



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique



Ecole Nationale Polytechnique  
Département d'électronique

Projet de fin d'études  
Présenté par :  
**CHAÂBANE Nouredine**  
**BENEUNEMISSI Marouane**

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electronique, ENP  
**Thème**

---

Conception et réalisation d'un calculateur totalisateur de débit gaz corrigé en pression et en température à partir d'un élément déprimogène selon les normes internationales ISO 5167 et AGA3

---

**Proposé et dirigé par :**

Rachid BESSAD, Enseignant Chercheur à l'IAP

**Co-Promoteur :**

Dr, BOUSBIA-SALAH Hicham Maître de Conférence à l'ENP

Année universitaire 2009/2010

## ملخص:

إن استعمال الأنظمة العالمية (ISO5167-2 :2003) و (AGA3) , توحد تقنية حساب تدفق الغاز الطبيعي و حجمه أمر مهم في تجارته العالمية, لهذا كان الهدف من هذا المشروع هو دراسة, تصميم جهاز إلكتروني, يعمل ب PIC18F4520 , محمل ببرنامج تقنية الحساب المُطَوَّر بواسطة لغة برمجة MicroC , عن طريق برنامج MicroC IDE , على بطاقة EasyPic5 , قادر على حساب تدفق وحجم الغاز المار في الأنبوب, ويسمح بتبادل المعلومات مع جهاز الكمبيوتر بواسطة RS232 , عن طريق برنامج مصمم خصيصا لهذا الجهاز عن طريق لغة برمجة JAVA , هذا الجهاز يعتبر حاسوب الغاز, يعمل على أنظمة عالمية و يعطي التدفق و الحجم بدقة عالية مما يسمح بربح معتبر في حجم الغاز المباع في التجارة العالمية

## كلمات مفتاحية:

حاسوب غاز, أجهزة القياس, إتصال الأجهزة, ISO5167-2 :2003,AGA3, EasyPic5 , MicroC

## Résumé :

Les normes internationales **ISO5167-2 :2003** et **AGA3** sont recommandées pour normaliser la technique de calcul du débit de gaz, dans le comptage transactionnel du gaz naturel. L'objectif de ce projet est l'étude, la conception et la réalisation d'un appareil électronique basé sur le microcontrôleur **PIC18F4520**, chargé avec un programme de calcul du débit et du volume total. Ce programme est développé en langage **MicroC** et logiciel **MicroC IDE**, sur la carte de développement **EasyPic5**, cet appareil est capable de faire le comptage, la communication de données avec PC via **RS232**, par le biais d'une interface graphique, dédiée à cet appareil de comptage, développée en **JAVA**, cet appareil est un calculateur de gaz, avec une très grande précision. Ce qui permet un grand gain en volume dans le commerce du gaz.

## Mots clés :

*MicroC ,EasyPic5, ISO5167-2 :2003, AGA3, calculateur de débit, station de comptage, plaque à orifice,*

## Abstract:

International standards: **ISO5167-2: 2003** and **AGA3** are recommended to standardize the techniques of gas flow-rate computation , where only the orifice plate is authorized in the natural gas international sales. The objective of this project is the study, the design and the realization of an electronics system based on microcontroller **PIC18F4520**, charged with an iterative computation program, of the flow and total volume. This program is developed in **MicroC** language and **MikroC IDE** software, on the development card **EasyPic5**. This apparatus is able to perform computation and data communication with PC via **RS232**, by the means of an graphical interface, dedicated to this apparatus of counting of gas flow-rate, developed in **JAVA**, this apparatus is a gas computer, with a very high degree of accuracy. This allows a great profit in volume in the trade of gas.

## Keywords:

*MicroC ,EasyPic5 ISO5167-2 :2003,AGA3,gas flow computer, flow computation station, orifice plate,*

# كلمة شكر

الحمد لله والصلاة والسلام على محمد وعلى آله وصحبه وإخوانه إلى يوم الدين أما بعد :

بعد أن منَّ الله علينا بإتمام هذا العمل، الذي نسأل الله عزَّ وجلَّ، أن يجعله نافعا لهذه الأمة، و أن يجزيَّ كُلَّ من أعان عليه ودلَّ عليه " فالدال على الخير كفاعله"، و أن يجعله في ميزان حسناتنا، و أخص بالشكر:

الوالدين العزيزين، فهُم سببُ في كُلِّ نفسٍ من هذه الأنفاس التي تتردَّدُ في صدري

الأستاذ بالسَّعد رشيد المؤطر من المعهد الجزائري العالي للبترول

رئيس قسم الإلكترونيك بوسبعة-صالح هشام بالمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات بالحراش

المهندس نَكلي مدني من سونا طراك

الأستاذ جمعة من المعهد الجزائري العالي للبترول

اسماعيل زياني و النعمي مهندسين من المدرسة العليا للإعلام الآلي

الأستاذ الدكتور حدادي مُراد رئيس قسم الطاقات المتجددة بالمدرسة الوطنية المتعددة التقنيات بالحراش

المهندسين نَّصَّال سمير و بودالي حمزة من JGC-Algérie

جميع الأصحاب و الأصدقاء في إقامة بوراوي عمار و غيرها من المناطق في الجزائر

# Dédicaces

---

A mes Parents

A mes amis d'enfance à Constantine

A mes collègues de l'ENPEI & ENP

A mes amis de la Résidence Bouraoui Ammar

A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin

*Marouane*

A mes Parents

A mes amis d'enfance à Tindouf

A mes collègues de & ENP

A mes amis de la Résidence Bouraoui Ammar & Revoil

A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin

*Nouredine*

## Abréviation

ENP.....	Ecole Nationale Polytechnique d'Alger
IAP.....	Institut Algérien du pétrole
ISO.....	organisation Internationale de Normalisation
AGA.....	Association Américaine de Gaz
$Re_D$ .....	nombre de Reynold
$Q_v$ .....	débit Volumique
$Q_m$ .....	débit massique
d.....	diamètre de l'orifice
$\beta$ .....	rapport des deux diamètres entre d et D
FC.....	Flow Computer
FrC.....	Flow rate Computer
PIC.....	Programmable Interface Controller
ISA.....	association international de standardisation
HART.....	<b>H</b> ighway <b>A</b> ddressable <b>R</b> emote <b>T</b> ransmitter)
4-20mA.....	signal courant analogique variant de 4 à 20mA
FCAI.....	flow computer analog inputs.
FCVR.....	flow computer voltage <b>references</b> .
FCDC.....	flow computer data communication
FC $\mu$ C.....	flow computer $\mu$ Controler
FCPS.....	flow computer power supply
FCDD.....	flow computer data display
FCCP.....	flow computer control panel
$\mu$ C.....	microcontrôleur
LRV.....	Lower Value
URV.....	Upper Value

**SOMMAIRE :**

<b>INTRODUCTION GENERALE ET PROBLEMATIQUE</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I :</b> .....	<b>2</b>
<b>1. INTRODUCTION :</b> .....	<b>3</b>
<b>2. INSTRUMENTATION :</b> .....	<b>3</b>
2.1. <b>Méetrologie :</b> .....	<b>3</b>
2.2. <b>Instrumentation :</b> .....	<b>3</b>
2.3. <b>Normes :</b> .....	<b>3</b>
<b>3. PRINCIPE DE COMPTAGE DU DEBIT DE GAZ :</b> .....	<b>4</b>
3.1. <b>Généralités :</b> .....	<b>4</b>
3.1.1. Historique :.....	4
3.1.2. Définition d'un fluide.....	4
3.1.3. Liquides et gaz.....	4
3.1.4. Type de fluide :.....	4
3.2. <b>Régime d'écoulement</b> .....	<b>5</b>
3.2.1. Ecoulement à l'intérieur de la conduite :.....	5
3.3. <b>Théorème de Bernoulli :</b> .....	<b>7</b>
3.3.1. Expression théorique du débit :.....	8
3.3.2. Expression pratique du débit :.....	8
3.4. <b>Comptage basé sur l'élément déprimogène :</b> .....	<b>9</b>
3.4.1. Plaque à orifice (orifice plate) ou diaphragme :.....	10
<b>4. COMPTAGE ET NORMES INTERNATIONALES :</b> .....	<b>11</b>
4.1. <b>La norme AGA3 :</b> .....	<b>11</b>
4.1.1. Généralités :.....	11
4.1.2. Formule du débit:.....	12
4.1.2.1. <b>Débit massique :</b> .....	<b>12</b>
4.1.2.2. <b>Débit volumique :</b> .....	<b>12</b>
4.1.3. Expression des composants de la formule du débit :.....	12
4.2. <b>La norme ISO 5167-2 :2003 ;</b> .....	<b>13</b>
4.2.1. Généralités :.....	13
4.2.2. Formule du débit:.....	14
4.2.3. Expression des composants de la formule du débit :.....	14

---

<b>5. CONTRIBUTION DU PROJET:</b> .....	<b>15</b>
<b>6. CONCLUSION :</b> .....	<b>15</b>
<b>CHAPITRE II :</b> .....	<b>17</b>
<b>1. INTRODUCTION :</b> .....	<b>17</b>
<b>2. PRESENTATION GENERALE :</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1. Les systèmes autour d'un microcontrôleur :</b> .....	<b>18</b>
2.1.1. La carte de développement : .....	18
<b>2.2. Conception la carte électronique du système de comptage</b> .....	<b>20</b>
2.2.1. Synoptique général : .....	20
2.2.2. Schéma électronique de la carte : .....	21
<b>3. MICROCONTROLEUR DE TRAITEMENT :</b> .....	<b>21</b>
<b>3.1. Le <math>\mu</math>Contrôleur :</b> .....	<b>21</b>
3.1.1. Caractéristiques générales de la famille 18F4520 : .....	22
3.1.2. Architecture interne PIC18F4520 : .....	22
<b>3.2. L'interface de commande :</b> .....	<b>23</b>
3.2.1. Hardware: .....	23
3.2.2. Software : .....	24
<b>3.3. Conclusion :</b> .....	<b>24</b>
<b>4. L'ACQUISITION DE DONNEE ET COMMUNICATION;</b> .....	<b>25</b>
<b>4.1. Introduction. :</b> .....	<b>25</b>
<b>4.2. La grandeur physique et le signal 4-20mA :</b> .....	<b>25</b>
<b>4.3. Conversion courant tension :</b> .....	<b>25</b>
<b>4.4. Conversion analogique/numérique (A/N) :</b> .....	<b>26</b>
<b>4.5. Principes de conversion des microcontrôleurs:</b> .....	<b>27</b>
<b>4.6. Caractéristique de l'ADC du microcontrôleur:</b> .....	<b>28</b>
4.6.1. La résolution de l'ADC: .....	28
<b>4.7. L'échantillonnage :</b> .....	<b>31</b>
<b>5. AFFICHAGE ET COMMUNICATION :</b> .....	<b>32</b>
<b>5.1. L'affichage :</b> .....	<b>32</b>

---

<b>5.2. Communication et réseaux:</b> .....	<b>32</b>
5.2.1. Communication série : .....	32
5.2.2. Communication réseaux : .....	33
<b>6. CONCLUSION:</b> .....	<b>34</b>
<b>CHAPITRE III :</b> .....	<b>35</b>
<b>1. INTRODUCTION :</b> .....	<b>36</b>
<b>2. CONFIGURATION DU CALCULATEUR DU DEBIT :</b> .....	<b>36</b>
2.1. Paramètres de calcul : .....	36
2.2. Capacités et étendue de la mesure : .....	37
2.3. Choix de la norme : .....	37
<b>3. PRINCIPE ET METHODE DE CALCUL :</b> .....	<b>38</b>
3.1. Calcul du débit : .....	38
3.2. Calcule du volume total : .....	39
3.3. Estimation de l'incertitude : .....	39
3.4. Exemple de calcul : .....	40
3.5. Capacité de débit et rangeabilité.....	40
<b>4. ALGORITHME DE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME :</b> .....	<b>41</b>
<b>5. LA PROGRAMMATION :</b> .....	<b>41</b>
5.1. Algorithme de comptage : .....	41
5.2. Logiciel de programmation : .....	42
5.2.1. Présentation : .....	43
5.2.2. Création de projet : .....	45
5.2.3. L'éditeur du code : .....	46
5.3. La programmation:.....	47
5.3.1. Configuration du microcontrôleur: .....	47
5.3.2. L'acquisition : .....	47
5.3.3. L'affichage: .....	49
5.3.4. Libraries:.....	50
5.3.5. Description du Code source: .....	51
<b>6. L'INTERFACE DE COMMUNICATION.....</b>	<b>51</b>



