)$

Donc selon le domaine, c'est au réalisateur qui choisit le capteur utilisé.

2. Numérisation

2.1) Introduction

Actuellement, les systèmes technologiques intègrent de plus en plus des parties numériques. Lorsque l'on utilise différentes technologies, il est nécessaire d'assurer leur interface. C'est le rôle que jouent les convertisseurs analogique - numérique (*CAN*) et les convertisseurs numérique - analogique (*CNA*). Ils permettent le passage des systèmes analogiques aux systèmes numériques. On peut faire une analogie avec la plupart des capteurs, qui eux, assurent la transition entre des grandeurs physiques et des grandeurs électriques.

Les signaux analogiques sont l'image des variations des grandeurs physiques telles que la température, la pression, le débit. Ils varient continuellement dans le temps. Les signaux numériques, qui sont matérialisés par des impulsions discrètes, quantifiées, ou codées, facilitent le traitement et le stockage des informations. La chaîne de traitement des signaux est organisée, comme montrée à la Fig. 2.2.

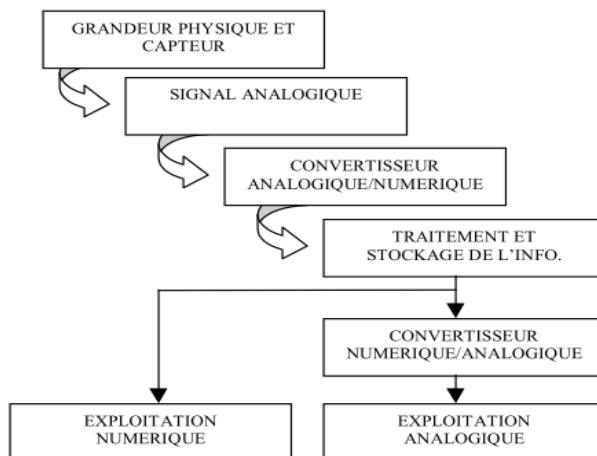


Figure 2-2 Organisation générale de la fonction conversion

La fonction conversion analogique-numérique consiste à transformer une grandeur électrique en une grandeur numérique exprimée sur N bits. Cette grandeur de sortie représente,

dans le système de codage qui lui est affecté, un nombre proportionnel à la grandeur analogique d'entrée.

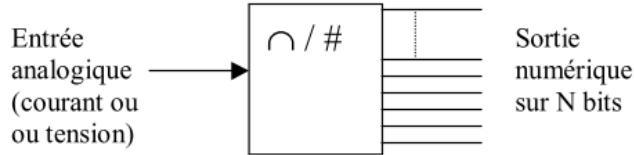


Figure 2-3 Schéma bloc d'un CAN à N bits

D'une manière générale, convertir une grandeur analogique en une grandeur numérique nécessite deux opérations :

- **La quantification** : opération qui consiste à associer une valeur analogique à la plus petite variation mesurable entre deux valeurs codées distinctes en sortie. Cette valeur est appelée « pas de quantification ».

$$q = \frac{\Delta V_{e_{max}}}{2^n} = \frac{V_{ref+} - V_{ref-}}{2^n}$$

Où q est le pas de quantification (en tension, ici), appelé aussi « Résolution », $\Delta V_{e_{max}}$ est l'écart entre la valeur min et la valeur max de Ve à numériser (en V), et n : nombre de bits en sortie du convertisseur.

- **Le codage** : opération qui assigne une valeur numérique à chacun de ces niveaux. Les codages les plus couramment utilisés sont :
 - Le binaire naturel, pour les nombres non signés,
 - Le complément à 2 pour les nombres signés,
 - Le code binaire signé.

2.2) Les enjeux du CAN

On veut associer à un signal analogique (c'est-à-dire : à valeur réelle et à temps continu), un signal numérique (c'est-à-dire : échantillonné, quantifié et codé). La première étape est l'échantillonnage du signal qui se fait en général périodiquement. La fonction réalisant cette opération est l'échantillonneur. Technologiquement, un simple interrupteur commandé à fermeture par train d'impulsions convient. Mais, il faut pouvoir maintenir la tension pendant un temps suffisant pour permettre la quantification de cette valeur. D'où la nécessité d'un bloqueur en aval de l'échantillonneur. La réunion des deux éléments est appelée : « Echantillonneur-Bloqueur ». Le fonctionnement de l'*Echantillonneur-Bloqueur* ou *SHS (Sample and Hold System)* [9] est détaillé à L'ANNEXE B.

La seconde étape consiste à associer à la valeur V , issue de l'échantillonneur-bloqueur, une série de chiffres $\{a_n\}$, $n \in \mathbb{N}$ qui permettent d'approcher au mieux V par la relation :

$$V \approx q \sum_{n=0}^{N-1} a_n x^n = \frac{\Delta V}{x^N - 1} \sum_{n=0}^{N-1} a_n x^n$$

avec q : le pas de quantification

x : la base de représentation (en numérique, on utilise exclusivement la représentation binaire, soit $x=2$)

a_n : Le nombre de bits, N : le nombre de chiffres sur lequel est codée la valeur

ΔV : la plage de conversion, avec $\Delta V = q(x^n - 1)$

2.3) Les Caractéristiques du CAN

La figure 2.4 nous montre la caractéristique de transfert d'un CAN trois bits.

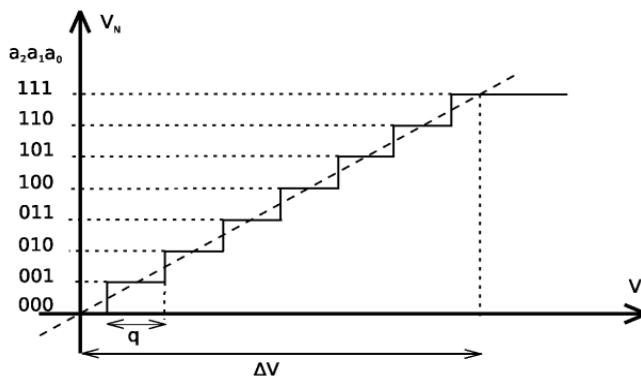


Figure 2-4 Caractéristique de transfert d'un CAN 3 bits

a) Le temps de conversion

Le temps de conversion peut être variable selon le type de structure utilisé. Ce qui importe, c'est le temps maximal de conversion. Il va conditionner la fréquence maximale d'échantillonnage à respecter pour avoir un fonctionnement correct.

b) La plage de conversion

Il s'agit de la plage de tensions d'entrée ΔV pour laquelle le CAN est construit. En dehors de cette zone, il ne fonctionnera plus correctement : sortie numérique incorrecte et éventuellement dégradations.

c) La résolution

Les tensions associées aux valeurs numériques sorties du CAN sont évidemment quantifiées. Le pas de quantification q va fixer la résolution du CAN car, sans autres défauts du CAN, la valeur

absolue de l'erreur sera limitée à $q/2$. On pourra noter que cette résolution est intrinsèquement liée au nombre de bits N et à la plage de conversion du CAN, par la relation :

$$q = \frac{\Delta V}{(2^N - 1)}$$

2.4) Les défauts du CAN

Les défauts du CAN peuvent être classés dans différentes classes (Fig. 2.5):

Erreur d'offset ou décalage : C'est l'écart entre la valeur réelle de la grandeur d'entrée et la valeur théorique de cette grandeur qui fournirait le même mot binaire en sortie.

Erreur de gain : Elle se traduit par la différence qu'il existe entre le maximum de la valeur analogique d'entrée et la valeur théorique du plus grand mot binaire de sortie.

Erreur de linéarité : Elle se caractérise par l'écart maximal entre la courbe réelle et la droite idéale. Elle s'exprime en % de ΔV .

Erreur ou bruit de quantification : La plupart de ces erreurs sont effectivement difficiles à mettre en évidence. L'effet de la quantification peut être modélisé par un bruit de quantification de valeur moyenne nulle et de variance (puissance) : $\sigma^2 = \frac{q^2}{12}$

La dégradation du signal est caractérisée par l'opération de quantification via le *Rapport Signal au Bruit*:

$$RSB = 10 \log_{10} \left(\frac{\text{puissance du signal}}{\text{puissance du bruit}} \right)$$

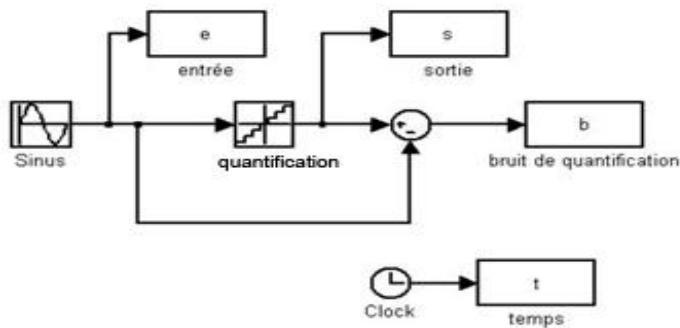


Figure 2-5 Schéma simulant l'effet d'erreur de quantification

Si le signal est une sinusoïde dont la valeur crête à crête correspond à la plage de conversion ΔV du CAN, sa puissance est donnée par $\Delta V^2/8$. Comme la puissance du bruit est modélisée par :

$$q^2/12 \text{ et que } q = \frac{\Delta V}{(2^N - 1)},$$

alors le RSB peut s'approcher par la relation : $RSB = 1,76 + 6,02.N$

La figure 2.6 montre le Rapport Signal Bruit de quantification en fonction de l'évolution du *RSB* avec le nombre de bits de numérisation.

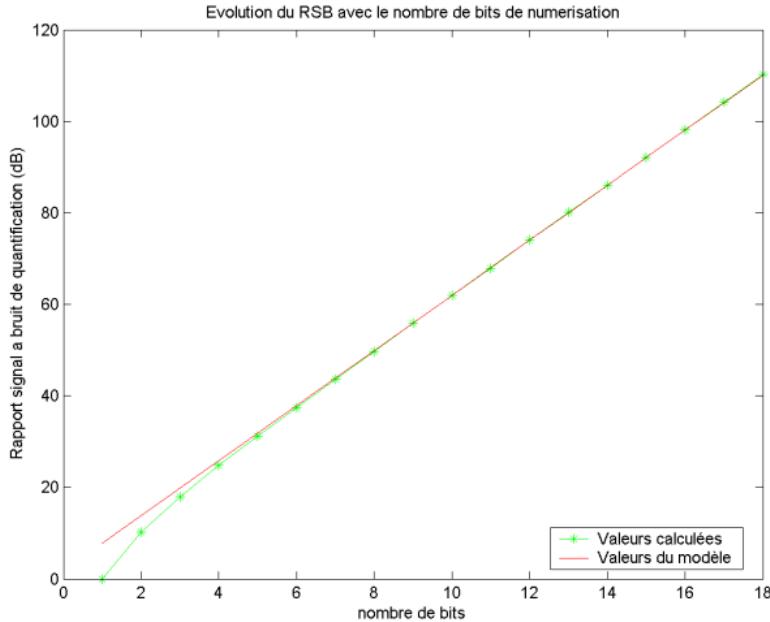


Figure 2-6 Comparaison des RSB de quantification théorique et calculé

2.5) Les différentes structures de CAN

Il existe plusieurs types de *CAN*, on distingue [10]:

- Les convertisseurs à intégration, comme l'ADL500 de « National Semi-conducator »
- Le convertisseur à équilibre de charge ou « incrémental »
- Le convertisseur à approximations successives, exemple : ADS7807 de « Texas Instruments »
- Le convertisseur « Flash », comme l'AD9000 de « Texas Instruments »
- Le convertisseur « Pipeline », exemple : AD875 de « Maxim »
- Le convertisseur « Subranging » ou « Semi-flash », comme l'ADC0820 de « Texas Instruments »
- Les convertisseurs à sur échantillonnage
- Les -convertisseurs « Sigma-delta »

Chacun de ces convertisseurs possède leurs propres principes de fonctionnement. Mais nous n'en citons que pour quelques convertisseurs les plus courantes, ceux des autres convertisseurs seront mentionnés dans L'ANNEXE C.

a) Les convertisseurs à intégration

i. Le convertisseur simple rampe

A la valeur de la tension d'entrée on fait correspondre une impulsion dont la largeur est proportionnelle à cette tension. Cette impulsion vient contrôler l'autorisation à s'incrémenter d'un

compteur. On génère ainsi le code binaire de sortie en comptant plus ou moins longtemps en fonction de l'amplitude du signal à convertir (*Fig. 2.7*).

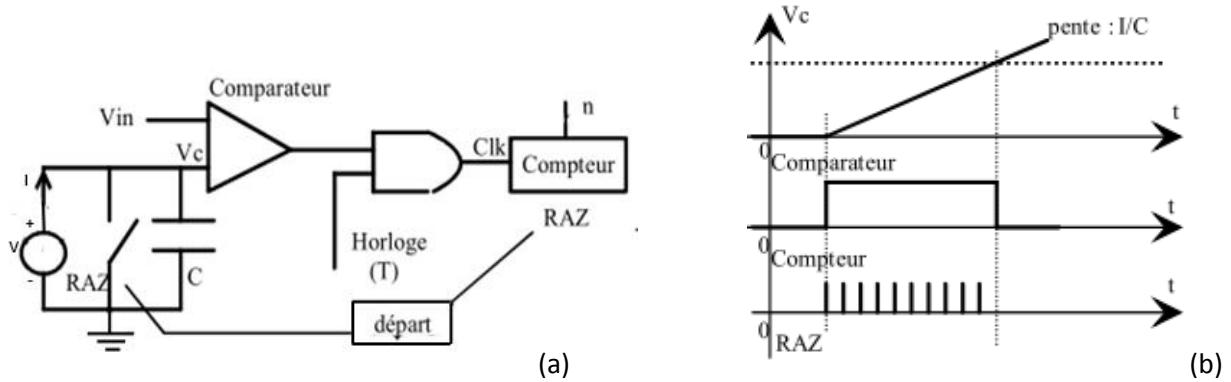


Figure 2-7 (a) Principe du convertisseur simple rampe (b) chronogramme du convertisseur simple rampe

Le fonctionnement se déroule en 3 phases :

- *Phase 1* : RAZ $V_c = 0$ et $N = 0$
- *Phase 2* : Intégration aux bornes du condensateur sous un courant constant tant que la tension du condensateur V_c est inférieure à la tension à convertir V_{in} . On obtient donc :

$$V_c = \frac{1}{C} \int I dt = \frac{I}{C} \cdot t$$

$V_c < V_{in}$, on compte tous les T , avec T la période de l'horloge système.

- *Phase 3* : $V_c = V_{in}$

Le comparateur bascule et bloque le compteur à sa dernière valeur N .

$$N = \frac{C}{I} \frac{V_{in}}{T}$$

Avec N : nombre entier, C : valeur du condensateur, I : courant débité par le générateur, V_{in} : tension d'entrée, T : temps de l'horloge.

On obtient une valeur compté N qui est fonction de V_{in} , C , I et T .

ii. Le convertisseur à rampe numérique

Dans ce cas, on remplace l'intégrateur analogique par un convertisseur numérique-analogique comme l'indique la *Fig. 2.8*.

La rampe est ainsi réalisée de manière numérique. Le temps n'intervient plus comme variable.

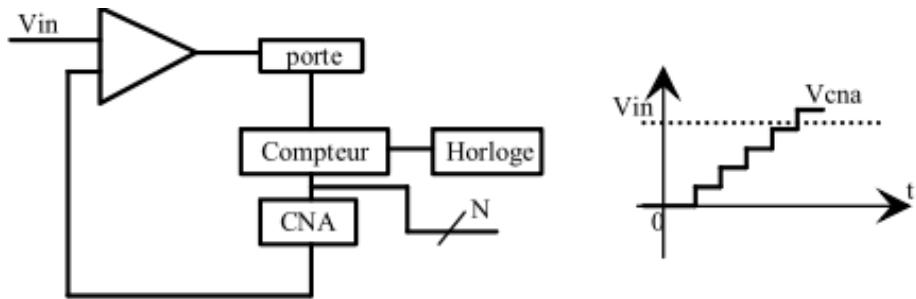


Figure 2-8 Principe du convertisseur à simple rampe numérique

iii. Les convertisseurs doubles rampes

- Principe

On effectue une double intégration de manière à faire s'annuler les erreurs dues aux composants, la Fig. 2.9 illustre le principe du convertisseur double rampe :

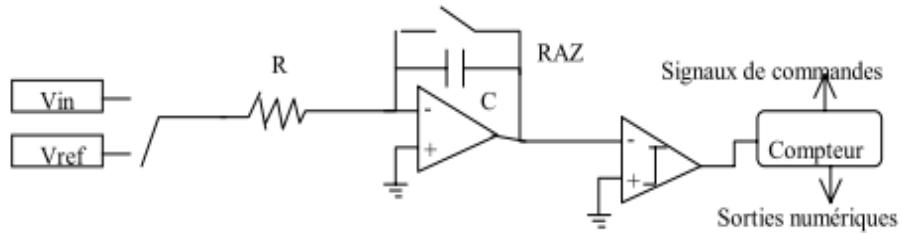


Figure 2-9 : Architecture du convertisseur double rampe

- Phases de fonctionnement

Le convertisseur double rampe présente 2 phases (Fig. 2.10) :

- *Phase 1:* On charge une capacité pendant un temps T_o , fixé, sous la tension à mesurer. T_o représente un cycle complet du compteur.
- *Phase 2 :* On décharge la capacité sous une tension fixée V_{ref} . Durant cette décharge, on incrémente un compteur (n bits) qui une fois la décharge terminée, sera l'image numérique de la tension à quantifier.

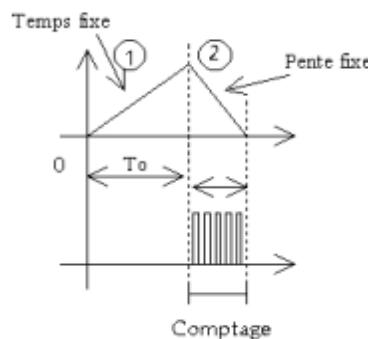


Figure 2-10 Schéma des phases du convertisseur double rampe

On notera qu'il faut que V_{ref} et V_{in} soit de signe opposé. La durée de fonctionnement du compteur est alors :

$$T = T_0 \cdot \frac{V_{in}}{V_{ref}}$$

On néglige l'incertitude sur la capacité, seule la tension de référence intervient dans la mesure.

Ces convertisseurs offrent une bonne résolution, mais sont très lents. On peut les utiliser avec des cycles de conversion de 20ms de manière à s'affranchir de l'influence du secteur 50Hz.

Ils sont utilisés dans le cas de mesure de température, de valeurs quasi-constants. En instrumentation basse fréquence, on peut atteindre une résolution de 18 bits.

b) Le convertisseur à approximations successives

i. Fonctionnement

La gamme totale disponible est divisée en 2 parties égales, on situe ensuite le signal à convertir dans une des deux parties, ce qui fixe la valeur du bit le plus élevé. La gamme restante est à nouveau divisée en 2 parties égales pour y situer le signal d'entrée, et ainsi de suite [11].

ii. Caractéristiques

Les caractéristiques principales sont les suivantes :

- **Résolution moyenne** : La résolution typique se situe dans la plage de 8 à 16 bits. Elle dépend essentiellement du convertisseur numérique-analogique utilisé dans le système.
- **Temps de conversion moyen** : Le temps de conversion typique est de l'ordre de 1us à 100μs. Une conversion nécessite n cycles successifs (pour n bits).
- **Technologie** : MOS (sous-ensemble d'un circuit MOS pour le traitement du signal, ou circuit standard de faible puissance). Et BIPOLAIRE (circuit standard rapide).
- **Application typiques** : Télécommunications, Traitement du signal, Interface microprocesseur.

Comme les convertisseurs à approximations successives représentent un excellent compromis en termes de précision, vitesse et prix ; mais aussi qu'ils représentent la majorité des convertisseurs à usage général ; nous nous intéressons sur ce type de convertisseur lors de la partie réalisation.

Le principe général des convertisseurs à approximations successives est détaillé dans l'ANNEXE 3.

3. Interfaçage avec le PC

3.1) Généralité sur le port parallèle

Tout comme le port série, le port parallèle ou port *LPT* (*Line Printer Terminal*) ou « *port Centronics* » est très répandu et son utilisation est encore très large de par sa vitesse, son coût et sa

large intégration. Il se présente sous la forme d'un connecteur DB25 femelle et a été conçue initialement pour pouvoir relier une imprimante au *PC*. On peut noter que la plupart des caractéristiques des broches d'un connecteur de cette interface ont une fonction en relation étroite avec le type de périphérique. Le port parallèle a subi plusieurs améliorations aux cours des évolutions et des besoins croissants des *PC*. Le port parallèle du *PC* est l'un des plus intéressants, par ses possibilités et sa simplicité de programmation. En effet il ne nécessite aucun protocole de transmission (contrairement au port série), et les niveaux électriques de ses broches varient entre 0 et 5 V, ce qui le rend compatible directement avec les composants de technologies *TTL* (*Transistor Transistor Logic*).

Outre les 8 lignes de données, le port parallèle dispose également de 4 lignes de contrôle (sortie) et 5 lignes d'état (entrée). Les connecteurs d'un port parallèle sont représentés aux Fig.2.11 (a) et (b) [12].

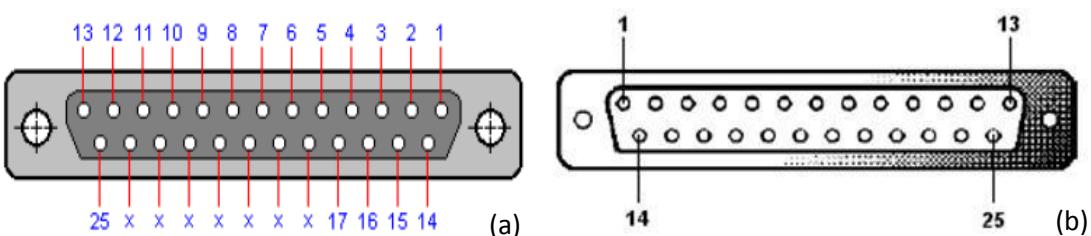


Figure 2-11 Prise DB25, (a) male ; (b) femelle

3.2) Les types de liaison parallèle ou protocole de communication

Il existe différents types de liaison parallèle, définies dans le standard *IEEE 1284* dont voici les plus adoptés :

- Le mode compatible *SPP* (*Standard Parallel Port*) qui est unidirectionnel,
- Le mode 4 bits ou « *NIBBLE MODE* », unidirectionnel,
- Le mode 8 bits ou « *BYTE MODE* », bidirectionnel,
- Le mode *EPP* (*Enhanced Parallel Port*) ou port parallèle étendu, qui est bidirectionnel,
- Le mode *ECP* (*Extended Capability Port*) ou port à capacités étendues) qui est bidirectionnel.

a) Mode *SPP* (*Standard Parallel Port*)

Le mode *SPP* (*Standard Parallel Port*) est le protocole de base permettant l'envoi de données vers une imprimante. Il peut être appelé dans ce cas « *Printer Mode* » ou « unidirectionnel mode » ou encore « *Centronics* » (nom également attribué au cordon reliant le *PC* aux imprimantes). Depuis, le *SPP* est devenu capable d'envoyer et de recevoir. Il peut donc être bidirectionnel. On le retrouve alors sous des appellations « *Bidirectional mode* » ou simplement « *SPP* ». C'est le protocole le plus simple. La vitesse de transmission maximale que l'on peut espérer obtenir avec un tel port est de l'ordre de 150 ko/s.

b) Mode 4 bits ou Nibble Mode

Le *nibble mode* a été introduit par Hewlett Packard. Dans ce mode, 4 des 5 lignes d'entrées servent à transmettre la moitié d'un *byte* (4 bits = un *nibble*) de l'imprimante vers le *PC*. Du multiplexage temporel permet au périphérique d'envoyer des *bytes* complets en deux étapes. Les autres lignes d'entrées ou de sorties sont adaptées au concept. Il est aussi très exigeant au niveau logiciel. Pour cette raison, on peut transférer environ 50kb/s maximum d'un périphérique vers le *PC*.

Le *nibble mode* est compatible parfaitement avec le mode standard sans modifications matérielles. Malgré sa lenteur, il est très utilisé pour les périphériques qui doivent envoyer peu de données au *PC* comme les imprimantes.

c) Byte Mode (enhanced bi-directional)

Dans le mode « *byte* », les huit lignes de donnée sont bidirectionnelles. Les lignes d'entrées et de sorties servent à gérer le flux et la direction des données. Comme pour les deux modes précédents, le *Byte mode* est très exigeant au niveau logiciel et donc peu rapide (il est tout de même deux fois plus rapide que le mode *Nibble* pour les données allant d'un périphérique vers le *PC*).

Le *Byte mode* exige que les 8 lignes de données soient bidirectionnelles, contrairement aux deux modes précédents. Toutefois, aucun autre matériel n'est requis.

d) Mode EPP (port parallèle amélioré)

En 1991, Xircom, Zenith et Intel ont développé un port plus rapide appelé EPP (*Enhanced Parallel Port*). Il permet d'attendre un débit théorique de 2 Mo/s, soit un débit environ treize fois supérieur au SPP. Si ce débit reste inférieur à celui des bus ISA (8 Mo/s), il permet néanmoins l'échange de données avec des périphériques tels que les lecteurs de *CD-ROM* ou les disques durs.

Le protocole *EPP* est lui explicitement bidirectionnel. Il constitue un vrai protocole de communication bidirectionnel alors que SPP reste un protocole « bricolé » lorsqu'il est bidirectionnel. Les anciens protocoles sont supportés sur un port parallèle amélioré.

e) Mode ECP

Le plus récent de ces modes est l'*ECP* (*Extended Capacity Port*). Il a été conçu par Hewlett Packard et Microsoft. Il dérive fortement d'ailleurs du mode *EPP* et en possède les mêmes caractéristiques avec toutefois des fonctionnalités supplémentaires, comme la gestion des périphériques « *Plug and Play* », l'identification de périphériques auprès de la machine dès le début du boot, le support du *DMA* (*Direct Memory Access*).

Dans ce mode, il est possible d'envoyer ou de recevoir des données sans avoir besoin du processeur. Il utilise aussi un « *buffer* » de type *FIFO* (*First In First Out*) pour envoyer et recevoir des données.

Enfin, l'adressage des périphériques se fait par un numéro de canal. Par exemple, un fax muni d'une liaison parallèle peut être utilisé comme scanner, modem/fax et imprimante, chaque fonction

pouvant être adressée séparément. Ce système d'adressage ne permet pas d'utiliser des périphériques différents. On est limité à l'utilisation d'un périphérique multifonctions, chaque fonction ayant une adresse.

En général, on utilise l'un des trois modes *SPP*, *EPP* ou *ECP*. Et dans notre application, le mode le plus récent, le mode *ECP* est choisi vu qu'il est avantageux par rapport aux autres modes.

3.3) Brochage du port parallèle

Le *Tableau 9* montre les différentes fonctions des brochages du port parallèle.

Table 9 - Représentation des différents brochages du port parallèle

connecteur N° des broches	Fonction	Niveau de repos	Direction			Registre
			SPP	EPP	ECP	
1	Strobe	1	S	S	S	contrôle
2	donnée D0	0	S	E/S	E/S	donnée
3	donnée D1	0	S	E/S	E/S	donnée
4	donnée D2	0	S	E/S	E/S	donnée
5	donnée D3	0	S	E/S	E/S	donnée
6	donnée D4	0	S	E/S	E/S	donnée
7	donnée D5	0	S	E/S	E/S	donnée
8	donnée D6	0	S	E/S	E/S	donnée
9	donnée D7	0	S	E/S	E/S	donnée
10	Acknowledge	1	E	E	E	état
11	Busy	0	E	E	E	état
12	Paper end	0	E	E	E	état
13	Select	0	E	E	E	état
14	Auto feed	1	S	S	S	contrôle
15	Error	1	E	E	E	état
16	Initialize	1	S	S	S	contrôle
17	Select input	1	S	S	S	contrôle
18...25	Ground					

3.4) Registres de commande

Chaque ligne est commandée directement par un bit, dans trois registres différents, comme précisés dans la dernière colonne du *tableau 9* alors que dans le tableau suivant, le niveau de repos correspond au niveau de la ligne lorsque le bit dans le registre est à 0. Tous les registres de commande sont à 8bits. On va voir le fonctionnement de chaque bit de chaque registre dans le *Tableau 10*.

Table 10 - Correspondance entre broches et registres de donnée

Registre	DONNEES							
	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit0
N° du bit	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Fonction								

D'après le *tableau 10* précédent, tous les bits sont utilisables c'est-à-dire, on a la possibilité d'avoir 8 bits de données soit de 0 à $2^8-1=255$. Dans le *EPP* et *ECP*, ce registre peut être en mode lecture ou en mode écriture, donc on peut envoyer ou recevoir des données.