---

<b>7. CONCLUSION:</b> .....	<b>53</b>
<b>CHAPITRE IV :</b> .....	<b>59</b>
<b>1. INTRODUCTION :</b> .....	<b>60</b>
<b>2. DESCRIPTION DU BANC DE MESURE :</b> .....	<b>60</b>
<b>2.1. Transmetteurs :</b> .....	<b>61</b>
2.1.1. Transmetteur de température : .....	61
2.1.2. Transmetteur de pression : .....	62
<b>3. INSTALLATION DES TRANSMETTEURS :</b> .....	<b>62</b>
<b>3.1. Transmetteur de température :</b> .....	<b>62</b>
<b>3.2. Transmetteurs de pression :</b> .....	<b>63</b>
3.2.1. Montage sur le banc : .....	63
3.2.2. Branchement électrique au transmetteur : .....	64
3.2.3. Fonctionnement du transmetteur : .....	66
<b>4. CALIBRAGE ET AJUSTEMENT DES INSTRUMENTS (INSTRUMENT CALIBRATION) :</b> .....	<b>67</b>
<b>4.1. Calibrage et arrangement :</b> .....	<b>67</b>
<b>4.2. Procédure de calibrage :</b> .....	<b>67</b>
<b>5. EXEMPLE DE MESURE :</b> .....	<b>68</b>
<b>6. CONCLUSION :</b> .....	<b>68</b>
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>70</b>

**Liste des figures :**

<a href="#">Figure. I.3.2.1.a. types d'écoulement dans le pipe</a>	6
<a href="#">Figure. I.3.2.1.b. graphe de la vitesse de l'écoulement en fonction des dimensions du pipe</a>	7
<a href="#">Figure 3.4.1.a vue en coupe</a>	10
<a href="#">Figure. I.3.4.1.b profile de l'écoulement et de la pression</a>	10
<a href="#">Fig. I.3.4.1.c technique de prise de pression</a>	10
<a href="#">Figure. I.3.4.1.d influence de la plaque à orifice</a>	11
<a href="#">Figure 5, le FrC est la contribution apportée par ce projet</a>	15
<a href="#">Fig. II.1.1.2.a la carte de développement EasyPic5</a>	19
<a href="#">Fig. II.1.1.2.b la carte de développement et les parties nécessaires pour le projet</a>	19
<a href="#">Fig. II.1.2.1.Synoptique générale de l'architecture hardware</a>	20
<a href="#">Fig. II.1.2.3.schéma du circuit électronique réalisé avec proteus</a>	21
<a href="#">Fig. II.1.1.6.a vue de dessus du PIC18F4520</a>	22
<a href="#">Fig. II.1.1.6.b architecture interne du PIC18F4520</a>	23
<a href="#">Fig. II.2.2.1.b graphe reliant la grandeur physique et la sortie du transmetteur</a>	24
<a href="#">Fig. II.3.3.a conversion courant-tension</a>	26
<a href="#">Fig. II.3.4.a conversion A/N (Fonction transfert du convertisseur)</a>	27
<a href="#">Fig. II.3.5.1.a convertisseur Analogique-Numérique</a>	28
<a href="#">Fig. II.3.6.2.temps de conversion</a>	31
<a href="#">Fig. II.4.1.a connexion du PIC avec l'afficheur</a>	32
<a href="#">Fig. II.4.2.a communication RS232 emetteur/recepteur</a>	33
<a href="#">Fig. II.4.2.b Connecteur câble DB-9</a>	33
<a href="#">Fig. III.2.2.a. Interface de communication software</a>	37
<a href="#">Fig. III.5.1.organigramme de calcul de débit de gaz selon AGA3</a>	42
<a href="#">Fig. IV 5.2.architecture du MikroC</a>	43
<a href="#">Fig.III.4.1.1vue globale de l'environnement de travail MikroC IDE</a>	44
<a href="#">Fig.III.4.1.2 configuration des paramètres du PIC à l'aide du MicroC</a>	46
<a href="#">Fig. III.4.1.3.l'Editeur de programme</a>	47
<a href="#">Fig.III 6.a. configuration des intervalles des pression, pression différentielle, température</a>	51
<a href="#">Fig.III 6.b. configuration de la constitution du gaz</a>	51
<a href="#">Fig.III 6.a. configuration de la prise des pressions (aux angles), types de matériaux</a>	52
<a href="#">Fig.III 6.a. configuration de la prise des pressions (D-D/2), types de matériaux</a>	52
<a href="#">Fig.III 6.a. configuration de la prise des pressions (falge-taps), types de matériaux</a>	53
<a href="#">Fig. IV.2.image du banc de comptage au labo de métrologie à l'IAP</a>	60
<a href="#">Fig. IV.2.1.1. Transmetteur de température</a>	61
<a href="#">Fig. IV.2.1.2.a image de transmetteur</a>	62
<a href="#">Fig. IV.3.1 connexion électrique du transmetteur de température</a>	63
<a href="#">Fig. IV 3.2.1.a montage verticale</a>	63
<a href="#">Fig. IV 3.2.1.c. avec vannes de sectionnement 2</a>	64
<a href="#">Fig. IV.3.2.2.a vue de la mise à la terre du transmetteur</a>	64
<a href="#">Fig. IV.3.2.2.b branchement du transmetteur</a>	65
<a href="#">Fig. IV.3.2.3.élément primaire du détecteur</a>	66
<a href="#">Fig. IV.4.2.a, circuit de calibrage de transmetteur de pression à l'aide de communicateur HART</a>	68
<a href="#">Fig. IV.4.2.b calibrage du transmetteur par le communicateur HART</a>	68

**Liste des Tableaux :**

<a href="#">Tab .II.3.3. Tableau de conversion courant-tension.....</a>	26
<a href="#">Tab. II.4.2. illustration des pins du connecteur DB-9.....</a>	33
<a href="#">Tab .III.5.1.1 configuration de l'ADC du PIC18F4520.....</a>	48
<a href="#">Tab. III.2.3.a tableau de conversion des volumes.....</a>	38
<a href="#">Tab. III.2.3.b tableau de conversion des masses.....</a>	38

## Introduction générale et Problématique

Le gaz naturel, est un élément essentiel de l'industrie et de l'énergie dans le monde, l'Algérie est un leader mondial du gaz naturel étant donné son gisement et la production de cet élément, le gaz est essentiel pour la production de l'énergie électrique, la consommation dans les foyers etc....

Dans le commerce international, le gaz est vendu par une transaction à travers les gazoducs, donc il est très important d'avoir une technique performante pour le comptage du gaz, qui sera non seulement normalisée, mais également précise et économique .... Le gaz est vendu en énergie équivalent calorie pour des équipements de plus en plus performants qui sont utilisés pour répondre aux besoins et exigences du marché, des stations de comptages sont équipées de transmetteurs de grandeurs telles que la pression, compteurs normalisés, chromatographe etc.

Le marché international des débitmètres s'élevait à 2500 millions \$ en 1996 donc il est important du point de vue commercial.

Pour la conception des systèmes de comptage ou des débitmètres, il existe plusieurs méthodes basées sur la pression différentielle (élément déprimogène) qui sont régies par la **[ISO 5167 & AGA3]**. La technique basée sur le diaphragme (plaque à **orifice**) est seule autorisée pour la transaction commerciale...

Les expressions théoriques qu'on étudie d'une façon académique sont souvent simplifiées par des hypothèses mais en pratique pour réaliser un système qui répond aux normes internationales qui utilisent des expressions plus complexes où la précision est exigée, on rencontrera de nouveaux défis conceptuels et algorithmiques ; ainsi que l'implémentation des programmes complexes sur des microcontrôleurs qui gèrent le système capable de faire l'acquisition, le traitement du signal de mesure et la restitution des résultats en temps réel. L'architecture hardware est réalisée à l'aide de la carte de développement EasyPic5, par la firme MikroElectronica. Le programme est développé à l'aide du logiciel **MikroC IDE**, dédié à cette carte, il aide et facilite énormément la programmation des microcontrôleurs, grâce à une bibliothèque riche en fonctions permettant le développement de programmes complexes, la réalisation d'une interface graphique permet la communication du calculateur avec un système d'information tel que le PC, pour la configuration, transfert de données, supervision...

Cette interface est conçue à l'aide du langage de programmation **JAVA**, et le logiciel **Eclipse**, cette interface sera complète au fur et à mesure qu'on développe ce projet car, ils nous restent plusieurs applications à intégrer dans ce calculateur, dont on citera dans les perspectives

**Chapitre I :**  
**Comptage du gaz naturel selon les normes**  
**ISO 5167 et AGA3**  
**(Partie théorique)**

---

## 1. Introduction :

La mesure du débit des fluides est sans doute le type le plus complexe de mesure de variable dans les processus à l'échelle de l'instrumentation industrielle. Non seulement il ya un nombre ahurissant de technologies qu'on peut utiliser pour mesurer le débit de fluide (chacun avec ses propres limites et ses particularités), mais la nature de la variable en elle-même n'a pas de définition unique. "Flow" peut se référer à un débit volumétrique (le nombre de volumes de liquide passant par unité de temps), à des débits massiques (le nombre d'unités de masse fluide qui passe par unité de temps), ou même à un débit volumique normalisé (le nombre de volumes d'écoulement du gaz, en supposant la pression et des valeurs différentes de température que ce que la ligne fonctionne à processus réel). Les Débitmètres configurés pour fonctionner avec les flux de gaz ou de vapeur sont souvent inutilisables pour les liquide. Les propriétés dynamiques des fluides changent elles-mêmes avec les débits. La plupart des technologies de mesure du débit ne peuvent atteindre la linéarité respectable à partir du débit nominal maximal. En outre, les performances des technologies de la majorité des débitmètres dépendent essentiellement des installations. On ne peut pas simplement accrocher un débitmètre à n'importe quel endroit dans un système de tuyauterie et s'attendre à fonctionner comme prévu. Ceci est une source constante de frictions entre les ingénieurs de la tuyauterie (mécanique) et les ingénieurs des instruments (contrôle) sur les grands projets industriels. Ce qui pourrait être considéré comme un excellent aménagement de canalisations dans la perspective de la fonction de matériel de fabrication et de l'économie est souvent médiocre (au mieux) pour mesurer le bon débit, et vice-versa. Dans de nombreux cas l'équipement débitmètre sera correctement installé et les techniciens ont les instruments nécessaires pour faire face aux problèmes de mesure qui en résulte au cours du démarrage processus unitaire. Même après avoir fait le bon choix du débitmètre pour le processus et l'avoir bien installé dans la tuyauterie, des problèmes peuvent surgir en raison de changements dans le processus des propriétés du fluide (densité, viscosité, conductivité), ou la présence d'impuretés dans le fluide de processus. Les Débitmètres sont également soumis à beaucoup plus d'«usure» que la plupart des autres principaux éléments sensibles, étant donné le fait que l'élément sensible est un débitmètre qui doit se trouver directement dans la trajectoire de fluide potentiellement abrasif courants. Compte tenu de toutes ces complications, il est impératif pour les professionnels de l'instrumentation de comprendre la complexité de la mesure du débit. Ce qui importe le plus est de bien comprendre les principes physiques sur lesquels chaque débitmètre dépend. Si les «premiers principes» de chaque technologie sont compris, les demandes appropriées et les problèmes potentiels sont beaucoup plus faciles à reconnaître donc plus facile à mettre en œuvre.

## 2. Instrumentation :

### 2.1. Métrologie :

La métrologie est la science de la mesure, elle comprend des parties qui aident à affiner les différentes mesures effectuées, et des opérations nécessaires pour le bon fonctionnement des appareils de mesures (calibrage, étalonnage etc.)

### 2.2. Instrumentation :

L'instrumentation est la science de l'automatisation de mesure et contrôle des grandeurs physiques dans un procédé, ces grandeurs sont en générale : la température, le débit, la pression et le niveau. Pour le traitement et l'acquisition, ces grandeurs seront converties par des capteurs ou transmetteurs en signaux électriques, analogique (en générale linéaire) ou (logique 1 ou 0) standards. Ces signaux seront utilisés pour le contrôle et la supervision d'un procédé.