Dans ce registre (*Tableau 11*), il y a 8 bits mais les 5 bits, qui ont le poids le plus fort, sont utilisables. Donc on peut faire entrer 5 bits de commande.

Table 11 - Correspondance entre broches et registres d'état

Registre	ETAT							
N° du bit	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit0
Fonction	Busy	Acknowledge	Paper End	Select	Error			

La correspondance entre les broches et les registre de contrôle est détaillée dans le *tableau 12* :

Table 12 - Correspondance entre broches et registres de contrôle

Registre	CONTRÔLE							
N° du bit	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit0
Fonction			direction données	Autorisation d'interruption	Select input	Initialize	Auto feed	Strobe

Ici, on a toujours un registre de 8 bits mais les bits N°7 et N°6 ne sont pas adressables. Le bit N°5 n'est bien entendu adressable que sur les ports bidirectionnels. Si on veut faire sortir des données il faut le mettre à 0 (zéro) mais pour faire entrer des données, mettre ce bit à 1. Dans ce registre, seuls 4 bits sont contrôlables pour l'interfaces ou l'envoie des données. En plus les bits N°0, 1 et 3 sont inversés. On a une plage de 0 à $2^4 - 1 = 15$. Différentes adresses peuvent exister pour les registres selon le système, le *tableau 13* en présente les différentes possibilités (0x signifie que les valeurs sont en hexadécimal).

Table 13 - Adresse de chaque registre pour commander le port parallèle

données	0x956	0x3BC	0x888	0x378	0x632	0x278
état	0x957	0x3BD	0x889	0x379	0x633	0x279
contrôle	0x957	0x3BE	0x89A	0x37A	0x634	0x27A

Normalement, un *PC* peut avoir jusqu'à trois ports parallèles. Cependant sur les systèmes actuels le port *LPT1* se situe toujours à l'adresse 378h à 37Ah, le port *LPT2* à l'adresse 278h jusqu'à 27Ah. C'est le *BIOS*, lors de la mise sous tension de l'ordinateur, qui alloue les ports aux interfaces détectées. Mais pour le port *LPT3*, c'est le constructeur qui détermine son adresse en générale.

3.5) Utilisation du port entrée/sortie parallèle

L'utilisation des ports d'entrée / sortie parallèle est généralement effectuée de la façon suivante:

- Définition de la direction des broches du port par le registre de contrôle.
- Ecriture dans le registre de contrôle pour définir le niveau des broches configurées en sortie.
- Lecture dans le registre d'entrée pour obtenir le niveau des broches configurées en entrée.

3.6) Sécurité du PC

Il est très facile de causer une panne d'un *PC* simplement en « jouant » avec le port parallèle. Pour éviter tous dommages il faut faire attention à la tension de toutes les connexions avec le port

parallèle car le port parallèle ne supporte que des tensions entre 0 et 5 V, il suffit de mettre un montage suiveur avec des portes *ET* correctement câblées. Comme ça, ce sera la porte qui sera endommagée non pas le *PC*. Pour cela, on peut utiliser des circuits intégrés comme 74LS571 qui est un circuit intégré suiveur et amplificateur afin de maîtriser la tension qui entre dans le port parallèle, (*Fig. 2.12*).

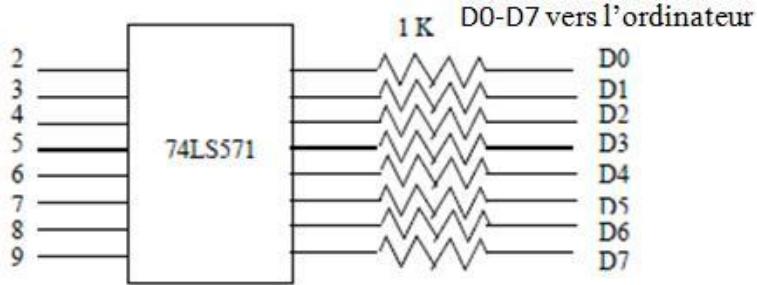


Figure 2-12 Protection du PC en utilisant le CI 74LS571 [14]

4. Doseur

4.1) Seringue

Nous proposons l'utilisation d'une seringue, dont le piston est mue par un moteur pas à pas. Le but est d'obtenir un mouvement contrôlé, et précis. La seringue proposée est proposée à la Fig.2.13. L'actionneur du piston est muni de dents. Le moteur pas à pas fait tourner une roue dentée, qui, en rotation, pousse le piston de la seringue. Le débit de la seringue est alors contrôlé par l'angle de rotation de la roue dentée, et/ou par la vitesse de rotation du moteur.

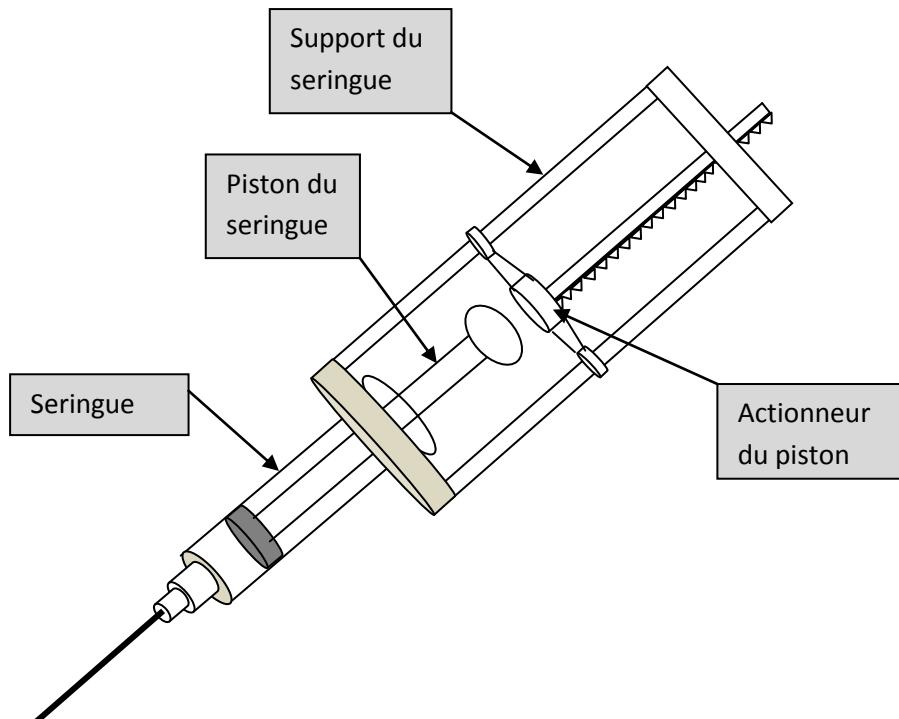


Figure 2-13 Principe de la pompe doseuse

4.2) Le moteur pas à pas

Le moteur pas à pas est un moteur qui tourne en fonction des impulsions électriques reçues dans ses bobinages. Ces signaux définissent un positionnement angulaire incrémental. L'angle de rotation minimal entre deux modifications des impulsions électriques s'appelle « un pas ». On caractérise un moteur par le nombre de pas par tour. La résolution angulaire d'un moteur pas à pas va de 4 à 400 pas [13].

Dans le projet, le but est de positionner la pompe doseuse et de faire varier la vitesse du moteur en fonction des besoins en réactifs dans la solution à doser.

a) Généralités

Il existe trois types de moteurs pas à pas : les moteurs à aimants permanents (unipolaire et bipolaire), les moteurs à reluctance variable et le moteur hybride utilisant à la fois le type à réductance variable mais avec une excitation par aimant permanent.

Malgré les différences existant entre les moteurs, le résultat recherché est l'avance d'un seul pas, c'est-à-dire la rotation de leur axe suivant un angle déterminé à chaque impulsion que l'une ou l'autre de leurs différentes bobines recevra. Cet angle, qui varie selon la constitution interne du moteur, est en général compris entre 0,9° et 90°.

Les moteurs les plus couramment rencontrés présentent des pas de 0,9°, 1,8° et 3,6° correspondant respectivement à 400, 200 et 100 pas par tour. Ou encore 3,6° et 15°, correspondant à 48 et 24 pas par tour.

De par leur technologie, les moteurs pas à pas présentent une très grande précision et une durée de vie très longue, l'usure mécanique étant pratiquement inexiste vu qu'il n'y a pas de frottements. La figure 2.14 représente l'aspect externe d'un tel moteur. Leurs domaines de prédilection seront donc ceux où la précision est de rigueur. Ils existent en différentes tailles qui varient environ entre 1cm et plus d'une dizaine de centimètres de. Le plus petit moteur, par exemple, sera destiné au déplacement des têtes de lecture dans les lecteurs de disquettes ou dans les disques durs ou un couple très faible est requis. Par contre le déplacement du bras d'un robot demandera un couple nettement plus important, donc un moteur de diamètre élevé. Notons que le couple (exprimé en $kg \cdot cm^{-1}$), définit le poids en kilogramme que pourra soulever l'axe d'un moteur pourvu d'un bras de longueur exprimé en cm.

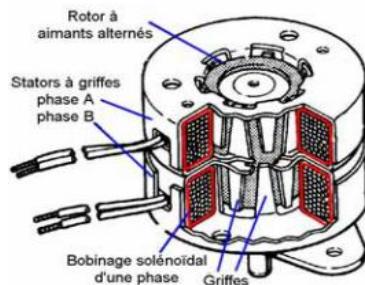


Figure 2-14 Vue d'ensemble d'un moteur pas à pas

Les impulsions électriques sont du type « tout » ou « rien » c'est à dire passage de courant ou pas. Les tensions d'utilisation des moteurs sont de 3,3 à 48 V DC. La consommation en courant varie de 0,2 à 1,5 A selon la résistance de leur bobinage. Donc, plus le courant sera élevé, plus le couple sera important.

b) Les différents types de moteurs

i. Les moteurs à aimants permanents

Il en existe deux sortes : les moteurs unipolaires et les moteurs bipolaires. Nous utiliserons un moteur à aimant permanent unipolaire lors de la partie réalisation. Les moteurs à aimants sont constitués d'un stator supportant les bobinages et d'un rotor magnétique.

La figure 2.15 représente le moteur à aimant dans sa position de repos, lorsque les bobinages ne sont traversés par aucun courant. Chacun des pôles du rotor se place devant une paire des plots du stator.

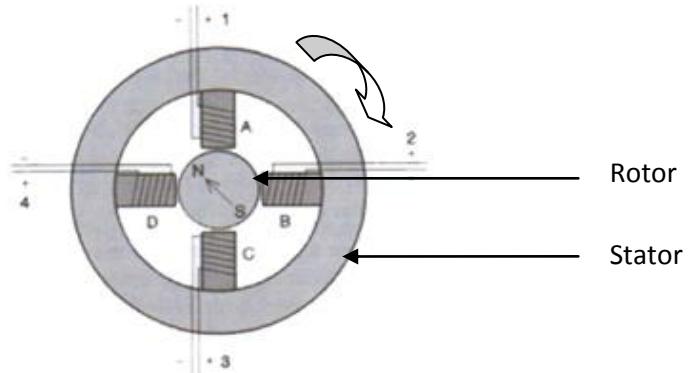


Figure 2-15 Schéma simplifié d'un moteur à aimant [13]

Les schémas de la Fig.2.16 illustrent ce qui se passe lorsque les bobinages sont alimentés à tour de rôle : d'abord A, puis B, puis C et enfin D. Le pôle nord du rotor est attiré par le pôle sud du stator, pôle créé par la circulation d'un courant dans le bobinage.

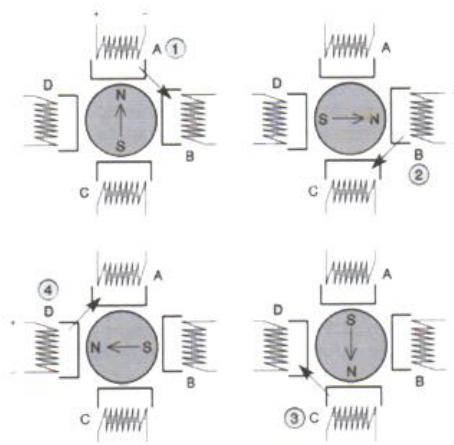


Figure 2-16 Fonctionnement schématique d'un moteur pas à pas [13]

(1) la bobine A est alimenté, puis (2) la bobine B, puis (3) la bobine C et (4) la bobine D.

Cet exemple représente la progression pas par pas du moteur. Ici, il effectue quatre pas par tour.

Une représentation schématisée d'un moteur unipolaire est donnée à la Fig. 2.17. Afin d'inverser le sens du courant, les enroulements sont réalisés au moyen de deux fils dont l'une des extrémités est reliée à la borne négative ou à la borne positive de l'alimentation. La commande de ce type de moteur se fait par alimentation des bobinages à tour de rôle pour faire tourner l'axe d'un pas.

La figure 2.17b résume la séquence la plus simple de la rotation du moteur unipolaire avec un pas de 45° .

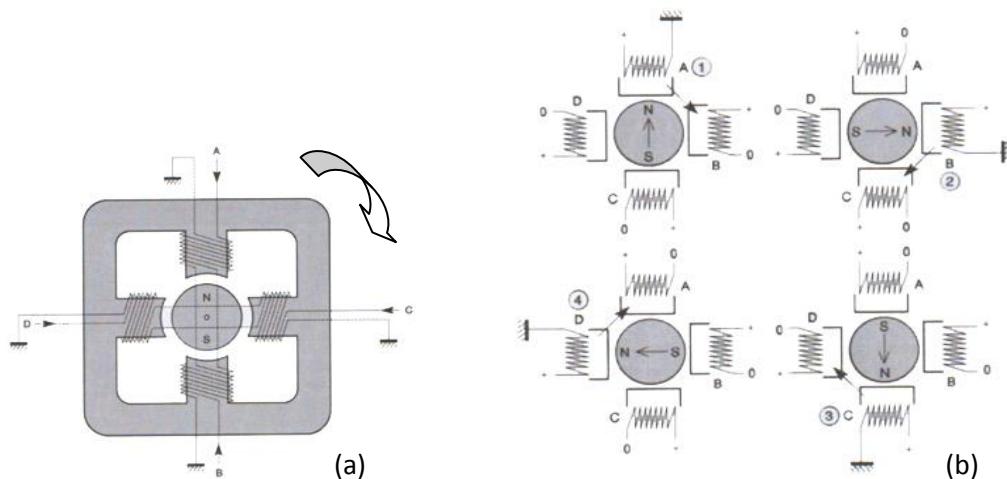


Figure 2-17 (a) : Représentation schématique d'un moteur unipolaire (b): Séquence de rotation simple [13]

Les bornes + indiquent les entrées des impulsions électriques et les bornes 0 la masse. Comme pour chaque type de moteur, le modèle unipolaire peut être commandé en mode monophasé, biphasé ou demi - pas. Le tableau 14 donne l'ordre des différentes commandes. Le chiffre (1) représente une bobine « alimentée » et 0 une bobine « non alimentée ».

Tableau 14 - Ordre des différentes commandes des moteurs unipolaires suivant le mode monophasé, biphasé et demi-pas

Mode monophasé	Mode biphasé	Mode demi-pas
0001	0101	0001
0100	0110	0101
0010	1010	0100
1000	1001	0110
		0010
		1010
		1000
		1001

Notons que le moteur unipolaire présente un couple moins important que le moteur bipolaire, présenté à la section qui suit. On obtient un moteur bipolaire lorsque les enroulements des

plots opposés du stator sont reliés. De cette façon, les plots A et B sont actifs simultanément (*Fig.2.18*). La commande du moteur est donc plus complexe, le courant devant changer de sens dans les enroulements, à chaque pas effectués. Si A présente le pôle Sud, les ordres de commandes sont résumés au *tableau 15*.

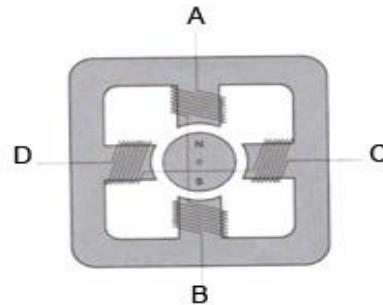


Figure 2-18 Représentation schématique d'un moteur bipolaire

Table 15 - Ordre des différentes commandes des moteurs bipolaires suivant le mode monophasé, biphasé et demi-pas

Mode monophasé	Mode biphasé	Mode demi-pas
AB	AB - CD	AB
CD	BA - CD	ABCD
BA	BA - DC	CD
DC	AB - DC	BACD
AB	AB - CD	BA
		BADC
		DC
		ABDC
		AB

Dans le mode monophasé, le couple n'est pas très important puisqu'un seul enroulement est alimenté pour effectuer un pas. C'est dans le mode biphasé que le moteur développe le plus de puissance c'est-à-dire le couple est élevé car les deux phases seront alimenté dans le même temps. Le mode demi - pas permet de doubler le nombre de pas qu'un moteur peut effectuer par tour, mais cette précision supplémentaire engendre un couple irrégulier. En effet, dans ce mode, la commande du moteur est un mélange de mode biphasé et monophasé. Dans ce cas, si la charge est importante, des pas risquent de sauter, ce qui n'est pas le but recherché.

L'utilisation d'un moteur unipolaire dans le mode biphasé s'avère suffisante pour notre projet.

ii. Les moteurs à reluctance variable

Les moteurs à reluctance variable fonctionnent selon un principe différent de celui des moteurs à aimant permanents. Ils sont composés d'un stator et d'un rotor fabriqué en acier doux non magnétique qui possède plusieurs dents.

La figure 2.19 représente le type de moteur à reluctance variable. On peut voir dans cet exemple, que le stator est composé de 8 plots sur lesquels sont enroulés les bobinages, ce qui donne 4 phases. Le rotor, quant à lui, ne comporte que 6 dents. Il faut remarquer que l'angle de pas du moteur représenté ici se déplace de 15° et non de 45° .

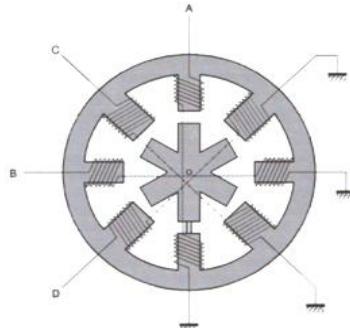


Figure 2-19 Moteurs à reluctance variable

Le principe de fonctionnement est décrit comme suit. L'une des phases alimentant deux des plots opposés du stator est traversée par un courant afin d'aligner deux des dents du rotor avec ces plots. Le mode de commande peut dans ce cas, de la même façon que pour les autres moteurs, être monophasé, biphasé ou demi-pas. Les séquences de commandes sont présentées dans le tableau 16.

Table 16 - Ordre des différentes commandes des moteurs à reluctance variable suivant le mode monophasé, biphasé et demi-pas

Mode monophasé	Mode biphasé	Mode demi-pas
A	AC	A
B	CB	AC
C	BD	C
D	DA	BC
		B
		BD
		D
		DA

On peut remarquer que le type du moteur à reluctance variable est identique à celui du moteur à aimant permanent unipolaire puisque l'une des extrémités de chaque phase est reliée à la borne positive ou négative de l'alimentation. Il n'est donc pas nécessaire d'inverser le courant dans les phases.

iii. Les moteurs hybrides

Ces moteurs fonctionnent fondamentalement sur le principe d'interaction fer sur fer (réductance variable) mais avec une excitation par aimant permanent. Le couple de ces moteurs comprendra les trois composantes fondamentales : couple hybride (prépondérant), couple réducteur et couple de détente. Mais comme dans les moteurs à aimants, c'est le couple hybride qui est prépondérant.

La structure la plus fréquemment rencontrée est la suivante, l'excitation est de type homopolaire produite par un aimant axial unique.

La figure 2.20 représente les différentes structures d'un moteur hybride.

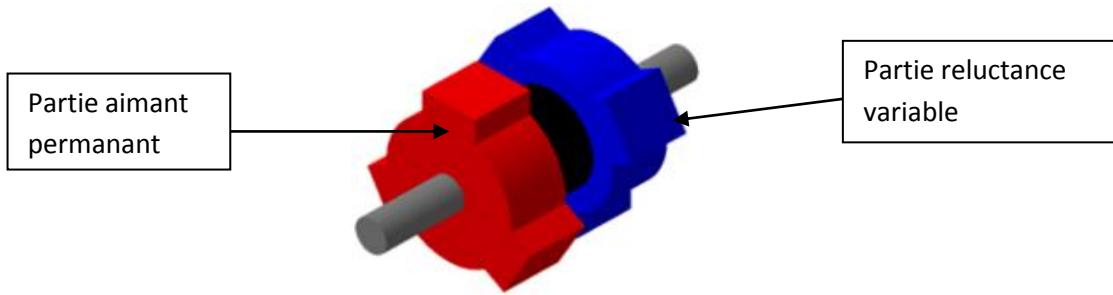


Figure 2-20 Principe interne d'un moteur hybride

Le nombre de dents au rotor est différent de celui du stator. Quand on alimente une paire de bobines, le rotor place les dents Nord et Sud de telle façon que le flux traversant le rotor soit maximal.

Le tableau 17 récapitule une brève comparaison de performance des 3 types de moteurs pas à pas.

Table 17 - Comparaison de performance des trois types de moteurs pas à pas

Type de moteur	Moteur à aimant permanent	Moteur à reluctance variable	Moteur hybride
Résolution (Nombre de pas par tour)	Moyenne	Bonne	Elevée
Couple moteur	élevé	Faible	Elevé
Sens de rotation	Il dépend : Du sens du courant pour le moteur bipolaire De l'ordre d'alimentation des bobines	Il dépend uniquement de l'ordre d'alimentation des bobines	Il dépend : Du sens du courant De l'ordre d'alimentation des bobines
Fréquence de travail	Faible	élevée	élevée

5. Circuit de commande

5.1) Commande par BJT (Bipolar Junction Transistor)

Plusieurs types de commande peuvent être envisagés lorsque l'on met en œuvre des moteurs pas à pas. L'usage du transistor est la méthode la plus simple mais pas obligatoirement la plus efficace. Le mieux sera l'utilisation des circuits intégrés pour ce type d'application [14].

Cette dernière solution est de loin la plus simple à mettre en œuvre mais facilite grandement l'interfaçage entre le moteur et l'organe de commande, que ce soit un ordinateur de type PC ou un microcontrôleur. En effet, l'emploi de transistor nécessite le calcul de séquences à envoyer au moteur lorsqu'on désire inverser le sens de rotation du moteur ou le commander en mode demi-pas.

La figure 2.21 résume, les différentes connexions à réaliser pour la commande d'un moteur unipolaire. On voit qu'il suffit d'alimenter, en reliant à la masse, l'extrémité de l'une des phases,

l'autre extrémité étant connectée en permanence à la borne positive de l'alimentation. Un seul transistor est utilisé pour cette commutation. Le moteur comprenant quatre bobinages, quatre transistors seront utilisés.

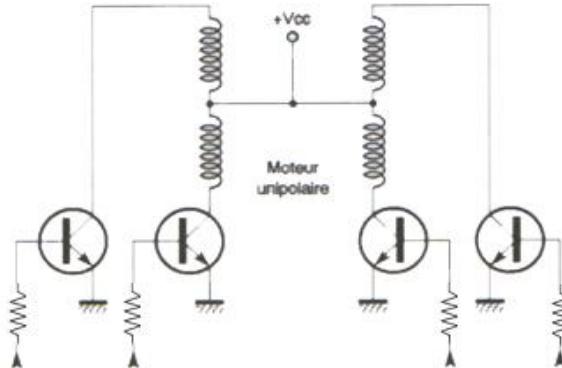


Figure 2-21 Commande d'un moteur unipolaire par transistors [13]

La figure 2.22 représente les commandes nécessaires par les différents types de moteurs. Pour la commande d'un moteur bipolaire, le sens du courant traversant les bobinages devra être inversé à chaque pas effectué par le moteur. Deux solutions sont alors envisageables : dans le premier cas, une alimentation symétrique sera nécessaire (*Fig. 2.22*). Dans le second, une alimentation simple sera utilisée, mais le nombre de transistors sera doublé (*Fig. 2.24*).

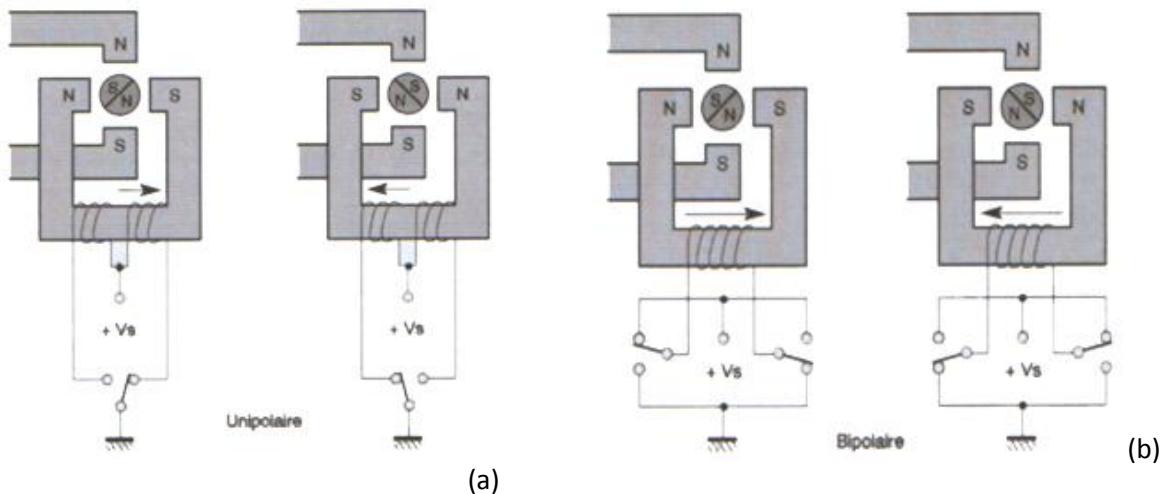


Figure 2-22 Commande des moteurs pas à pas, (a) moteurs unipolaire (b) moteurs bipolaire

A la Fig. 2.23, l'un des pôles de chaque bobinage est connecté à la masse. L'autre extrémité sera elle reliée à un couple de transistors dont la commande séparée l'amènera soit au potentiel positif, soit au potentiel négatif de l'alimentation. On obtiendra alors une inversion de courant dans la bobine.

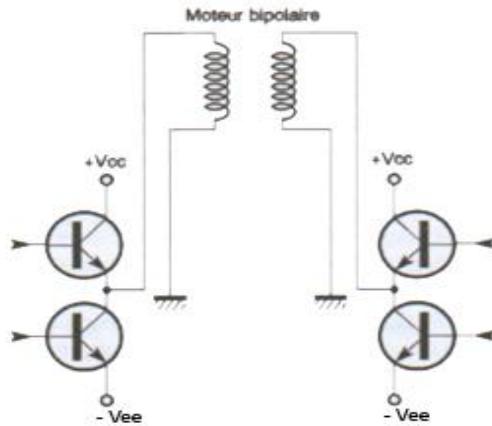


Figure 2-23 Commande de moteur bipolaire avec alimentation symétrique

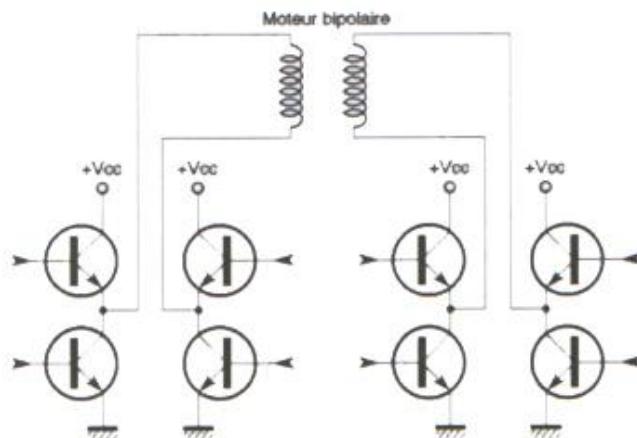


Figure 2-24 Commande d'un moteur bipolaire avec alimentation simple [14]

5.2) Commande d'un moteur par l'utilisation des circuits intégrés

Il est possible, au moyen de circuits logiques, de simplifier le logiciel de commande des moteurs pas-à-pas. Seulement, il ne suffit pas de piloter le moteur. Il est nécessaire d'utiliser 4 bits pour les différentes séquences, auxquels il faut calculer auparavant. Il serait très pratique de disposer d'un circuit qui permette, au moyen de 2 bits, de commander l'avance des pas ainsi que le sens de rotation.

6. Le logiciel de commande « DoAO » ou « Dosage Assisté par Ordinateur »

Comme décrit au chapitre précédent, l'appareillage de mesure du *pH* est commandé par un ordinateur, via le port parallèle. Les données issues des mesures, pour être stockées et traitées, transitent aussi par le port parallèle. Le logiciel DoAO qui assure tout le travail. Il est écrit en C++.