### 2.3. Normes :

La norme est le résumé d'une expérience internationale dans un domaine particulier qui comprend l'élite de la compétence mondiale d'une technique : procédés, services, etc. tout en

optimisant le coût et le temps. La norme est une recommandation elle n'est pas obligatoire comme les règlements utilisés pour respecter certaines exigences des organismes de contrôle. Comme toute discipline, l'instrumentation obéit à plusieurs standards et normes internationaux. Chaque élément, chaque opération, représentation en instrumentation doit respecter une norme ou un standard spécifique. Des offices spécialisées dans la normalisation et les standards existent tels que

ISO (organisation internationale de normalisation)

AGA (association américaine de gaz)

Isa [ANSI](#) ; [API](#) ; [ASME](#) ; [ASTM](#) ; [BSI](#) ; [DIN](#) ; [ISO](#) ; [MIL](#)

### 3. Principe de comptage du débit de gaz :

#### 3.1. Généralités :

##### 3.1.1. Historique :

L'écoulement d'un fluide à travers une constriction fut, dans son principe, exploité dès l'Antiquité : mesure du temps par sablier et clepsydre, « facturation » de l'eau distribuée par les aqueducs romains. La première analyse scientifique du débitmètre à pression différentielle ne remonte néanmoins qu'au début du 17<sup>e</sup> siècle, avec Castelli et Torricelli qui établirent que le débit dans un orifice est le produit de sa section par la vitesse d'écoulement du fluide, et qu'il varie comme la racine carrée de la chute de pression entre l'amont et l'aval. Bernoulli, un siècle plus tard, énonça le théorème qui décrit de façon rigoureuse ce phénomène, alors qu'Henri Pitot avait, quelques années auparavant, inventé une sonde permettant de mesurer de façon ponctuelle la vitesse d'écoulement d'un fluide. Venturi, un peu plus tard, avait décrit le premier instrument de mesure du débit dans une conduite. Avec l'ère industrielle, enfin, apparurent les premiers dispositifs standardisés : plaques à orifice aux États-Unis, au début du 20<sup>e</sup> siècle dans l'industrie du pétrole, tuyères normalisées vers 1930, en Allemagne

##### 3.1.2. Définition d'un fluide

Un fluide peut être considéré comme étant formé d'un grand nombre de particules matérielles, très petites et libres de se déplacer les unes par rapport aux autres. Un fluide est donc un milieu matériel continu, déformable, sans rigidité et qui peut s'écouler. Parmi les fluides, on fait souvent la distinction entre liquides et gaz.

##### 3.1.3. Liquides et gaz

Les liquides et gaz habituellement étudiés sont isotropes, mobiles et visqueux. La propriété physique qui permet de faire la différence entre les deux est la compressibilité.

- l'isotropie assure que les propriétés sont identiques dans toutes les directions de l'espace.
- la mobilité fait qu'ils n'ont pas de forme propre et qu'ils prennent la forme du récipient qui les contient.
- la viscosité caractérise le fait que tout changement de forme d'un fluide réel s'accompagne d'une résistance (frottements).

##### 3.1.4. Type de fluide :

A partir du paramètre de la compressibilité on peut distinguer deux types de fluide qui sont fluide compressible et incompressible

On considère comme *incompressible* un fluide dont la masse volumique ne varie pas de façon sensible sous l'effet de la dépression mise en œuvre pour mesurer sa vitesse d'écoulement. L'objet de cet article étant avant tout l'ingénierie et la pratique des mesures de débit par appareil déprimogène, nous y limiterons les développements théoriques, qui pourront être consultés dans les ouvrages de base.

Dans le cas où le fluide est *compressible*, c'est-à-dire lorsqu'on ne pourra pas ignorer la diminution de sa masse volumique au passage de la constriction, et c'est le cas général des gaz et de la vapeur, la loi de conservation de la matière impose que la vitesse s'accroisse en passant à travers l'orifice, non seulement en raison de la contraction de la veine, mais aussi parce que la densité du fluide décroît avec la pression. L'analyse de cette variation de la masse volumique se

fait en admettant que le fluide s'écoulant de 1 à 2 subit une transformation adiabatique, c'est-à-dire sans échange significatif de chaleur avec l'extérieur du système, ce qui est justifié par la brièveté du phénomène de détente/recompression partielle auquel il est soumis. Cette interprétation se traduit par une loi du type :

$$(P/\rho)^\gamma = \text{constante}$$

Dans laquelle  $\gamma$  est le **coefficient isentropique** défini comme le rapport des variations relatives de la pression et de la masse volumique dans une transformation adiabatique réversible élémentaire [2]. Ce coefficient est, pour les gaz parfaits, égal au rapport ( $C_p/C_v$ ) des capacités thermiques massiques à pression et à volume constant ; pour les autres gaz la valeur de  $\gamma$  peut différer de ( $C_p/C_v$ ), voire même rester encore mal connue, mais la norme admet que l'on prenne néanmoins, dans ce cas, le rapport très généralement publié ( $C_p/C_v$ ).

On calcule ensuite un **coefficient** dit d'**expansion**, au moyen d'une formule théorique dans le cas des types de restriction qui moulent la veine fluide (tuyères et venturis), ou empirique pour les autres types d'appareil déprimogène. Dans ce dernier cas, en effet, les formes anguleuses du dispositif engendrent des frottements, trop sensibles pour que l'hypothèse d'une détente/recompression adiabatique du fluide soit complètement valide. Ces formules, figurant à l'origine dans les publications de l'American Gas Association [2] et compilées par [1], ont été reprises à l'identique par ISO [2].

L'approximation fluide incompressible est souvent justifiée pour un gaz s'écoulant, dans un plan horizontal, jusqu'à des vitesses égales au tiers de la vitesse du son égale à 340 m/s pour l'air dans les conditions courantes.

Ainsi c'est la nature de l'écoulement qui permet de distinguer l'écoulement compressible de l'écoulement incompressible et non la nature du fluide. On emploie l'expression hydrodynamique pour qualifier un écoulement incompressible sans qu'il soit nécessaire que le fluide soit de l'eau ou un liquide et l'expression aérodynamique pour qualifier l'écoulement d'un fluide compressible sans qu'il soit nécessaire que ce fluide soit de l'air ou un gaz

### 3.2. Régime d'écoulement

Décrire le mouvement d'un fluide fait appel à des notions différentes de celles développées en Mécanique du point ou du solide. Le mouvement d'un fluide est un **écoulement** où il y a déformation continue du fluide. On peut, de manière analogue à ce que l'on fait en Mécanique du solide, isoler (par la pensée ou en trouvant un moyen de visualisation, coloration par exemple) une partie restreinte du fluide appelée **particule** et la " suivre " au cours du temps c'est à dire connaître à chaque instant sa position. L'ensemble des point constituant le fluide va décrire son mouvement le courant caractérisant l'écoulement du fluide avec une vitesse et un débit que nous allons étudier plus tard.

#### 3.2.1. Ecoulement à l'intérieur de la conduite :

L'écoulement du fluide est **permanent** ou **stationnaire** si ses composantes de (pression, température, vitesse, masse volumique, ...) sont indépendantes de la variable temps ; il est dit **non-permanent** ou **non-stationnaire** si cette condition n'est pas réalisée. L'écoulement du fluide est **uniforme** si ses composantes de vitesse sont indépendantes des coordonnées d'espace ; il est **non-uniforme** si cette condition n'est pas remplie.

On appelle **ligne de courant** une courbe dont la direction tangente en chacun de ses points est la direction du vecteur vitesse. L'équation d'une ligne de courant se calcule par intégration des équations. Un **tube de courant** est un ensemble de lignes de courant s'appuyant sur un contour fermé.

On appelle **ligne d'émission** une courbe constituée par l'ensemble des points atteints à un instant donné par des particules passées antérieurement en un même point. **Trajectoire**, ligne de courant et ligne d'émission sont confondues pour un écoulement permanent.

Dans certains écoulements, les particules marquées diffusent très lentement c'est à dire s'écartent peu les unes des autres, les différentes couches (lamelles) glissent les unes par rapport aux autres sans se mélanger : l'écoulement est dit **laminaire**.



Au contraire dans d'autres écoulements les particules marquées s'éloignent très rapidement de manière " aléatoire, irrégulière, dans toutes les directions " les unes des autres, on ne retrouve plus de trace de marquage significative ou très près de l'endroit où le marqueur a été introduit : l'écoulement est dit **turbulent**.

A l'évidence, l'écoulement sera laminaire à faible vitesse alors que les grandes vitesses provoqueront l'instabilité des particules c'est à dire le caractère turbulent de l'écoulement. En fait, la transition entre écoulement laminaire et turbulent dépend de la vitesse, mais aussi des caractéristiques (viscosité) du fluide, de la forme de l'écoulement (espace fermé –canalisation- ; espace ouvert –sur une surface à " l'air libre "-).

Il découle de ces propos que, pour un écoulement turbulent, les variables, en un point donné, qui caractérisent l'écoulement varient de manière aléatoire et que la notion d'écoulement permanent ne peut être comprise qu'en moyenne (la valeur moyenne de toute variable caractéristique de l'écoulement étant, alors, indépendante du temps).

Au contraire, pour un écoulement laminaire, les fluctuations des variables sont négligeables, à la limite nulle.

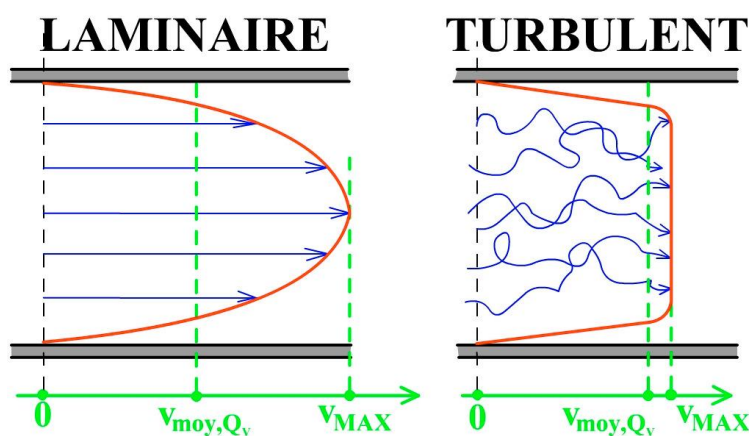


Figure. 1.3.2.1.a. types d'écoulement dans le pipe

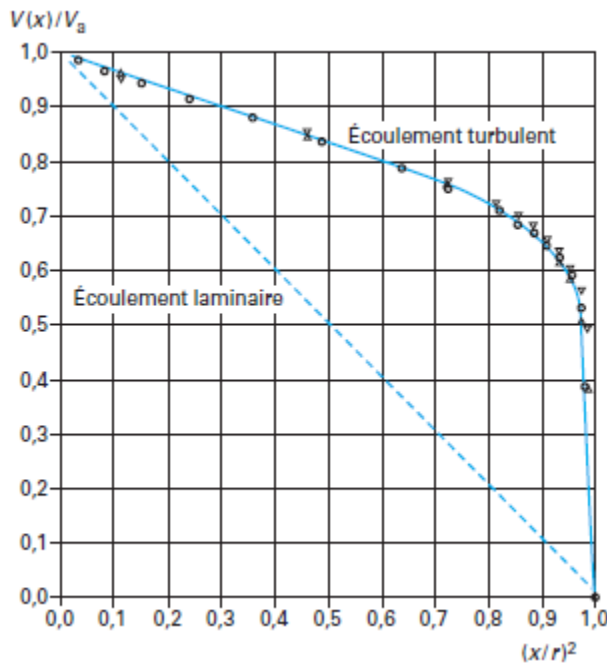
Un nombre sans dimension sera un facteur important pour la classification du type d'écoulement laminaire ou turbulent qui le nombre de Reynold (le rapport entre force d'inertie et force de frottement)

Dans l'écoulement au sein d'une canalisation cylindrique s'exprime par :

$$Re_D = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad \text{Eq.3.2.1.a}$$

La symbolique  $Re_D$  indique par ailleurs que le calcul est fait avec la vitesse moyenne dans la conduite et la valeur  $D$  de son diamètre, plutôt qu'avec ces mêmes quantités à la traversée de la constriction, auquel cas on utiliserait le symbole  $Re_a$ . Lorsque le nombre de Reynolds est faible, l'écoulement est dit **laminaire** ; il devient **turbulent** lorsque ce nombre croît, la frontière étant habituellement fixée vers  $Re \approx 2000$ . Un exemple de profil de vitesses en écoulement turbulent est donné par la figure 2 ; on voit que ce profil est pratiquement parabolique sur 90 % du rayon à partir de l'axe, la courbe représentative étant une droite compte tenu de l'abscisse adoptée : dans cette zone la vitesse des filets liquides varient peu. Le profil rejoint ensuite très rapidement le point de vitesse zéro, sur la paroi. Dans un tel type d'écoulement, la vitesse moyenne sur une section est supérieure à 80 % de la vitesse axiale, et c'est dans ces conditions que l'on doit utiliser la plupart des appareils déprimogènes. En écoulement laminaire, par contre, le profil est purement parabolique, et la courbe représentative tend vers la diagonale (1,1) de la figure 2, dessinée en pointillé : seuls les quelques orifices conçus pour de faibles valeurs de  $Re_D$  seront alors utilisables. Ce point doit être considéré avec la plus grande attention ; il sera précisé plus loin, et

assorti de valeurs numériques de  $Re_D$ . Les diverses valeurs du coefficient de décharge  $C$  des divers éléments primaires ont été déterminées par expérimentation sur banc d'essai, pour chaque type d'élément.