6.1) Le langage C++

a) Généralité

Le *C++* est l'un des langages de programmation les plus utilisés actuellement. Par sa facilité d'utilisation, son efficacité, il souffre cependant de la réputation d'être compliqué et illisible. Cette réputation est en partie justifiée. La complexité du langage est inévitable lorsqu'on cherche à avoir beaucoup de fonctionnalités [15]. Les caractéristiques du *C++* en font un langage idéal pour certains types de projets. Les optimisations des compilateurs actuels en font également un langage de prédilection pour ceux qui recherchent les performances. Enfin, le langage *C++* est idéal pour ceux qui doivent assurer la portabilité de leurs programmes au niveau des fichiers sources non pas des exécutables.

b) Les avantages du langage C++

Les principaux avantages du *C++* sont les suivants : il possède un grand nombre de fonctionnalités, en plus, il hérite les performances du *C* ; il est facile d'utiliser des langages objets avec le *C++* ses fichiers sources sont portable. Outre cela, il est facile de convertir des programmes *C* en *C++*, et, en particulier, il y a possibilité d'utiliser toutes les fonctionnalités du langage *C*, y compris les contrôles d'erreurs.

6.2) La MFC

La *MFC* (*Microsoft Foundation Classes*) est une bibliothèque de classes *C++* qui encapsulent les différentes fonctions notamment de gestion des fenêtres ou de messages, propres à Windows. On dit aussi que les classes *MFC* encapsulent l'*API* (*Application Programming Interface*) Windows. Par exemple, la classe *CWnd* va encapsuler toutes les fonctions et les structures de données nécessaires à la gestion des fenêtres. Les différentes fenêtres, les menus, les barres d'outils, ou les contrôles d'une application sont vus comme des objets instanciés à partir des classes *MFC* ou de classes dérivées des classes *MFC*. L'écriture d'un programme Windows va consister alors à créer des classes et à gérer des instances de celles-ci.

La programmation Windows repose sur la compréhension de quelques principes de base liés à Windows ainsi que sur la bonne utilisation des différents assistants, ainsi que des différentes fonctionnalités de l'environnement de développement Visual *C++* (navigation dans les classes, dans les fichiers, les options de compilation ...).

La ligne de code de la *MFC* est peu nombreuse par rapport à celle de l'*API*. La création d'interface est plus facile avec la *MFC* et comme la *MFC* hérite la bibliothèque *API* et même la classe, il suffit d'ajouter le code de l'utilisateur dans la classe prédefinie. Mais le programme compilé avec *MFC* est lent à cause de son héritage de la bibliothèque *API*. La taille du fichier exécutable est aussi très grande.

6.3) Le Logiciel « DoAO »

a) Les principes fondamentaux

Le schéma synoptique de la *Fig.2.25* indique la relation entre logiciel et port parallèle. L'interface entre le logiciel et le port parallèle est le registre.



Figure 2-25 Relation entre logiciel et port parallèle

La *figure 2.26* explique le détaille de l'acheminement de donnée ou des commande. Le protocole pour le port parallèle est simple.



Figure 2-26 Variation du type de variable

Au niveau système d'exploitation, l'accès au port parallèle est facile pour « *Windows 98* » car ce système d'exploitation ouvre automatiquement le registre qui contient l'adresse de ce port. Mais pour les systèmes d'exploitation comme *Windows 2000*, *Windows XP SP2*, *Vista* et *Windows7*, l'accès à ces registres a besoin d'un fichier **DLL (Dynamic Link Library)** qui peut ouvrir cette voie d'accès. Il y a plusieurs fichiers *DLL* qu'on peut utiliser mais on a choisi **INPOUT32.DLL** [16]. Ce fichier *DLL* peut envoyer des données au port parallèle et peut y recevoir les données. Si on utilise ce **DLL**, il y a plusieurs modifications au niveau du **fichier.cpp**. Quatre étapes doivent être suivies pour que le **DLL (INPOUT32.DLL)** fonctionne avec *C++*:

- Ajouter les deux lignes de codes ci-dessous juste après les préprocesseurs pour charger les deux fonctions **Inp32()** et **Out32()** :

```
{ short_stdcall Inp32(short portaddr);  
void_stdcall Out32(short portaddr, short datum);
```

- Changer les **_inp()** et **_outp()** respectivement par **Inp32()** et **Out32()**.
- Copier le fichier **DLL inpot32.dll** au même dossier que le fichier exécutable et le **fichier .lib inpot32.lib** au même dossier que les fichiers sources.

A la liaison projet, il faut ajouter à la librairie le fichier **inpot32.lib**.

b) Algorithme de calcul général

Ici, le **Timer** joue un rôle très important parce qu'au lieu d'utiliser une boucle, le **Timer** est le mieux pour lancer plusieurs processus en même temps. L'organigramme représenté par la Fig.2.27 nous montre en général le fonctionnement de ce logiciel.

En premier lieu, le processus commence par la mesure du *pH* et de la température initiale. Ensuite, la saisie du *pH* à rechercher et enfin le programme compare le *pH* initiale et le celui à rechercher. Si le *pH* initial est inférieure au *pH* voulu : le moteur *B* agit et pousse la seringue qui contient la solution basique. Dans le cas contraire, c'est le moteur *A* qui agit et qui pousse la seringue contenant la solution acide.

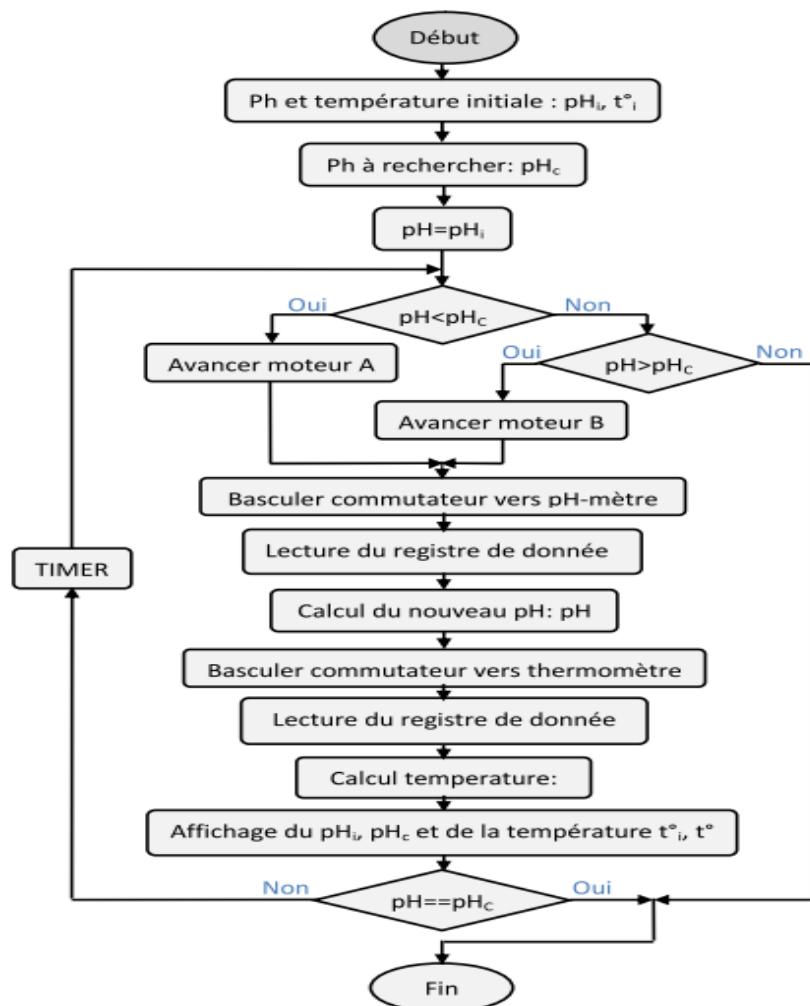


Figure 2-27 Organigramme du fonctionnement du logiciel

c) Calcul du pH

i. Algorithme de calcul du pH

L'algorithme de calcul du *pH* est donné à la Fig.2.28.

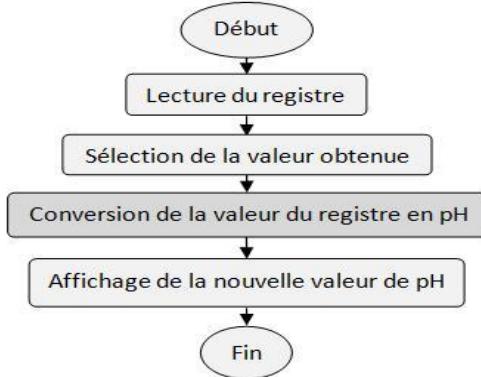


Figure 2-28 Algorithme de calcul du Ph

ii. Extrait du code de la fonction utilisée dans le calcul du pH

Le registre utilisé est un registre de donnée à huit bits. Donc on a une plage de 0 à 255. Pour avoir la valeur de pH à un chiffre après la virgule, il faut grouper par 18 la valeur lue dans le registre. Voici un extrait du programme illustrant ceci [17].

```

double Select( int RegpH)
{
    double ValpH,h1;
    int Kr;
    if(RegpH >=0 && RegpH <18){
        Kr = 18- RegpH; h1 = calcul (Kr); ValpH =h1;
    }
    else if(RegpH >=18 && RegpH <36){
        Kr = 36- RegpH; h1 = calcul(Kr); ValpH =1+h1;
    }
    . . .
    . . .
    else if(k RegpH >=234 && RegpH <252){
        Kr = 252- RegpH; h1 = calcul(Kr); ValpH = 13+h1;
    }
    else if(RegpH >=252 && RegpH <=255) {
        ValpH = 14;
    }
    return k1;
}

```

Après avoir sélectionné la valeur du registre pour donner une valeur qu'on peut convertir, il suffit de passer à la dernière étape qui est la conversion. L'extrait du code de la fonction conversion *pH* ci-après nous montre comment convertir la valeur lue dans le registre.

```

double ConversionpH(int pHSelect)
{
    double ValpH;// ValpH est la valeur du Ph après conversion
    switch (pHSelect)
    {
        case 0: ValpH =0.9;break;
        case 1: ValpH =0.9;break;
        case 2: ValpH =0.8;break;
        . . .
        . . .
        case 16: ValpH =0.1;break;
        case 17: ValpH =0.1;break;
        case 18: ValpH =0;break;
    }
    return ValpH;
}

```

d) Calcul de la température

i. Algorithme de calcul de la température

Comme le calcul du pH, le registre utilisé est un registre de huit bits. Donc on a aussi une plage de 0 à 255. Ici la plage de température donnée par le capteur est de 0°C jusqu'à 128°C . Donc, il suffit de convertir la valeur lue (valeur numérique de la température) dans le registre. La *Figure 2.29* montre par cet organigramme l'algorithme du traitement de la température.

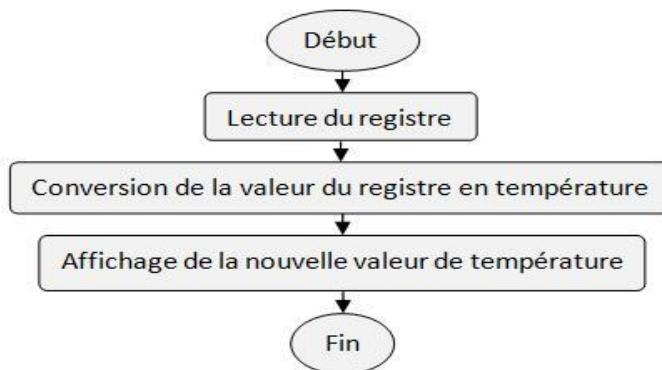


Figure 2-29 Organigramme du calcul de la température

ii. Extrait du code de la fonction traitant la conversion

La lecture du registre pour la température nous amène directement à la conversion des valeurs lues. Le programme ci après montre la fonction de conversion de la valeur du registre en température.

```

double ConversionTemperature(int RegTemp)
{
    double ValTemp;
    switch (RegTemp)
    {
        case 0: ValTemp =0;break;
        case 1: ValTemp =0;break;
        case 2: ValTemp =1;break;
        . . .
        . . .
        case 253: ValTemp =126;break;
        case 254: ValTemp =127;break;
        case 255: ValTemp =128;break;
    }
    return ValTemp;
}

```

e) Algorithme de commande du moteur

On a déjà vu que pour commander un moteur pas à pas, il faut alimenter successivement ses pôles : soit un à un, soit deux à deux, soit deux phases suivie d'une phase et ainsi de suite selon le mode utilisé.

Au niveau logiciel, c'est le même principe qu'au niveau matériel, seulement, on écrit dans le registre de contrôle en précisant son adresse c'est-à-dire qu'on envoie une valeur soit en hexa soit en décimale. Au niveau du registre, cette valeur est sous forme binaire (niveau haut ou niveau bas). Au niveau des broches correspondantes, cela est équivalents à un niveau de tension aux broches :

Soit 0v ou 5v.

Et ce sont ces niveaux de tension qui déclenchent l'alimentation de la phase qui avancent d'un pas le moteur. Par exemple, en mode biphasé, on alimente deux phases en même temps pour faire avancer d'un pas le moteur. C'est-à-dire la valeur nécessaire pour le premier pas est de 0101. Ici on alimente la première et la troisième phase. La vitesse de rotation du moteur est donc dépendante de la vitesse de tour d'alimentation des phases.

i. Algorithme pour faire avancer le moteur

L'algorithme de contrôle pour faire tourner le moteur est représenté par la figure (Fig. 2.30).

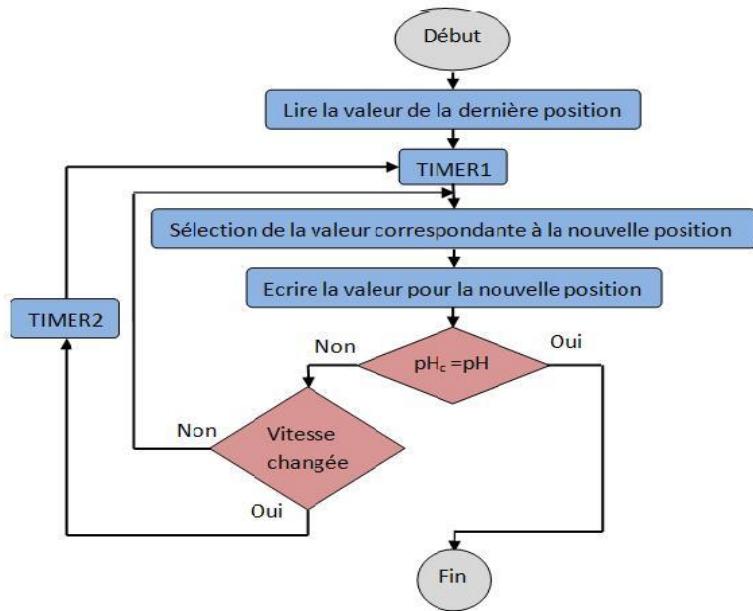


Figure 2-30 Algorithme de contrôle pour faire avancer le moteur

ii. Algorithme pour remettre le moteur à son position initial

Pour que le moteur revienne à sa position initiale, l'algorithme de calcul est représenté comme suit (Fig.2.31) : Pour ces deux algorithmes le « **TIMER2** » est utilisé pour varier la fréquence du « **TIMER1** » qui assure le changement de la vitesse de rotation du moteur selon le choix de l'utilisateur.

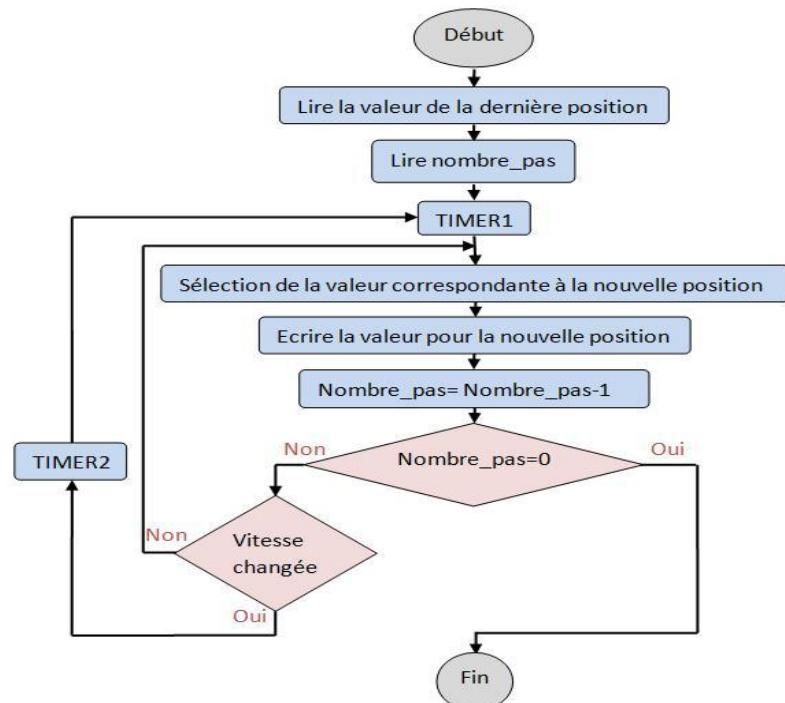


Figure 2-31 Algorithme de remise à position initiale du moteur

iii. Fonction déterminant la sélection de la valeur correspondante à une nouvelle position

La fonction pour la sélection de la séquence de commande d'avancement du moteur est définie ci-dessous :

```
int stepmotor(int step)
{
    int newstep;
    if(step ==5) {
        newstep =6;motor(newstep);
    }
    else if(step ==6){
        newstep =10;motor(newstep);
    }
    else if(step ==10){
        newstep =9;motor(newstep);
    }
    else if(step ==9){
        newstep =5;motor(newstep);
    }
    return newstep;
}
```

Et ci après la fonction pour la sélection de la séquence de commande du reset moteur :

```
int stepmotor(int step)
{
    int newstep;
    if(step ==5) {
        newstep =9;motor(newstep);
    }
    else if(step ==9){
        newstep =10;motor(newstep);
    }
    else if(step ==10) {
        newstep =6;motor(newstep);
    }
    else if(step ==6){
        newstep =5;motor(newstep);
    }
    return newstep;
}
```

f) Relation entre les broches du port parallèle avec le contrôle du logiciel

A cause de l'inexistence de certains composants électroniques, l'utilisation de deux ports parallèles est incontournable. Pour le premier port parallèle : les broches N°2-9 sont réservées pour

l'entrée de la donnée *pH* et température, les broches N°14,16 et 17 sont respectivement utilisées pour la commande du *CAN*, la commande pour basculer le commutateur au thermomètre avec sa tension de référence nécessaire à sa conversion et celles du PH-mètre avec sa tension de référence.

Pour le deuxième port parallèle les broches N° 2 à 5 sont utilisées pour commander le moteur *A* qui injecte la substance acide. Mais on commande le moteur *B* qui injecte la substance basique en utilisant les broches N°1, 14, 16 et 17. Les *tableaux 18 et 19* nous montrent les résumés des commandes et des valeurs utilisées dans le programme.

Table 18 - La commande du CAN, du thermomètre, et du pH-mètre avec les valeurs entrantes du registre de contrôle

N° Broches			17	16	14	1	Valeur entrante
N° Bits	5	4	3	2	1	0	
pH-mètre, tension de référence et CAN	1	0	0	0	1	1	35
Sortie Numérique du pH	1	0	0	0	0	1	33
Thermomètre, tension de référence et CAN	1	0	1	1	1	1	47
Sortie Numérique de la température	1	0	1	1	0	1	45

Table 19 - La commande du CAN, du thermomètre, et pH-mètre avec les valeurs sortantes du registre de contrôle

N° Broches			17	16	14	1	Valeur sortante
N° Bits	5	4	3	2	1	0	
pH-mètre, tension de référence et CAN	1	0	1	0	0	0	40
Sortie Numérique du pH	1	0	1	0	1	0	42
Thermomètre, tension de référence et CAN	1	0	0	1	0	0	36
Sortie Numérique de la température	1	0	0	1	1	0	38

Pour le deuxième port parallèle les broches N° 2 à 5 sont utilisées pour commander le moteur *A* qui verse la substance acide. Et on commande le moteur *B* qui injecte la substance basique en utilisant les broches N°1, 14, 16 et 17. Les détails sont énoncés dans le *tableau 20*.

Table 20 - Commandes du moteur B qui verse la substance basique

Phases	Programme				Valeurs Entrantes du registre	Broches correspondantes du port				Valeur Sortante du registre \overline{DCBA}
	D	C	B	A		D	C	B	A	
N° pins	17	16	14	1		17	16	14	1	
N° Bits	3	2	1	0		3	2	1	0	
1 ^{er}	1	1	1	0	14	0	1	0	1	5
2 ^e	1	1	0	1	13	0	1	1	0	6
3 ^e	0	0	0	1	1	1	0	1	0	10
4 ^e	0	0	1	0	2	1	0	0	1	9

Le *tableau 21* nous montre les commandes de remise en position du moteur *B*.

Table 21 - Commandes de remise à la position initiale du moteur qui verse la substance basique

Phases	Programme				Valeurs Entrantes du registre	Broches correspondantes du port				Valeur Sortante du registre \overline{DCBA}
	D	C	B	A		D	C	B	A	
N° pins	17	16	14	1		17	16	14	1	
N° Bits	3	2	1	0		3	2	1	0	
1 ^{er}	0	0	1	0	2	1	0	0	1	9
2 ^e	0	0	0	1	1	1	0	1	0	10
3 ^e	1	1	0	1	13	0	1	1	0	6
4 ^e	1	1	1	0	14	0	1	0	1	5

Et enfin, sur le *tableau 22* on trouve les commandes du moteur A.

Table 22 - Commandes du moteur qui verse la substance acide

Avancer le moteur					Valeurs envoyées	Retourner le moteur					Valeur envoyée
Phases	D	C	B	A		Phases	D	C	B	A	
N° pins	5	4	3	2		N° pins	5	4	3	2	
N° Bits	3	2	1	0		N° Bits	3	2	1	0	
1 ^{er}	0	1	0	1	5	1 ^{er}	1	0	0	1	9
2 ^e	0	1	1	0	6	2 ^e	1	0	1	0	10
3 ^e	1	0	1	0	10	3 ^e	0	1	1	0	6
4 ^e	1	0	0	1	9	4 ^e	0	1	0	1	5

g) Les adresses des registres nécessaires à ces commandes

Le *tableau 23* indique les adresses du registre utilisé.

Table 23 - Adresse du registre utilisé

	Adresse du registre	Port parallèle	Mode utilisée
Donnée du pH et de la température	0x378	LTP 1	EPP
Commande CAN, Commutateur	0x37A	LTP 1	
Commande moteur A	0xE000	LTP 3	SPP
Commande moteur B	0xE002	LTP 3	

h) L'interface du logiciel « DoAO »

L'interface utilisateur de ce logiciel est composée des boutons de contrôles, une barre de contrôle de la vitesse du moteur et le débit du produit versé, elle a aussi d'une zone d'écriture et des zones d'affichages. En général, ce logiciel est auto explicatif, à chaque clique sur un bouton quelconque, on a un message qui nous aide sur tous les boutons de contrôles générales du processus (Initialiser, Démarrer, Pause, continuer et Stop). Les boutons de contrôles du moteur sont indépendants du contrôle général du processus. La *figure 2.32* nous montre l'interface utilisateur.

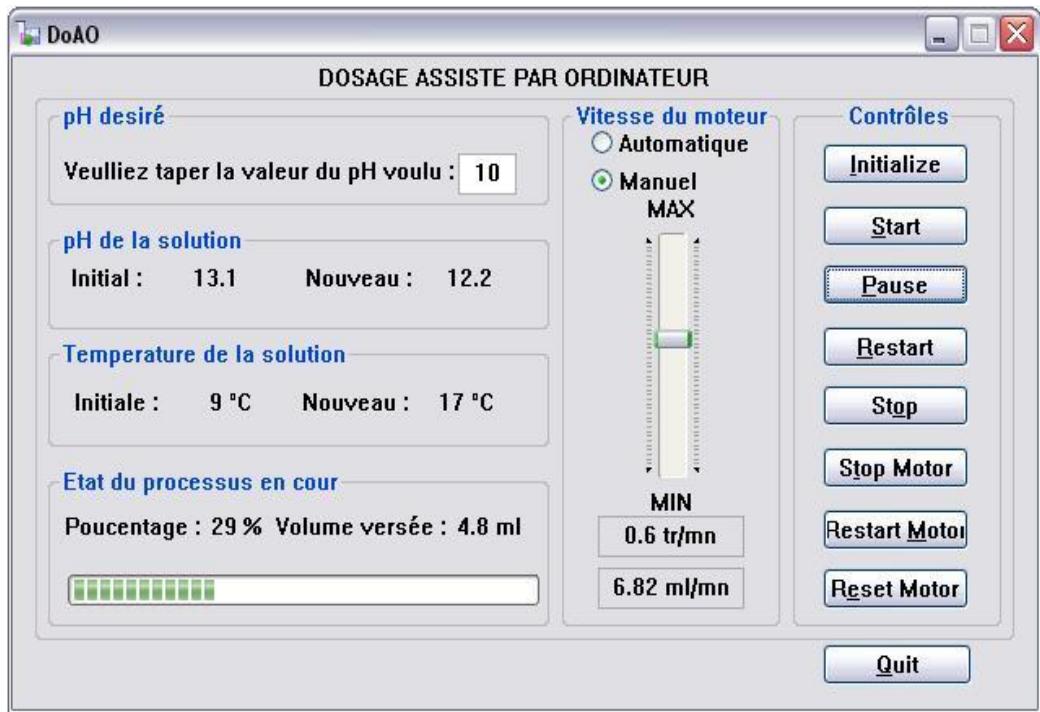


Figure 2-32 Interface utilisateur du logiciel « DoAO »

i) Caractéristiques du logiciel « DoAO »

Comme tous les logiciels, le logiciel « DoAO » doit être installé en avance.

Configuration logicielle :

- Système d'exploitation requise : Windows XP SP2 ou version antérieure
- Logiciel requis : Microsoft .Net Framework 3.5

Configuration minimum du matériel :

- Pentium III ou équivalent
- Mémoire vive : 256 Mo
- Espace disque : 100 Mo

CONCLUSION

Un système de dosage acido-basique commandé par *PC* a été conçu dans ce travail. La quantité d'acide ou de base à ajouter à la solution à doser est contrôlée par le *PC*, via un moteur pas à pas qui actionne le piston de la seringue. La valeur instantanée du *pH* et de la température sont envoyée au *PC* grâce à un système de retour lié à l'électrode (pour le *pH*) et au capteur (pour la température).

L'introduction de réactif dans la solution à doser sera arrêtée dès que le *pH* voulu est atteint. L'interfaçage microordinateur/système de dosage se fait par deux ports parallèles qui assurent l'entrée et la sortie des données. Le logiciel pilotant le système est écrit en langage C++ compilé en Visual Studio 2008 grâce à l'existence de nombreux styles pour la création d'interface utilisateur. Ce logiciel est aussi tourné avec le microprocesseur *Pentium III* au minimum ou équivalent, mémoire vive : 256 Mo et espace disque : 100 Mo pour tourner correctement. A cause de l'insuffisance d'entrée/sortie d'un port parallèle, dans ce projet on devra utiliser deux ports parallèles.

On peut étendre le principe de commande et de fonctionnement du système, à d'autres systèmes chimiques, ou certains paramètres (autre que le *pH*) sont à mesurer ou à atteindre. Comme par exemple la conductivité électrique d'une solution organique semi conducteur.

ANNEXE A. L'étalonnage (calibrage) de la chaîne de mesure en pH-métrie

Principe

Il est nécessaire de faire un étalonnage avant de procéder à des mesures de pH sur des échantillons à pH inconnus, car la méthode utilisée est relative. D'autre part, les caractéristiques des électrodes peuvent être différentes en fonction des fabricants et des modèles, peuvent avoir une certaine dispersion dans une même série et peuvent évoluer dans le temps en fonction de leur vieillissement et des conditions d'utilisation.

L'étalonnage permet donc de faire coïncider les paramètres de calcul du pH-mètre aux caractéristiques courantes de ou des électrodes utilisées. Et la loi de Nernst indique que l'électrode de verre doit avoir une réponse en millivolts linéaire en fonction du pH . Toute droite étant déterminée par deux points, il faudra donc au moins deux points d'étalonnage. Cela permettra donc de déterminer deux paramètres, la pente (sensibilité) et le pH_0 (pH pour lequel le pH-mètre mesure 0 mV), caractéristiques du système d'électrodes utilisées. Si plus de deux solutions étalons sont utilisées pour l'étalonnage, la droite d'étalonnage sera déterminée par le pH-mètre par régression linéaire.