$V_a$  : vitesse axiale  
 $r$  : rayon de la tuyauterie  
 $V(x)$ : vitesse à distance  $x$  de l'axe

Figure. I.3.2.1.b. graphe de la vitesse de l'écoulement en fonction des dimensions du pipe

Remarquer que l'utilisation d'une abscisse quadratique conduit à une droite pour les paraboles d'équation  $g=f(x^2)$

### 3.3. Théorème de Bernoulli :

En 1738 Daniel Bernoulli a mis en existence le théorème de conservation de l'énergie c'est-à-dire, la somme totale de l'énergie en tout point d'un fluide parfait passif (sans élément actif tel que pompe, machine...) est constante d'un fluide incompressible et il a établi la loi mathématique (équation de Bernoulli), cette loi relie, le long d'une ligne de courant, les trois grandeurs **vitesse  $V$ , pression  $P$  et l'altitude  $Z$**  :

$$\frac{1}{2} \rho V^2 + \rho g z + P = Constante \tag{Eq.3.3.a}$$

Avec  $V$  moyenne sur une section aronde de la vitesse d'écoulement du fluide,  
 $Z$  hauteur (côte) par rapport à un plan horizontal de référence, arbitraire,  
 $g$  accélération de la pesanteur,  $P$  pression statique (absolue) du fluide,  
 $\rho$  masse volumique du fluide.

Le premier terme de l'équation (1) exprime l'énergie cinétique du fluide et le second son énergie potentielle gravitationnelle. Appliquons cette relation à deux sections d'une conduite fermée telles que (1) et (2) de la figure 1, conduite que nous supposerons horizontale, de sorte que le terme  $gz$  soit constant, il vient :

$$\frac{1}{2} \cdot \rho_1 \cdot V_1^2 + P_1 = \frac{1}{2} \cdot \rho_2 \cdot V_2^2 + P_2 \tag{Eq.3.3.b}$$

Cette équation peut aussi s'écrire, en supposant le fluide incompressible de sorte que  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$  :

$$V_2 \sqrt{[1 - V_1^2 / V_2^2]} = \sqrt{2(P_1 - P_2) / \rho} \tag{Eq.3.3.c}$$

### 3.3.1. Expression théorique du débit :

On pourrait obtenir la valeur du **débit volumique**  $Q_v$  en multipliant la vitesse  $V_2$  par l'aire de la section 2 de la veine fluide, mais ces termes sont peu accessibles à la mesure ; le principe retenu est donc d'admettre qu'il existe en théorie un rapport constant entre la vitesse amont  $V_1$  et la vitesse  $V_2$  d'écoulement au niveau de l'orifice que l'on implante entre les sections 1 et 2, figure 1, rapport qui ne dépend que de la géométrie du dispositif, ce qui conduit à l'expression suivante :

$$Q_v = \frac{a}{\sqrt{[1 - V_1^2 / V_2^2]}} \cdot \sqrt{2(P_1 - P_2) / \rho} \quad \text{Eq.3.3.d}$$

$a$  étant l'aire de l'orifice et  $\rho$  la **masse volumique** du fluide. On pose  $\Delta P = P_1 - P_2$ ,

La quantité :

$$E_v = \frac{1}{\sqrt{[1 - V_1^2 / V_2^2]}} \quad \text{Eq.3.3.e}$$

$E_v$  est le **coefficient de vitesse d'approche**, plus généralement exprimé par la formule  $1 / \sqrt{(1 - \beta^4)}$ , dans laquelle  $\beta$  est le **rapport d'ouverture**, appelé aussi **rapport des diamètres** (diameter ratio), qui est le quotient du diamètre de l'orifice à celui de la canalisation. On voit que ce coefficient exprime en réalité l'effet géométrique de contraction de la veine fluide, rappelant par analogie le coefficient relativiste de  $1 / \sqrt{(1 - V^2 / c^2)}$  contraction de l'espace-temps.

Donc la relation théorique sera :

$$Q_v = \frac{a}{\sqrt{(1 - \beta^4)}} \cdot \sqrt{2(\Delta P) / \rho} \cdot f$$

La formule ainsi obtenue, n'est que théorique, puisque la viscosité du fluide n'a pas été prise en compte, ni la perte de charge, introduite par l'obstacle, ni la contraction de veine qui se produit systématiquement lorsqu'un fluide s'écoule au travers d'un orifice, de plus le fluide a été supposé incompressible.

### 3.3.2. Expression pratique du débit :

Avant de passer à une description du principe de mesure et les normes, nous allons donner la forme définitive de l'expression permettant de calculer le débit soit volumique ou massique, avec une bonne précision.

Pour cela on fait introduire les coefficients correctifs :

Un coefficient de décharge **C** : qui est le rapport entre le débit exact calculé et le débit théorique, qui caractérise la géométrie de l'écoulement, ce qui permet de corriger l'erreur due à la perte de charge introduite par l'organe déprimogène :

$$C = \frac{Q_v \text{ exacte}}{Q_v \text{ théorique}} \quad \text{Eq.3.3.1.a}$$

On verra plus les expressions exactes de  $C$

Le coefficient d'expansion des gaz : ( $\varepsilon$  pour ISO ou bien Y pour AGA)\* c'est le rapport des deux coefficients de décharge  $C_{\text{gaz}}$  et  $C_{\text{liquide}}$ , donc il permet le passage de l'étude des fluides incompressibles vers ceux compressible tel que les gaz ce coefficient vaut 1 pour les fluides incompressibles,

$$\varepsilon = \frac{C_{\text{gaz}}}{C_{\text{liquide}}} \quad \text{Eq.3.3.1.b}$$

La formule pratique fait apparaître que le signal primaire de pression différentielle ( $P_1 - P_2$ ), et par conséquent les erreurs de mesure se trouvent multipliés par le coefficient de vitesse d'approche et

l'on devra, c'est un principe général, éviter que  $\beta$  ne soit trop proche de 1, c'est-à-dire  $V_1$  proche de  $V_2$ . Notons encore que l'on appelait **coefficient de débit**  $\alpha$  le produit des coefficients de décharge  $C$  et de vitesse d'approche  $E$ , mais ce paramètre n'est plus utilisé par la norme ISO 5167[2] voir plus tard, car il mêle les deux quantités précitées  $C$  et  $E$ , qui relèvent de notions entièrement distinctes : ces raisons pourront apparaître comme académiques.

$$Q_v = C \cdot \frac{\varepsilon_1}{\sqrt{[1 - V_1^2 / V_2^2]}} \cdot a \cdot \sqrt{2(P_1 - P_2) / \rho_1} \quad \text{Eq.3.3.1.c}$$

L'un des points forts de cette formulation réside dans le fait que le coefficient  $C$  ne varie que très peu avec le diamètre de la canalisation et aussi avec le rapport d'ouverture  $\beta$ , au moins dans certaines limites sur lesquelles nous reviendrons. Le paramètre  $\beta$ , dont dépend la forme des lignes de courant, définit le système du point de vue géométrique mais celui-ci doit également être analysé du point de vue dynamique.

On peut facilement déduire le débit massique par

$$Q_m = \rho_1 \cdot Q_v \quad \text{Eq.3.3.1.d}$$

### 3.4. Comptage basé sur l'élément déprimogène :

Maintenant on exploite les notions théoriques et les formules mentionnées auparavant, car le principe du comptage est basé sur l'expression pratique du débit, il reste à identifier l'expression de la densité du fluide  $\rho_1$ , noté dans AGA3 (car en réalité, elle est fonction de la température et la pression du fluide en amont

$$\rho_1 = \frac{Z_{f_1} \cdot T_f}{Z_s \cdot G_f \cdot P_1} \quad \text{Eq.3.4.a}$$

Donc, l'expression pratique du débit qu'on va utiliser sera :

$$Q_v = N \cdot \frac{C \cdot \varepsilon_1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot a \cdot \sqrt{\frac{Z_s \cdot P_1 \cdot \Delta P}{G_f \cdot Z_{f_1} \cdot T_f}} \quad \text{Eq.3.4.b}$$

$Q_v$  = Débit volumique

$N$  = facteur de conversion d'unité

$C$  = coefficient de Décharge (accounts for energy losses, Reynolds number corrections, pressure tap locations, etc.)

$a$  = surface de l'orifice

$Z_s$  = facteur de Compressibilité du gaz dans les conditions standard

$Z_{f_1}$  = facteur de Compressibilité du gaz dans les conditions d'écoulement

$G_f$  = gravité spécifique du gaz (density compared to ambient air)

$T$  = température Absolue du gaz

$P_1$  = la pression en amont (absolu)

$\Delta P$  = différence de pression

On peut constater que la  $Q_v$  n'est pas accessible directement, elle est obtenue par le biais de la mesure des trois paramètres de l'écoulement : pression  $P_1$ , différentielle  $\Delta P$  et la température  $T$

Il faut, donc, un élément déprimogène qui assure une bonne  $\Delta P$ , tel que le tube à venturi, gicleur de débit, dans notre projet la plaque à orifice est la technologie utilisée comme élément déprimogène. Qu'on verra dans le paragraphe suivant.

**3.4.1. Plaque à orifice (orifice plate) ou diaphragme :**

Le diaphragme est le moins cher et le plus simple des organes déprimogènes. Il s'agit, ni plus ni moins que d'un trou percé dans une plaque. Evidemment, ce trou sera déterminé en fonction de la norme ISO 5167-1.

Signalons les principales caractéristiques :  
 l'épaisseur  $e$  est comprise entre  $0,005.D$  et  $0,02.D$   
 l'épaisseur  $E$  est, elle, comprise entre  $e$  et  $0,05.D$   
 L'arête amont ne doit présenter aucune bavure (arête vive)

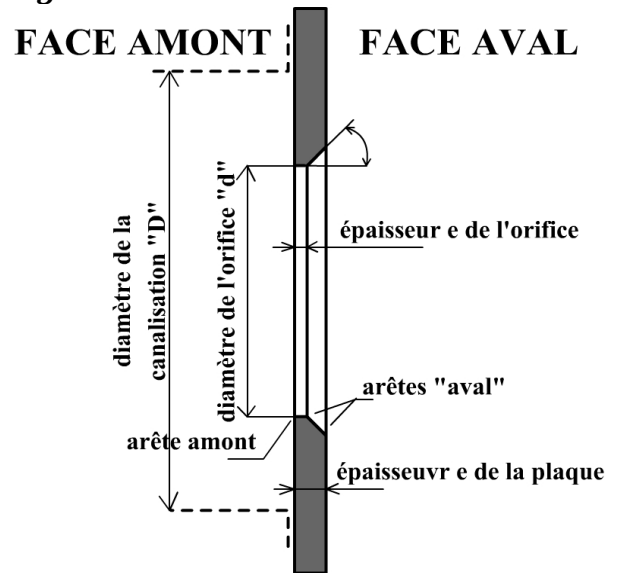


Figure 3.4.1.a vue en coupe

De plus, le diamètre  $d$  doit être supérieur à 12,5 mm, tandis que le rapport d'ouverture doit rester  $\beta = \frac{d}{D}$  compris entre 0,20 et 0,75.

Cet orifice doit être cylindrique et perpendiculaire à la face amont. Mais, si le diaphragme est le moins onéreux des organes déprimogènes, c'est aussi lui qui introduit la plus grande perte de charge des organes déprimogènes, puisque l'accroissement d'énergie cinétique est entièrement perdu en frottements dans le fluide situé en aval.

La valeur de cette perte de charge est de 40 % à 95 % de la  $\Delta p$  mesurée. Remarquons d'ailleurs qu'il ne faut pas confondre la perte de charge avec la pression différentielle mesurée (par contre, cette perte de charge dépend de la pression différentielle mesurée...).

Le profil des vitesses au passage d'un diaphragme est donné sur le schéma ci-dessous :

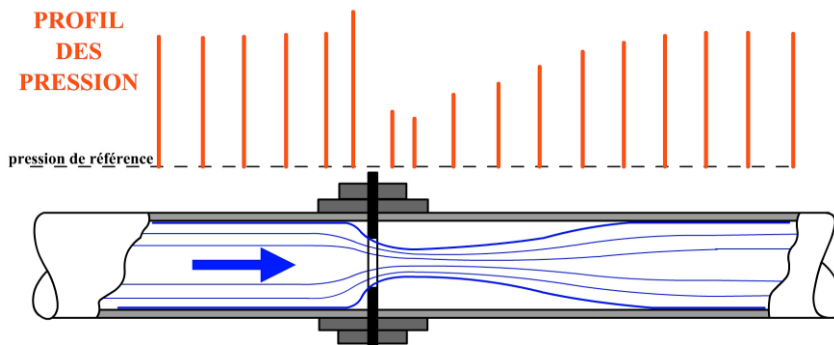


Figure. 1.3.4.1.b profil de l'écoulement et de la pression

Il y a plusieurs techniques de prise de pression qui sont résumées dans la figure suivante :

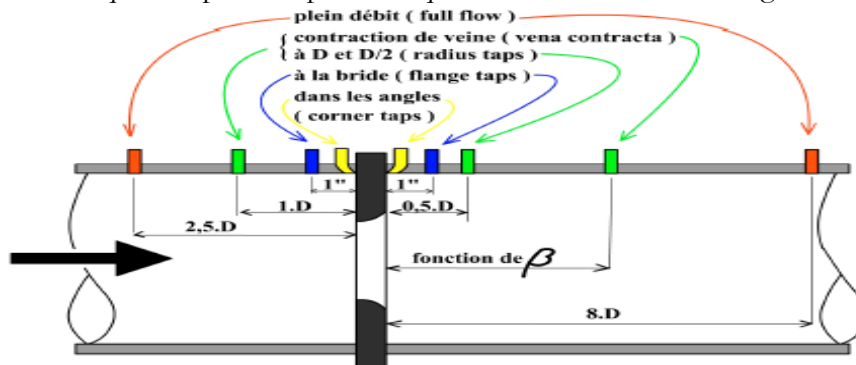


Fig. 1.3.4.1.c technique de prise de pression

Plusieurs normes existent pour la localisation du prélèvement de la pression, l'idéal, est d'avoir le prélèvement des pressions, en amont, elle doit être au point où le minimum de vitesse (maximum de pression), en aval elle doit être là où la vitesse est maximale dans la contraction de veine (minimum de pression)

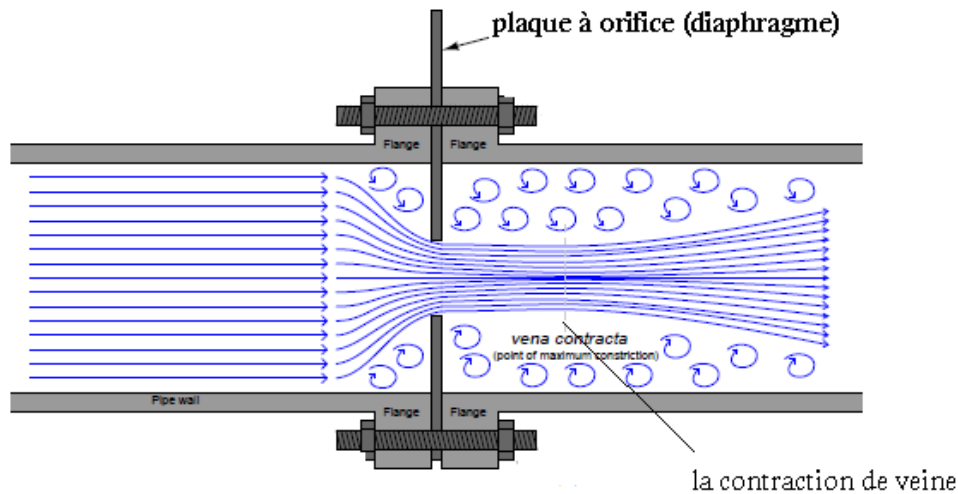


Figure. I.3.4.1.d influence de la plaque à orifice

#### 4. Comptage et Normes internationales :

Les caractéristiques métrologiques des débitmètres à appareil déprimogène étant le plus souvent connues par construction, sans étalonnage avec le fluide à mesurer, on a très rapidement entrepris de normaliser les types les mieux connus, de sorte que les divers utilisateurs puissent se référer à une base commune, indiscutée. Les premiers organismes à le faire furent probablement l'AGA (American Gas Association) et l'ISA (sigle de Fédération internationale des associations nationales de normalisation) auquel a succédé l'ISO (Organisation internationale de normalisation). Le document majeur en la matière est actuellement la norme ISO 5167 [2], reprise en norme européenne et en norme française par l'AFNOR (Association Française de Normalisation), document qui est encore en progrès malgré l'expérience considérable déjà accumulée en ce domaine ; le fait de construire et d'installer selon cette norme un débitmètre à diaphragme permet de l'utiliser sans avoir à l'étalonner, même dans des transactions commerciales.

Tous les types commerciaux d'appareil déprimogène, cependant, ne sont pas couverts par la norme ISO. C'est le cas notamment du standard Shell [3]-adossé néanmoins à une assez ancienne norme britannique [5]- pour les diaphragmes dits quart de cercle et à entrée conique, utilisables sur fluide visqueux. Il existe d'autres appareils déprimogènes tombés dans le domaine public, sans être normalisés au plan international; c'est le cas de certaines variantes de la plaque à orifice standardisés par l'American Gas Association. D'autres dispositifs, enfin, relèvent du domaine de la propriété privée; c'est le cas notamment des orifices intégrés, reposant sur des diaphragmes dont les spécifications sont souvent assez éloignées de celles que fixent les normes et standards, mais dont le constructeur fournit, sans réelles garanties parfois, la courbe d'étalonnage, les deux normes sont identiques sauf pour les unités, le coefficient de décharge, donc on cite seulement les points où les deux normes se différencient.

##### 4.1. La norme AGA3 :

###### 4.1.1. Généralités :

Le rapport N°3, de l'association Américaine de Gaz, a été développé comme guide d'application pour le comptage du gaz naturel à partir de la théorie qu'on a présenté en 3.3. & 3.4, en utilisant la plaque à orifice comme élément déprimogène en mesurant la pression différentielle, la pression et la température du gaz en écoulement, le système inch-pound est utilisé pour les unités des

grandeurs physiques, cette norme aussi décrit toutes les exigences de l'installation et la mise en œuvre du bond de comptage (voir annexe pour plus de détail). Les

#### 4.1.2. Formule du débit:

Comme il existe deux définitions de débit on a deux expressions du débit massique et volumique.

##### 4.1.2.1. Débit massique :

L'expression du débit massique du gaz naturel, en pound mass par heure, est développée à partir de la formule Eq 3.4.b, et Eq.3.3.1.d, et AGA 3 utilise une notation spécifique, qu'on explique plus tard. L'expression est la suivante<sup>1</sup> :

$$Q_v = 590.006 \cdot C_d(FT) \cdot Y_1 \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{Z_s \cdot G_r \cdot P_{f_1} \cdot h_w}{Z_{f_1} \cdot T_f}} \quad \text{Eq 4.1.2.1}$$

$Q_m$  = débit massique en pound masse par heure

$C(FT)$  = coefficient de décharge de la plaque à orifice

$d$  = diamètre de l'orifice en inch, calculé à la température de l'écoulement ( $T_f$ )

$E_v$  = facteur de la vitesse d'approche, définie en Eq.3.3.e

$G_r$  = densité relative du gaz réel. (La gravité spécifique)

$h_w$  = pression différentielle définie comme  $\Delta P$ .

$P_{f_1}$  = la pression statique en amont de l'orifice du fluide en écoulement

$T_f$  = la température du gaz en écoulement, en degré Rankine\*

$Y_1$  = facteur d'expansion définie auparavant comme  $\epsilon_1$ .

$Z_s$  = la compressibilité dans les conditions standards ( $P_s, T_s$ ).

$Z_f$  = la compressibilité dans les conditions d'écoulement en amont de l'orifice.

##### 4.1.2.2. Débit volumique :

L'expression du débit volumique du gaz naturel, en pied au cube par heure, est développée à partir de la formule Eq 3.4.b. AGA 3 qui utilise une notation anglo-saxonne, qu'on expliquera plus tard. L'expression est la suivante<sup>1</sup> :

$$Q_v = 7709.61 \cdot C_d(FT) \cdot E_v \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{P_1 \cdot Z_s \cdot h_w}{G_f \cdot Z_{f_1} \cdot T_f}} \quad \text{Eq.4.1.2.2}$$

#### 4.1.3. Expression des composants de la formule du débit :

##### 4.1.3.1. Rapport de diamètre $\beta$ :

c'est un paramètre très important pour le calcul des différents paramètres tel que le coefficient de décharge  $C_d(FT)$ ....  $\beta$  est le quotient des deux diamètres  $d$ (diamètre de l'orifice) et  $D$ (diamètre interne du pipe). Le calcul de ces deux diamètres doit se faire à la température de l'écoulement ce qui demande d'actualiser leurs valeurs en fonction des variations de la température en prenant compte les déformations dues à la température donc :

$$\beta = \frac{d}{D} \quad \text{Eq 4.1.3.a}$$

$$d = d_r [1 + \alpha_1 (T_f - T_r)] \quad \text{Eq 4.1.3.b}$$

$$D = D_r [1 + \alpha_2 (T_f - T_r)] \quad \text{Eq 4.1.3.c}$$

$D_r, d_r$  sont calculés à une température de référence  $T_r$ , les coefficients  $\alpha_1, \alpha_2$  sont les coefficients de dilatation thermique linéaire de diamètres,

**4.1.3.2. Coefficient de décharge Cd(FT) :**

L'expression du coefficient de décharge est définie par l'équation Eq 4.1.3.2, il dépend essentiellement du  $\beta$ , caractéristique géométrique, et du nombre de Reynolds  $Re_D$

L'expression du coefficient de décharge sera donc :

$$Cd = Ci(FT) + 0.00051 \left( \frac{10^{-7} \beta}{Re_D} \right)^{0.7} + (0.0210 + 0.0049A) \beta^4 C \quad Eq. 4.1.3.2. a$$

$$Ci(FT) = Ci(CT) + TapTerm$$

$$Ci(CT) = 0.5961 + 0.0291\beta^2 - 0.2290\beta^8 + 0.003(1 - \beta)M_1$$

$$TapTerm = Upstrm + DnTerm$$

$$Upstrm = [0.0433 + 0.0712e^{-8.5L_1} - 0.1145e^{-6.0L_2}] (1 - 0.23A)B$$

$$Dnstrm = -0.0116[M_2 - 0.52M_2^{1.3}] \beta^{1.1} (1 - 0.14A)$$

**4.1.3.3. L'expression du  $Re_D$  :**

Le nombre de Reynolds du pipe ( $Re_D$ ) est utilisé comme paramètre de corrélation pour représenter le changement dans le coefficient de décharge Cd(FT), sa définition est :

$$Re_D = 47.0723 \cdot \frac{Q_v \cdot G_r}{D} \quad Eq 4.1.3.4$$

Le nombre de Reynolds dépend des paramètres de gaz et des paramètres de l'écoulement.