Cas pratique

Pour les pH-mètres munis d'un potentiomètre de réglage, les principes sont :

Le réglage du premier point d'étalonnage est un décaleur de potentiel, qui déplace la droite d'étalonnage parallèlement à elle-même.

Le réglage du deuxième point d'étalonnage est un correcteur de gain ou de pente, qui fait pivoter la courbe autour du point de coordonnées (pH_{iso} , E_{iso}) (Fig A1). Ce réglage a le même effet que le réglage du correcteur de température.

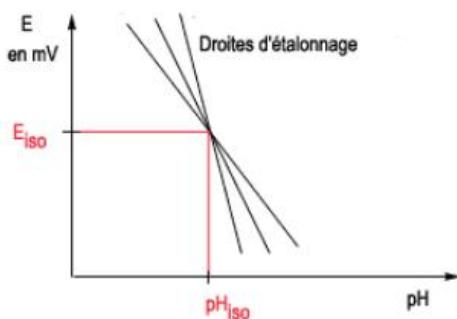


Figure A.1 : les droites d'étalonnage

Le résultat de l'étalonnage d'une chaîne de mesure en pH-métrie à une température donnée, est une droite d'étalonnage déterminée par deux paramètres, sa pente représentant la sensibilité de la membrane de verre et son pH_0 pour lequel le pH-mètre mesure 0 mV, voir (Fig A2).

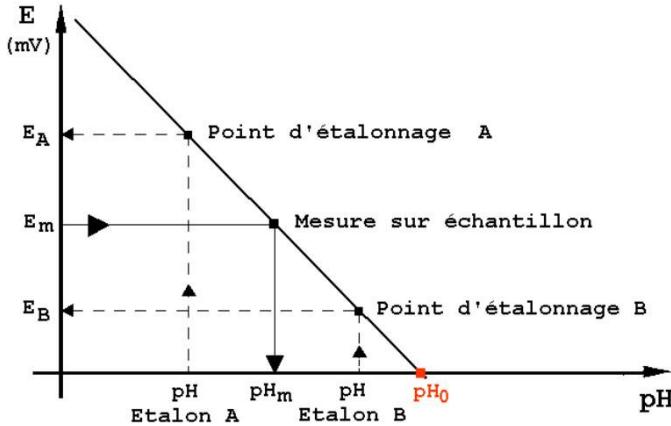


Figure A.2 : Droite d'étalonnage sur deux points en pH-métrie

La différence de potentiel E_T , mesurée par le pH-mètre aux bornes de l'électrode de verre et de l'électrode de référence, à une température T fixée, est définie par la Loi de Nernst :

$$E_T = E_{verre} - E_{ref} = E'_T - R \cdot \frac{T}{F} \cdot \ln[a_{H+}]_T$$

Ou :

E_{verre} : Valeur du potentiel de l'électrode de verre,

E_{ref} : Valeur du potentiel de l'électrode de référence,

E'_T : Constante dépendant de la température,

R : Constante des gaz parfaits ($8,3144\text{ J/K}$),

T : Valeur de la température de mesure en Kelvin,

F : Constante de Faraday,

$\ln[a_{H+}]_T$: Logarithme népérien de la valeur de l'activité des ions H^+ à la température T .

En utilisant le logarithme décimal, cette relation devient :

$$E_T = E'_T - 2,303 \cdot R \cdot \frac{T}{F} \cdot \log[a_{H+}]_T$$

Le pH étant défini par la relation $pH_T = -\log [a_{H+}]_T$, la valeur du pH d'une solution à une température T , pH_T , peut être exprimée par la relation suivante :

$$pH_T = pH_{0T} - \frac{E_T}{(R' \cdot S \cdot T)}$$

Où pH_{0T} est la valeur du pH pour lequel le pH-mètre mesure un potentiel de 0 mV aux bornes des électrodes (premier paramètre de l'étalonnage) ; R' une constante ($0,1984\text{ mV/K}$) donnant la pente théorique $R' \cdot T$ d'une électrode de verre parfaite égale à $59,16\text{ mV}$ par unité pH à 25°C ; S est la sensibilité, appelé aussi facteur de correction qui prend en compte la différence de réponse entre l'électrode de verre utilisée et la réponse théorique d'une électrode de verre parfaite (deuxième paramètre de l'étalonnage dont la valeur se situe généralement entre 95 % et 100 %). Par conséquent, lorsqu'un étalonnage sur 2 points est effectué avec 2 solutions étalons de valeur pH_A et pH_B , toutes deux à une température donnée, les valeurs de potentiels E_A et E_B mesurées sont régies par les relations :

$$pH_A = pH_0 - \frac{E_A}{(R' \cdot S.T)}$$

$$pH_B = pH_0 - \frac{E_B}{(R' \cdot S.T)}$$

Les deux paramètres de l'étalonnage, pH_0 et S , sont calculés et mémorisés par le pH-mètre, et correspondent donc à :

$$S = \frac{-(E_A - E_B)}{[(pH_A - pH_B) \cdot R' \cdot T]}$$

$$pH_0 = \frac{pH_A - E_A \cdot (pH_A - pH_B)}{(E_A - E_B)}$$

Exemple d'étalonnage d'un pH-mètre

Voici un exemple d'étalonnage d'un pH-mètre, (Fig A3)

- a) • Avec le bouton 1 est sur la position "0".
 - Régler le bouton 2 sur la température des solutions.
 - Régler les boutons 3 et 4 à mi-course.
 - Placer la sonde au-dessus d'un verre à pied: rincer la sonde à l'eau distillée.
- b) • Mettre dans un godet un peu de solution étalon pH = 7,0.
 - Plonger entièrement l'extrémité de la sonde dans cette solution.
 - Régler le bouton 1 sur "pH", agiter doucement le godet autour de l'extrémité de la sonde.
 - Avec le bouton 4, régler l'affichage du pH mètre sur la valeur 7,0. Ne plus toucher le bouton 4.
 - Remettre le bouton 1 sur "0". Retirer la sonde du godet et remettre la solution dans le flacon.
 - Rincer la sonde à l'eau distillée.
- c) • Mettre dans un godet un peu de solution étalon pH = 4,0.
 - Plonger entièrement l'extrémité de la sonde dans cette solution.
 - Régler le bouton 1 sur "pH", agiter doucement le godet autour de l'extrémité de la sonde.
 - Avec le bouton 3, régler l'affichage du pH-mètre sur la valeur 4,0. Ne plus toucher le bouton 3.
 - Remettre le bouton 1 sur "0". Retirer la sonde du godet et remettre la solution dans le flacon.
 - Rincer la sonde à l'eau distillée et la sécher.
- d) • Le pH-mètre est prêt pour faire des mesures de pH. Il ne faut plus toucher aux boutons 3 et 4 pendant toute la durée des mesures.

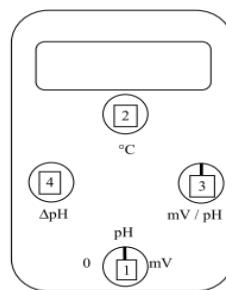


Figure A.3 : exemple d'un pH-mètre standard

ANNEXE B. L'échantillonneur-Bloqueur (Sample and Hold System) ou Circuit d'échantillonnage et de mémorisation

D'une manière générale, un système d'acquisition de donnée reçoit des signaux provenant de deux sources variées, pour les transmettre sous une forme appropriée un ordinateur ou un canal de communication. Un multiplexeur sélectionne chaque signal dans une séquence. Puis le signal analogique est transféré en tension continue pendant le temps d'échantillonnage (*Gating time Interval*) par l'Echantillonneur Bloqueur. Cette tension constante à la sortie de l'Echantillonneur Bloqueur peut alors être converti en signal numérique par un *CAN* (*ADC: Analogue Digital Converter*) pour transmission numérique.

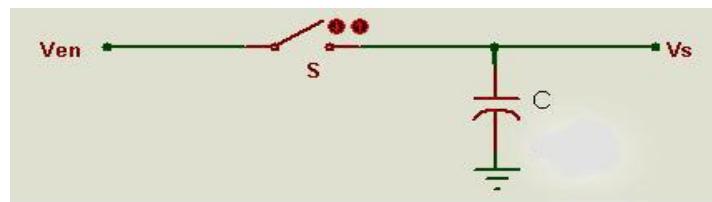


Figure B.1 : Principe d'un échantillonneur bloqueur

Où S est un circuit de commande

La tension aux bornes du condensateur C suit les variations instantanées de V_{en} pendant l'intervalle de temps T_g durant lesquels un circuit de commande ferme S . A la fin de T_g , S est ouvert et C retient la dernière valeur de V_{en} (mémorisation)

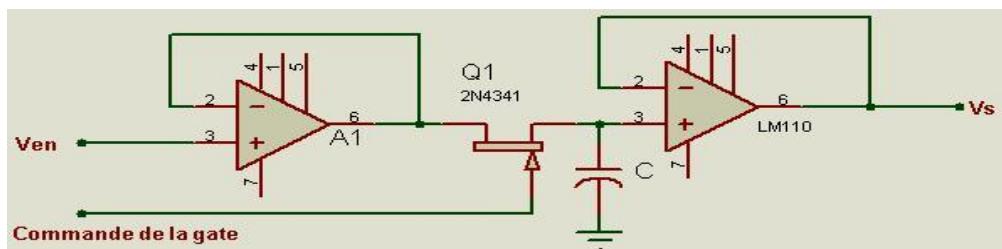


Figure B.2 : Circuit pratique d'un échantillonneur bloqueur

Réalisation : Un impulsion positive à la gate de *nJFET* ferme le circuit et le condensateur se charge à la valeur $V_{en} (t)$ avec la constante de temps $C(r_s+r_0)$.

Où : - r_s est la résistance de sortie d'A1
 - r_0 est la résistance interne de *nJFET* qui est fonction des paramètres physiques du *FET*, N_D , μ_n , W ,

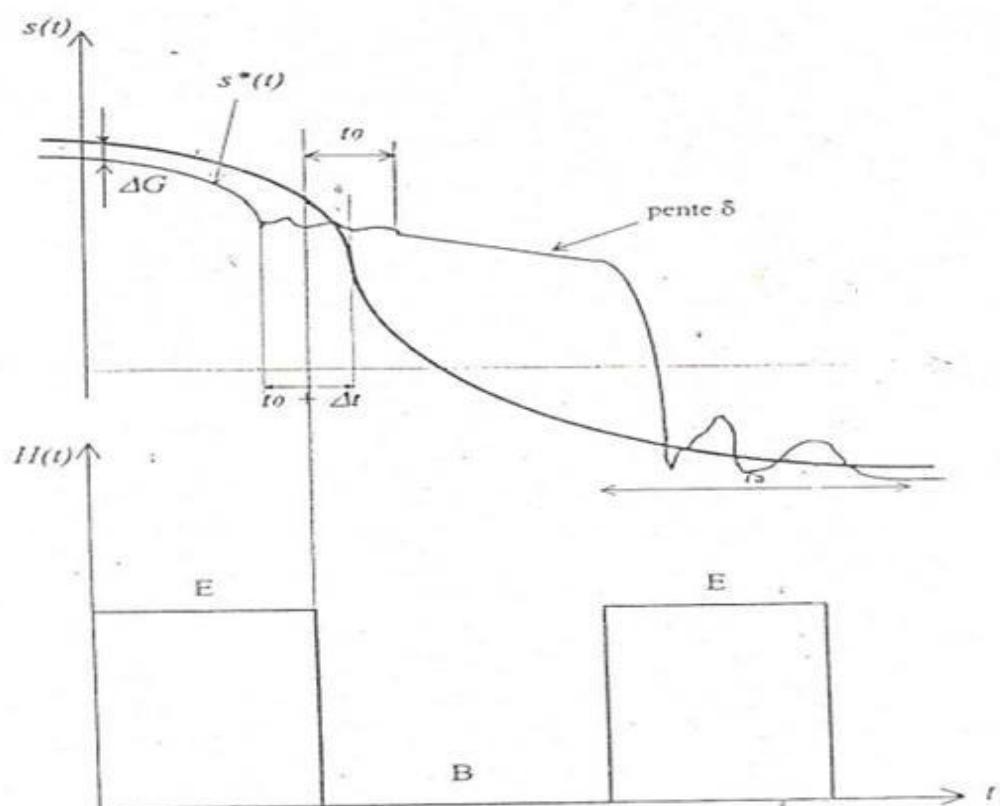
Lorsque l'impulsion positive cesse, l'interrupteur et l'amplificateur opérationnel LM110 isolent le condensateur C de toute charge. La dernière valeur de $V_{en} (t)$ est mémorisée. On a intérêt à utiliser un condensateur de bonne qualité : Mylar, teflon.

Deux facteurs méritent d'être mentionnés :

Le temps d'ouverture (Aperture time) de la valeur typique inférieure à 100ns (*Fig B3*). C'est l'intervalle de temps entre l'application de l'impulsion et l'instant réel de fermeture S.

Le temps d'acquisition (Acquisition time) ou temps d'établissement : C'est le temps nécessaire au condensateur C de pour charger du niveau de tension retenue au niveau de la tension $V_{en}(t)$ lorsque S est fermé. Pour $C=1000\text{ pF}$, il est de l'ordre de quelque μs . Quand r_s tend vers 0 (zéro), le temps d'acquisition est limité par r_o et par le courant maximum de e débité A_1 . La tension V_S varie avec un taux maximum qui est égale à $\frac{dVc}{dt} = \frac{I}{C}$

Où I est de l'ordre de 25 mA pour l'Amplificateur opérationnel 741.



E : échantillonneur (*Sample*)

δ : décroissance de maintien (*Hold mode drope*)

B : bloqueur (*Hold*)

t_a : temps d'acquisition (*Acquisition time*)

ΔG : erreur de gain (*Gain error*)

Δt : incertitude sur l'instant d'ouverture (*Jitter*)

t_0 : temps d'ouverture (*Aperture time*)

Figure B.3 Représentation des défauts d'un SHS réel

ANNEXE C. Les différents principes de fonctionnement des CAN

1. Le convertisseur à équilibre de charge ou incrémental

Le convertisseur incrémental est dérivé de l'intégrateur double rampe. Il utilise le principe des capacités commutées et est donc particulièrement bien adapté à une réalisation en technologie *CMOS*. Son principe consiste à effectuer les intégrations par pas discrets, en transférant des charges à l'aide de capacités commutées.