**4.1.3.4. Facteur d'expansion:**

Le facteur d'expansion du gaz ( $Y_1$ ), dans le AGA 3, est définie comme suit :

$$Y_1 = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \left( \frac{x_1}{k} \right) \quad Eq 4.1.3.3.a$$

Avec

$$x_1 = \frac{P_{f_1} - P_{f_2}}{P_{f_1}} = \frac{h_w}{27.707 P_{f_1}} \quad Eq.4.1.3.3.b$$

**4.2. La norme ISO 5167-2 :2003 ;****4.2.1. Généralités :**

ISO (organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale responsable pour unifier les techniques, services, appareils etc..., le travail de préparation des standards internationaux est fait par la commission technique, le rapport ISO 5167 :2003, mesure du débit de de fluide par le biais d'un élément déprimogène dans une conduite circulaire , ce rapport est constitué de quatre parties :

Partie N°1 : principes et exigences

Partie N°2 : palque à orifice

Partie N°3 : bec et bec de venturi

Partie N°4 : tube de venturi



Dans cette norme on trouve toutes les spécifications et les formules nécessaires dans ce projet, on s'intéresse à la deuxième partie, plaque à orifice.

#### 4.2.2. Formule du débit:

##### 4.2.2.1. Débit massique :

La formule du débit massique est la même que celle de la norme AGA3, sauf que les unités et les symboles des coefficients prennent une forme différentes, la formule sera donc ;

$$Q_v = \frac{C}{\sqrt{[1 - V_1^2 / V_2^2]}} \cdot \varepsilon_1 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \sqrt{2 \cdot \Delta P \cdot \rho_1} \quad \text{Eq 4.2.2.1}$$

##### 4.2.2.2. Débit volumique :

Il suffit d'utiliser la formule  $Q_v = \frac{Q_m}{\rho_1}$  pour déduire le débit volumique.

#### 4.2.3. Expression des composants de la formule du débit :

##### 4.2.3.1. Coefficient de décharge C :

Le coefficient de décharge C, est définie dans iso 5167-2 :2003, par l'équation :

$$C = 0,5961 + 0,0261\beta^2 - 0,216\beta^8 + 0,000521 \left( \frac{10^6 \beta}{Re_D} \right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063A)\beta^{3,5} \left( \frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,3} \\ + (0,043 + 0,080e^{-10L_1} - 0,123e^{-7L_1})(1 - 0,11A) \frac{\beta^4}{1 - \beta^4} - 0,031(M_2' - 0,8M_2'^{1,1})\beta^{1,3} \\ \text{Eq 4.2.3.1}$$

Si  $D < 71,12 \text{ mm}$  (2.8in) il faut ajouter le terme  $+ 0,011(0,75 - \beta) \left[ 2,8 - \frac{D}{25,4} \right]$ , pour plus de détails sur les éléments de la formule du coefficient de décharge

##### 4.2.3.2. Le facteur d'expansion du gaz $\varepsilon_1$ :

Pour les trois types de piquage des pressions, La formule empirique du facteur  $\varepsilon_1$

$$\varepsilon = 1 - \left( 0,351 + 0,256\beta^4 + 0,93\beta^8 \right) \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{1/k} \right] \quad \text{Eq 4.2.3.2}$$

**N.B** ; les autres coefficients sont semblables à AGA 3, et différent seulement des unités

## 5. Contribution du projet:

L'objectif de ce projet est de concevoir un système à base de microprocesseurs capable de faire le comptage de débit de gaz en se basant sur la théorie et les formules empiriques données par les deux normes internationales AGA3 et ISO 5156-2 :2003, [Flow-rate Computer (FrC)], le système est complet, il fait l'acquisition des signaux analogiques 4-20 mA, provenant des transmetteurs TT, DPT et PT, le traitement numérique des données, l'enregistrement, l'affichage de la valeur du débit et le total, la communication avec PC ou PLC, la figure suivante illustre la boîte l'emplacement du système objectif de ce projet.

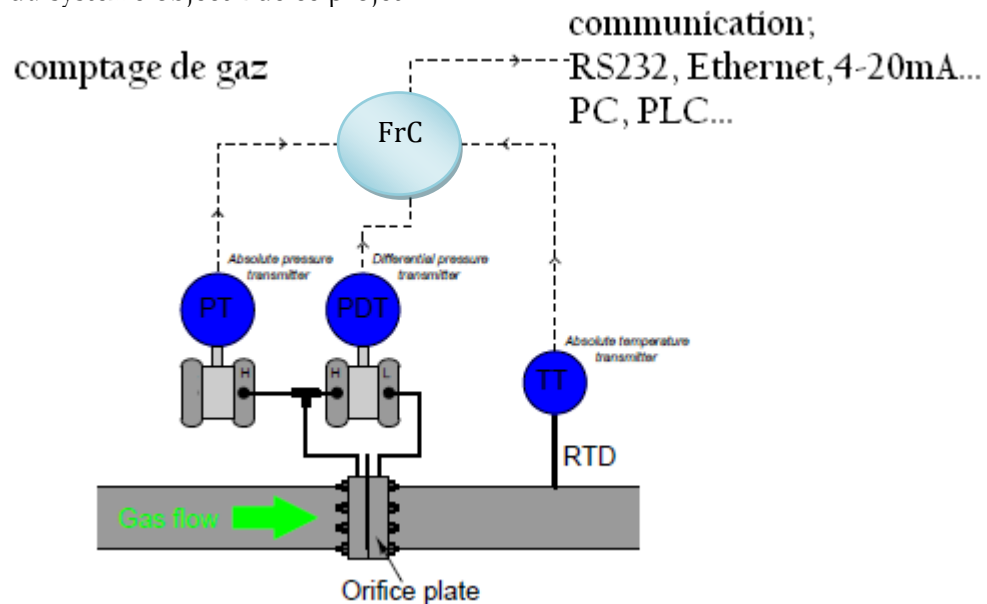


Figure 5, le FrC est la contribution apportée par ce projet

## 6. Conclusion :

Dans le cadre de La recherche et le développement des instruments, on commence toujours par la bonne compréhension des principes théoriques qui décrivent les phénomènes physiques et leurs donnent les significations exactes et les expressions théoriques qui aidera plus tard à trouver le modèle mathématique le plus proche de la pratique, soit par des formules empiriques ou par des approximations basées sur des considérations à prendre lors de la conception et réalisation des systèmes, pour cela une architecture hardware du système doit répondre à ces exigences et l'implémentation d'algorithme puissant pour réaliser des calculs de plus en plus précis. Elle doit prendre en considération les modèles mathématiques recommandés par la norme, le temps et l'environnement de travail du système exigés par les organismes de contrôle vu que le but de notre système est destiné à des fins de transaction commerciale.



# Chapitre II :

## Conception de l'architecture hardware du calculateur basée sur PIC 18F4520

---

### **1. Introduction :**

Les fabricants de composants électroniques fournissent sur le marché actuel une multitude de modules pouvant remplir des fonctions diverses, aux performances et aux coûts très variés. Pour

organiser un système d'acquisition de données, le concepteur doit connaître parfaitement toutes les fonctionnalités et toutes les caractéristiques du système qu'il désire élaborer, pour faire un choix judicieux de modules adaptés à ses besoins.

La conception du système de comptage selon les normes internationales basée sur la théorie mentionnée dans le premier chapitre, nécessite une architecture hardware et software puissante, afin de satisfaire les contraintes de la précision, le temps réel, communication réseau et autres exigences optionnelles selon le milieu industriel en question.

Le système comporte plusieurs étages : acquisition, traitement et restitution. La description de ces étages hardware est l'objet de ce chapitre, qui décrit l'architecture matérielle du système sur une carte de développement universelle (EasyPic5) qu'on décrit par la suite, autour d'un microcontrôleur PIC18F4520, seulement une partie de la carte sera utilisée pour la réalisation du système de comptage autour du microcontrôleur su cité

Pour la réalisation finale dans le cas où le système fonctionnerait convenablement, elle serait celle qu'on utilisera lors de la simulation avec Proteus (logiciels de simulation), donc cette étape dépend de la fonctionnalité du système, lors de son développement.

L'architecture hardware du système, décrit le principe de fonctionnement de l'appareil de comptage qu'on va concevoir, pour cela dans ce chapitre, on va entamer d'une façon détaillée cette architecture afin de pouvoir implémenter une architecture software (chapitre III) dont l'ensemble permet de réaliser un appareil de comptage selon les normes internationales.

## **2. Présentation générale :**

### **2.1. Les systèmes autour d'un microcontrôleur :**

Le choix du microcontrôleur et de ses circuits périphériques doit être dicté par l'analyse du système à réaliser, parce que le système conçu met en jeu, d'une part, un matériel (constitué par les composants de micro-informatique, processeur, mémoires, dispositifs d'entrée-sortie, et des composants d'électronique classique) et, d'autre part, un logiciel (implanté en mémoire), et que la frontière qui les sépare n'est pas figée. En effet, le logiciel est susceptible d'effectuer certaines tâches que peut effectuer le matériel. En général, ce sont les exigences de vitesse (caractéristique essentielle du matériel) et de souplesse (caractéristique essentielle du logiciel) qui permettront de déterminer les tâches que devra supporter le matériel et d'en déduire ce que devra faire le logiciel.

#### **2.1.1. La carte de développement :**

Dans ce paragraphe, on va décrire la carte qu'on va utiliser pour le développement du système, cette carte a plusieurs avantages, qui la rendent un outil puissant de conception des systèmes autour des microcontrôleurs, elle fournit tous les périphériques nécessaires pour le bon fonctionnement de l'appareil. La figure suivante, illustre une vue de dessus de la carte, les parties qui nous intéressent, seront expliquées par la suite dans les paragraphes qui les correspondent. Les parties entourées sont les blocs qui forment la carte électronique de l'appareil de comptage

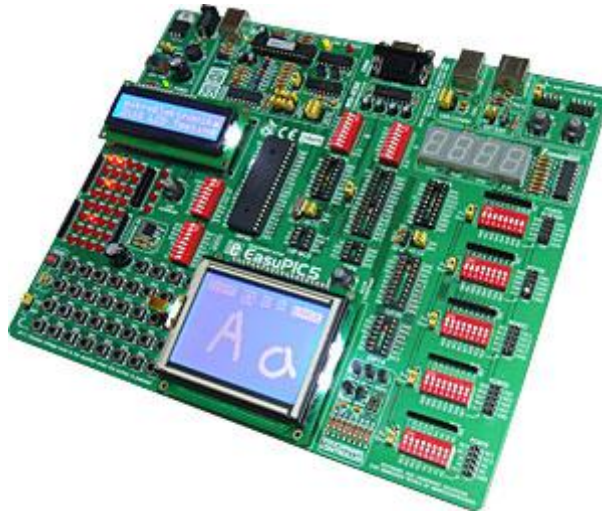


Fig. II.1.1.2.a la carte de développement EasyPic5

La figure ci-dessus montre la carte de développement avec les deux afficheur LCD 2\*16 et l'afficheur graphique 128\*64.

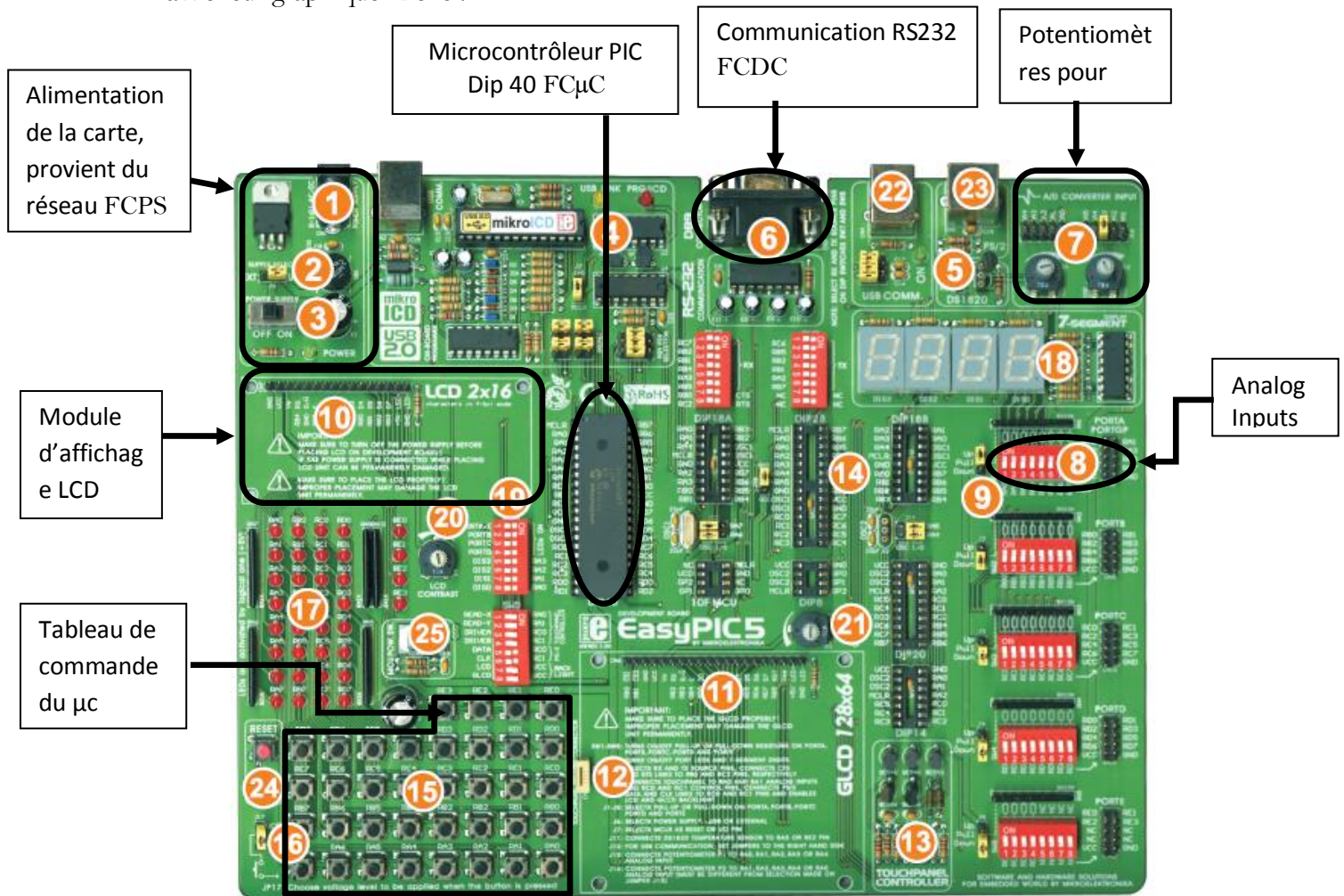


Fig. II.1.1.2.b la carte de développement et les parties nécessaires pour le projet

- FCAI : flow computer analog inputs.
- FCVR : flow computer voltage references.
- FCDC : flow computer data communication
- FC $\mu$ C : flow computer  $\mu$ Controller

FCPS : flow computer power supply

FCDD : flow computer data display

FCCP : flow computer control panel

## 2.2. Conception la carte électronique du système de comptage.

En pratique pour faire la conception il faut , tout d'abord avoir à l'esprit le schéma synoptique général, le fonctionnement par blocs du système global, ce qui permet, par la suite, de faire la conception du circuit électronique à l'aide d'un logiciel qui possède les éléments nécessaires pour élaborer le schéma électronique, la simulation et la mise en œuvre du circuit imprimé.

Proteus 7.3 Professionnel, est le logiciel utilisé dans ce projet, il permet de faire la mise en œuvre de la carte, de la conception à la réalisation, grâce à l'environnement qu'il possède et une vaste librairie de composants avec leurs datasheets, aussi la simulation est l'un des éléments de Proteus qui aide à concrétiser le fonctionnement du système.

Dans ce paragraphe, on va décrire le schéma synoptique général, et le fonctionnement par bloc des différentes parties de l'appareil, puis le schéma électronique de la carte sous Proteus.

### 2.2.1. Synoptique général :

Le fonctionnement de la carte est illustré par la figure Fig. II.1.2.1, on peut le resumer dans les points suivants :

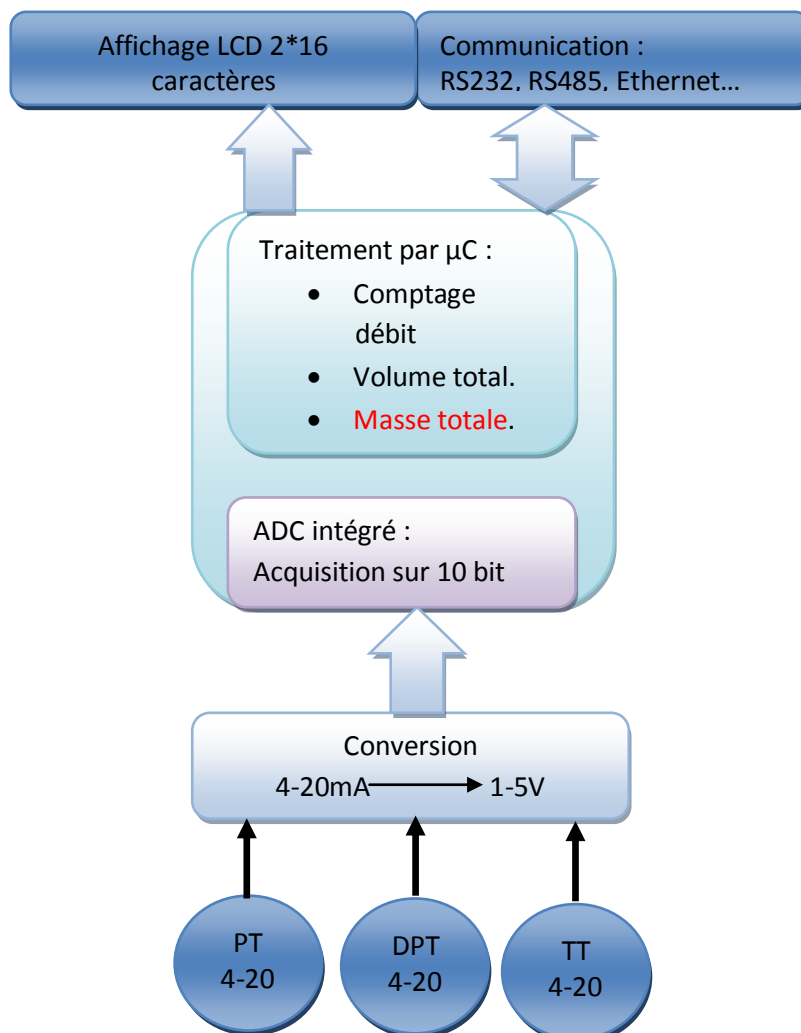


Fig. II.1.2.1. Synoptique générale de l'architecture hardware

- Les trois signaux analogiques de courant 4-20 mA, proviennent des transmetteurs de pression, différence de pression et de température,

- Les signaux en courant analogiques seront convertis par les résistances, vers des signaux analogiques en tension 1-5V, afin que le  $\mu C$  puisse l'acquérir
- Le  $\mu C$  convertit les signaux analogiques en signaux numériques sur un mot binaire de 10bit, en utilisant le CAN (Convertisseur Analogique Numérique) intégré (décrit par la suite).
- Dès que les valeurs de la pression, pression différentielle et la température sont acquises par le  $\mu C$ , ce dernier fait le traitement des données pour le comptage du débit et le total de la quantité du gaz qui traverse la plaque à orifice.
- A la fin de ce comptage, les résultats seront transmises vers un afficheur LDC 2\*16, et vers d'autres appareils sur le plan d'exploitation ou la supervision.
- Ce cycle se répète avec une cadence à spécifier dans la suite du projet qui va dépendre des caractéristiques de l'application et du processus.

**N.B:** les valeurs des différentes mesures intrinsèques à l'installation seront chargées, dans la mémoire du  $\mu C$ , par l'intermédiaire de la communication PC, à l'aide d'une interface qu'on va développer dans ce projet une fois on aura réussi le fonctionnement global de la carte.

**2.2.2. Schéma électronique de la carte :**

La figure suivante, montre le schéma du circuit de la carte, qui va constituer l'appareil de comptage,

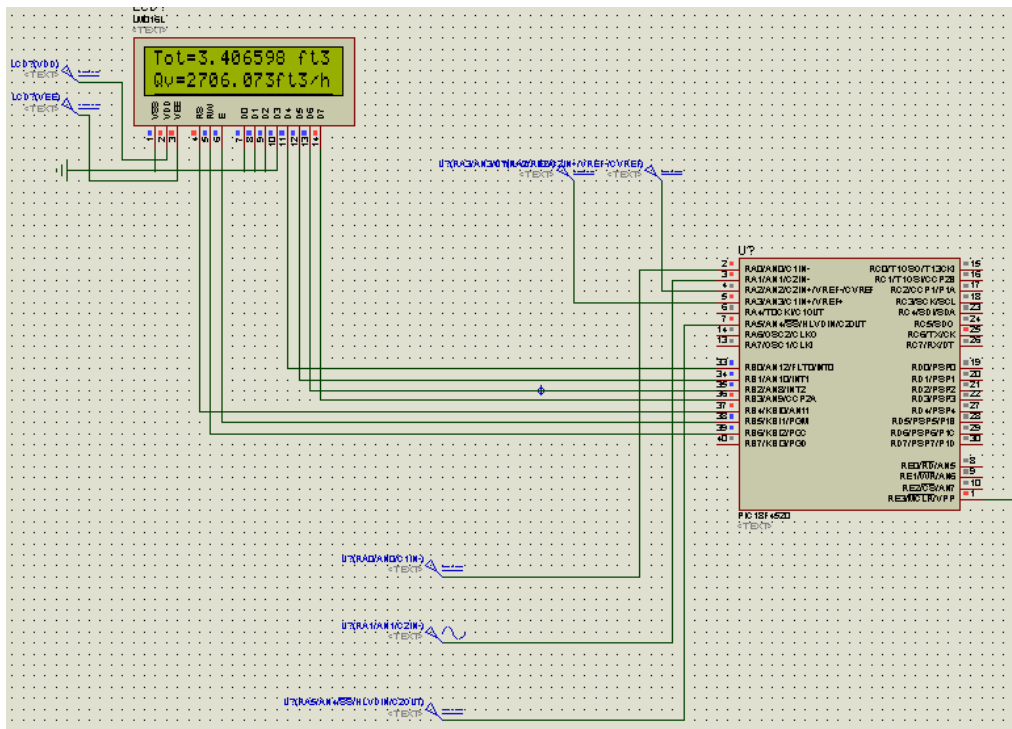


Fig .II.1.2.3.schéma du circuit électronique réalisé avec proteus

**3. Microcontrôleur de traitement :**

**3.1. Le  $\mu$ Contrôleur :**



**3.1.1. Caractéristiques générales de la famille 18F4520 :**

Tous ces composants sont identiques, aux Les différences fondamentales entre ces PIC® sont donc les quantités de mémoires disponibles, le nombre d'entrées/sorties, le nombre de convertisseurs de type « analogique/digital » (dire « analogique/numérique », et le nombre et le type des ports intégrés.

A l'heure actuelle, ces composants existent dans divers types de boîtiers. Les boîtiers 40 broches sont utilisés par les composants qui disposent d'un port parallèle, comme le 18F4520.