Le convertisseur à approximations successives

Principe général

Les *CAN* à approximations successives sont des systèmes bouclés construits autour d'un *CNA*. Une conversion à n bits se fait en n étapes successives. Chaque étape permet de fixer un des bits du mot binaire, en partant du *MSB* et en terminant par le *LSB*. En accord avec l'entrée de commande *S* (*Start conversion*), l'élément de maintien (*SHS : Sample and Hold System*) est placé en mode mémorisation (*Hold*) et tout les bits du registre d'approximations successives (*SAR : Successive Approximation Register*) sont placés à "0", à l'exception du *MSB* qui lui est placé à "1". La sortie du registre d'approximations successives commande le *CNA* par ses entrées digitales. Si la sortie du *CNA* est supérieure au signal analogique d'entrée, le *MSB* du *SAR* est placé à "0", ceci jusqu'à la fin de la conversion. Dans le cas inverse, il est maintenu à 1 jusqu'à la fin de la conversion. Le processus est répété pour chaque bit, dans le sens décroissance de leur poids. Une fois que tous les bits ont été testés et maintenus à la valeur appropriée, le *SAR* active un signal de fin de conversion *CC* (*Conversion Complete*). Le contenu du *SAR* correspond alors à la valeur numérique de conversion du signal d'entrée. Une conversion de n bits demande au minimum n étapes, mais en réalité, le temps de conversion d'un convertisseur 16 bits est beaucoup plus grand que le double de celui d'un convertisseur 8 bits. Plus le nombre de bit de conversion est élevé, plus le temps de conversion est important. En effet, la précision de la conversion dépend de la qualité du *CNA*. Par conséquent, plus le convertisseur ne contient de bits, plus le temps nécessaire à atteindre une précision équivalente demande de temps.

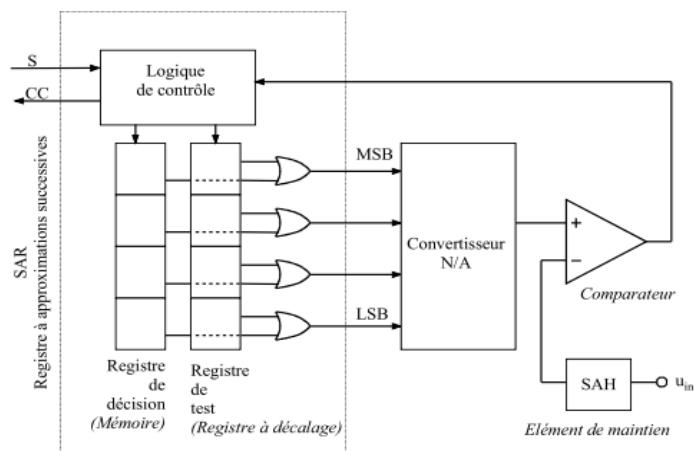


Figure C.1 : convertisseur à approximations successives

La figure C2 suivante présente un exemple de parcours de décision et contenus successifs de registre pour une tension d'entrée quelconque.

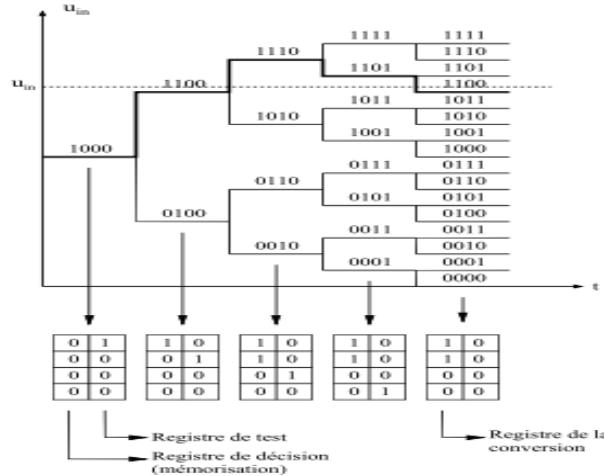


Figure C.2 : Arbre de décision

2. Le convertisseur « FLASH»

Fonctionnement

La gamme totale de tension disponible, fixée par la tension de référence V_{ref} est divisée en $2n$ parties égales à l'aide d'une chaîne de $2n$ résistances identiques. On situe ensuite le signal à convertir dans un des $2n$ segments à l'aide de $2n-1$ comparateurs. La conversion est effectuée en une seule étape, mais le résultat disponible à la sortie des comparateurs doit encore être encodé à l'aide d'une logique très rapide afin d'être délivré à la sortie sous forme d'un nombre arithmétique binaire de n bits.

Caractéristiques

Les caractéristiques principales sont les suivantes :

Faible résolution, haute précision : La résolution est limitée par la taille du circuit qui utilise un très grand nombre de composants, ainsi que par la puissance dissipée. Un convertisseur FLASH typique nécessite $2n - 1$ comparateurs et $2n$ résistances de précision. La résolution typique se situe dans la plage 6 à 8 bits.

Temps de conversion très court : Une conversion s'effectue en un seul cycle. Le temps de conversion est de l'ordre de 10ns à $1\mu\text{s}$.

Capacitance d'entrée : Capacité parasite élevée

Technologie : CMOS et Bipolaire

Applications typiques : Radar, traitement numérique rapide du signal (vidéo, ...)

En résumé, les convertisseurs Flash sont les plus rapides (Fig C3).

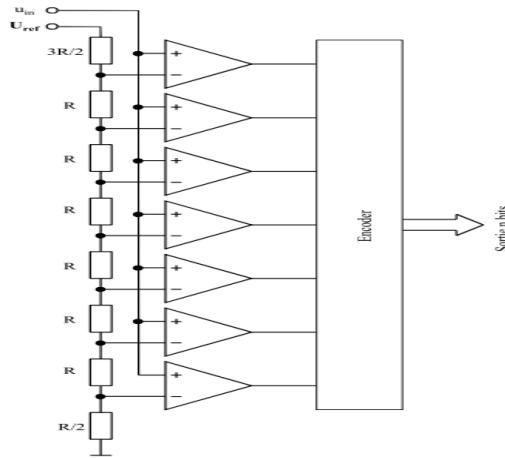


Figure C.3 : Schéma d'un convertisseur « FLASH »

3. Le convertisseur « PIPELINE »

Au lieu de traiter un échantillon du signal dans un seul étage au cours de n cycles successifs, on utilise n étages en cascade. L'étage de rang « i » est chargé de déterminer le bit de poids ($n-i$). Pour convertir n bits, n étages en cascade sont nécessaires. Chaque étage a une structure comparable à celle du convertisseur à approximations successives. Toutefois, au lieu de ramener le résultat d'un cycle à l'entrée du même circuit, on l'introduit à l'entrée du circuit suivant, tandis que le premier circuit reçoit un nouvel échantillon. Chaque étage est responsable de l'obtention d'un bit ou plusieurs bits, le premier étage fournit le *MSB*, le dernier le *LSB*. Tous les étages travaillent en parallèle et traitent des échantillons décalés dans le temps, (Fig C4).

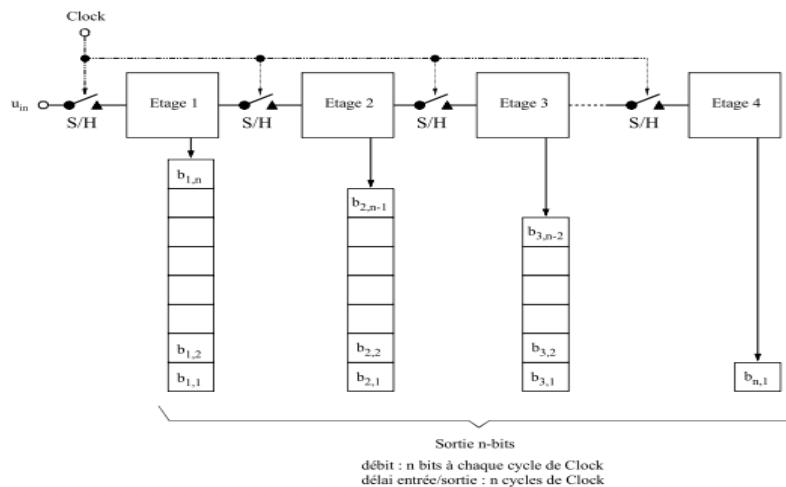


Figure C.4 : Convertisseur « PIPELINE »

Le convertisseur "pipeline" est très rapide dans la mesure où il échantillonne le signal à convertir pratiquement à la même fréquence qu'un convertisseur *FLASH* et délivre le résultat de la conversion à la même cadence (même débit). Le résultat de la conversion d'un échantillon déterminé n'est toutefois disponible qu'après n cycles.

La figure C5 montre le chronogramme d'un convertisseur 12 bits en configuration Pipeline avec l'acquisition de 2 bits par étage. On voit donc que le résultat d'une acquisition n'est disponible qu'après 6 périodes d'horloge.

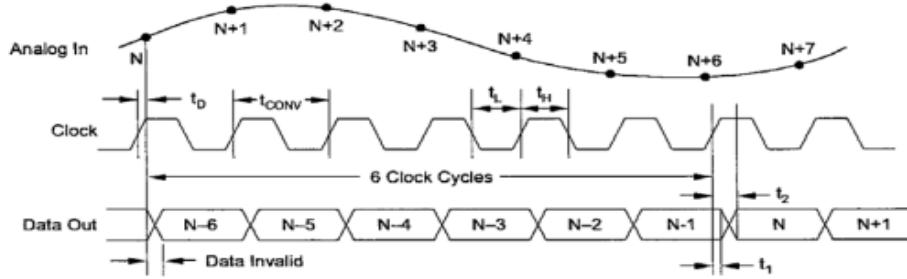


Figure C.5 : Chronogramme d'un convertisseur « PIPELINE »

4. Le convertisseur « SUBRANGING »

On l'appelle aussi : le *convertisseur « SEMI-FLASH »* (Fig C6), son principe est qu'au lieu de réaliser la conversion de n bits en une étape, on effectue 2 étapes qui fournissent chacune $n/2$ bits. Le nombre de composants de chaque convertisseur FLASH est considérablement réduit : pour un total de 8 bits, chaque convertisseur FLASH de 4 bits travaille seulement sur 16 niveaux au lieu de 256.

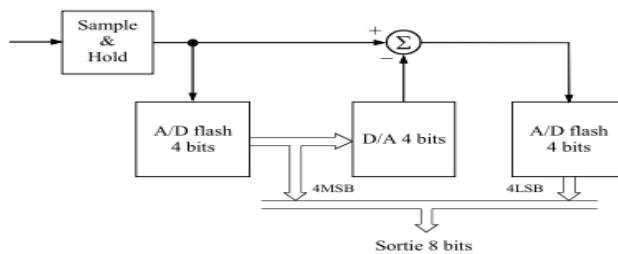


Figure C.6 : Convertisseur « Semi-Flash »

Remarquons que la résolution de chaque convertisseur FLASH est seulement de 4 bits, mais leur précision, c'est-à-dire le niveau de décision pour chaque incrément de 1 LSB doit être de 8 bits. Les exigences sur la précision des résistances et de l'offset des comparateurs sont donc identiques à celles d'un convertisseur Flash 8 bits. Ce convertisseur possède plusieurs variantes :

- En ajoutant un *Sample and Hold* (*S/H*) entre deux étages ainsi qu'un *latch* à la sortie, on peut le faire fonctionner en mode PIPELINE.
- En ajoutant un *S/H* à la sortie du premier étage, on peut boucler la sortie sur l'entrée et supprimer le deuxième étage. Le convertisseur fonctionne ainsi suivant le mode de l'approximation successive. Notons que ce type de convertisseur est de plus en plus utilisé. Il représente un excellent compromis côté rapidité, prix et surface pour les applications qui se contentent de 8 bits.

REFERENCES

- [1] Dominique Drouin, « La mesure du pH de A à Z », <http://knol.google.com/k>, Edition
- [2] ElectroGroupe, <http://www.electrogroupe.info>,
- [3] Wikipédia, <http://fr.wikipedia.org/wiki/>
- [4] Frédéric Pinchon, <http://aquariocatss.free.fr>, Le pH-mètre électronique, 2009
- [5] Lherbaudière, Capteurs électrochimiques, 2000-2001, www.xiti.com
- [6] Microsoft Encarta 2008, « Généralité sur la température », 1993 à 2007
- [7] E 435 « Mesure des grandeurs physiques et capteurs », cours de 4^{ème} année, Département Electronique ESPA ,2008 – 2009
- [8] E201 Cours d'électronique, deuxième année, Département Electronique ESPA, 2006 -2007
- [9] E401 « Circuit et Fonction de l'Electronique », cours 4^{ème} année, Département Electronique ESPA, 2007-2008
- [10] Olivier Français, Les convertisseurs Analogiques Numériques, Acquisition de donnée, 2000
- [11] FALLET Laurent, PERRIN Guillaume, GRISONI Florian ; Convertisseurs Analogique-Numérique et Numérique Analogique, Institut National des Sciences Appliquées de Rouen ; Juin 2002
- [12] Figure port Parallèle,<http://hightec.com> ; du janvier 2011
- [13] Patrice Oguic, « Moteurs pas à pas et PC », 2^{ème} Edition, www.dunod.com
- [14] Le moteur pas à pas et son circuit de commande, <http://sam.electroastro.pagesperso>
- [15] E410 « Programmation en Langage Orientée Objet », cours de 4^{ème} année, Département Electronique ESPA, 2008-2009
- [16] InpOut32.dll, <http://logix4u.net>, du décembre 2010
- [17] E331 « Programmation en C », cours de 3ème année, Département Electronique, 2007-2008

Auteur : RATIANARIVO Paul Ezekel

Titre : «CONCEPTION D'UN SYSTEME DE DOSAGE DE PRODUITS CHIMIQUES ASSISTE PAR ORDINATEUR »

Nombre de pages : 62

Nombre de figures : 47

Nombre de tableaux : 23

RESUME

Un système de dosage assisté par ordinateur destiné à un laboratoire de chimie a été conçu. Il est piloté par DoAO, écrit en C++. Les commandes vers le matériel de dosage proprement dit sont transmises via le port parallèle du PC, puis un CAN, puis un amplificateur de courant. Le doseur est une seringue actionnée par un moteur pas à pas. Les informations sur les valeurs instantanées du pH et de la température de la solution sont affichées grâce à une interface utilisateur conçue. Ces signaux sont issus d'une électrode et d'un capteur de température.

Mots-clés : Dosage, moteur pas à pas, pH-mètre, thermomètre, capteur thermique

Rapporteur : Monsieur RASTEFANO Elisée

Adresse: Lot 514L525 Tomboarivo, Antsirabe 110