**3.1.2. Architecture interne PIC18F4520 :**

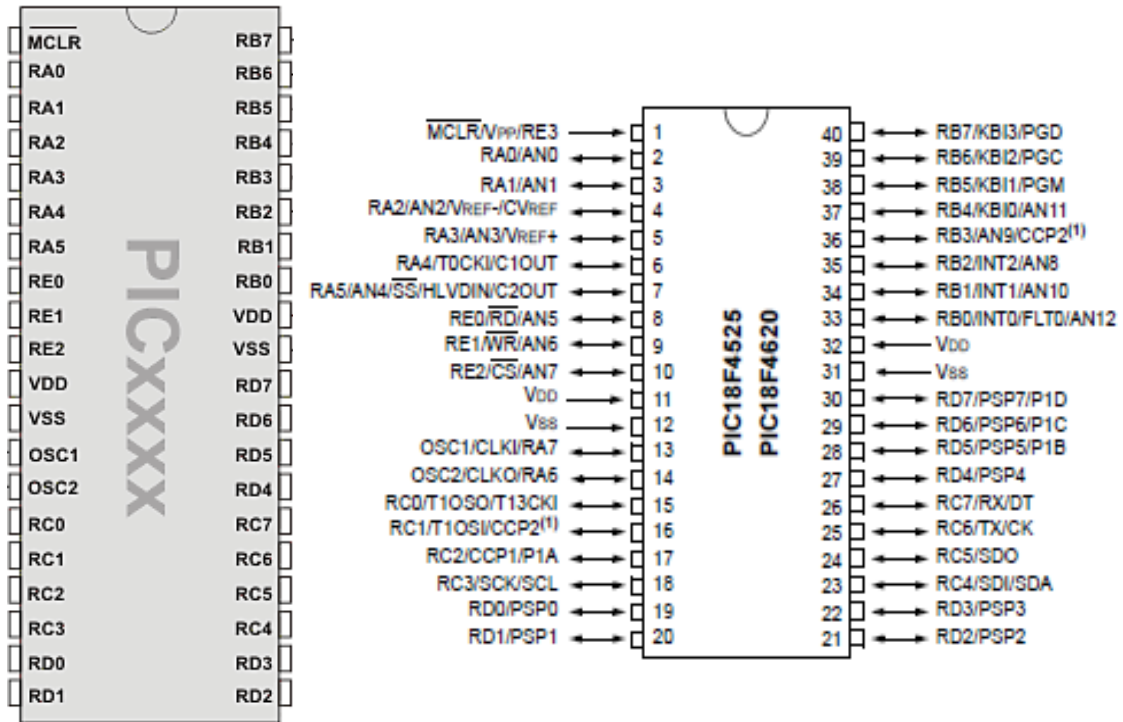


Fig. II.1.1.6.a vue de dessus du PIC18F4520

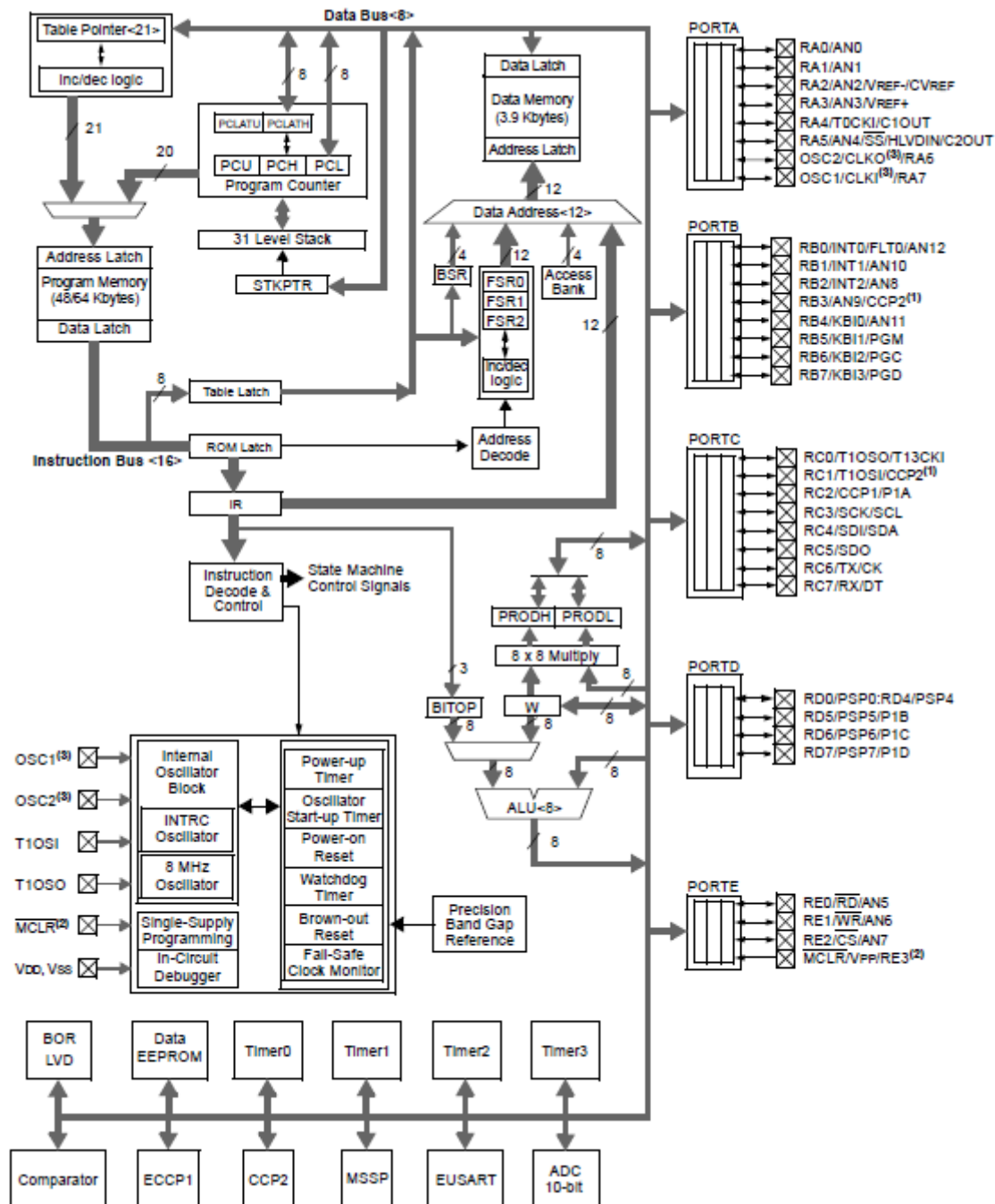


Fig. II.1.1.6.b architecture interne du PIC18F4520

### 3.2. L'interface de commande :

L'interface de commande, dans notre projet, est composée de deux parties, hardware et software,

#### 3.2.1. Hardware:

Au cours de l'exploitation de l'appareil, l'opérateur a besoin d'effectuer plusieurs opérations telles que ; initialisation, réglage, maintenance...

Cette interface est réalisée, par des boutons poussoirs, dans la carte EasyPic5 la partie 15, illustrée dans la figure, Fig. II.1.1.1.a, lors du developpement, à la fin de la réalisation on utilise des boutons spécifiques,

Elle utilisée aussi pour, la configuration des Span (étendues), de la pression statique, différentielle et la température, pour faire la correspondance entre les grandeurs physiques et la tension d'entrée au microcontrôleur.

$$\begin{array}{l} P_{\min} - P_{\max} \\ \Delta P_{\min} - \Delta P_{\max} \\ T_{\min} - T_{\max} \end{array} \quad \begin{array}{l} \longrightarrow \\ \longrightarrow \\ \longrightarrow \end{array} \quad \begin{array}{l} V_{\text{ref-}} - V_{\text{ref+}} \\ V_{\text{ref-}} - V_{\text{ref+}} \\ V_{\text{ref-}} - V_{\text{ref+}} \end{array}$$

La relation qui lie les deux types de variation, est linéaire, la figure suivante illustre cette linéarité :

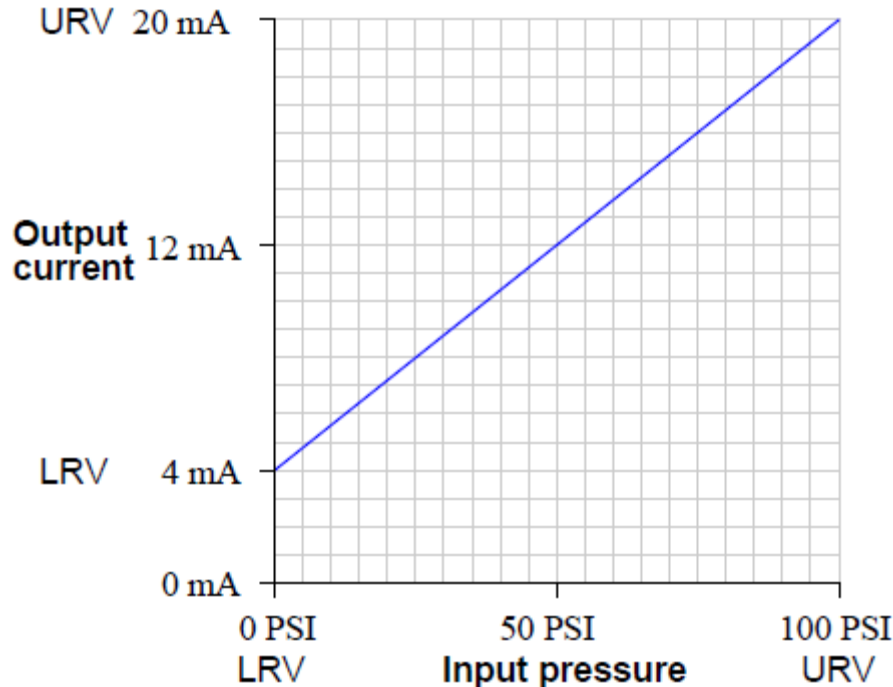


Fig. II.2.2.1.b graphe reliant la grandeur physique et la sortie du transmetteur

N'importe relation linéaire, peut être decrite par la relation mathématique suivante :

$$y = m \cdot x + b$$

Donc il suffit de déterminer, par configuration manuelle, LRV et URV, des grandeurs physiques, qui représentent  $x_m$  et  $x_M$  respectivement. Le programme implémenté sur le  $\mu C$ , va déterminer  $m$ , car  $b$  sera toujours  $b=1V$ , qui correspond à 4mA.

La relation mathématique, entre la grandeur physique et le nombre représentant la valeur de cette grandeur dans le  $\mu C$  sur 10bit :

$$V_m = \frac{1023}{\text{étendue}} (x - LRV) \quad \text{Eq.II.2.2.1}$$

$x$  : pression absolue, différentielle ou température

$V_m$  : nombre binaire codé sur 10 bits

### 3.2.2. Software :

Cette interface est utilisée pour la configuration les paramètres, spécifiques du banc de comptage, ces paramètres ne sont modifiables au cours de l'exploitation, du système de comptage ils seront déterminés lorsqu'on fera la conception, sa programmation sera decrit dans le chapitre 3 et les essais dans le chapitre 4

### 3.3. Conclusion :

Pour pouvoir faire une bonne réalisation de ce système conçu de tel, il faut respecter les blocs principales du système décrit dans ce chapitre

## 4. L'acquisition de donnée et communication;

### 4.1. Introduction. :

L'acquisition de données, qui consiste à obtenir les différentes grandeurs physiques mises en jeu dans un système (lequel peut être une unité de production ou une station de recherche scientifique), voit son importance sans cesse accrue, parce qu'elle contribue efficacement à améliorer le bon fonctionnement du système en vue d'assurer la qualité des produits fabriqués. La technique d'acquisition évolue avec les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique numérique et en particulier dans celui des microprocesseurs.

L'évolution de l'électronique numérique a fait des apports majeurs à l'instrumentation industrielle, dès le début de son apparition, le calcul numérique en 1960 jusqu'à l'apparition des DCS en 1970 et les transmetteurs intelligents en 1980, cette technologie a permis d'améliorer le transfert et le partage de l'information de mesure, de contrôle et d'instrumentation. L'objet de cette section est de présenter notre application, de l'acquisition de données sur plusieurs étapes (étape d'acquisition), pour pouvoir exploiter le signal dans le comptage de gaz par le microcontrôleur

### 4.2. La grandeur physique et le signal 4-20mA :

La relation qui relie la valeur de la grandeur physique et la valeur du courant en milliampère est linéaire  $y = m \cdot x + b$ ,  $y$  est la valeur équivalente en courant,  $x$  est la valeur du pourcentage désiré du signal,  $m$  est l'étendu de 4-20mA (16mA),  $b$  est l'offset de  $y$  comme représenté dans la figure 2.2.1.b. Le calcul de la valeur équivalente  $y$  en connaissant  $x$  est fait par :

$$\text{courant} = (16\text{mA}) \left( \frac{x}{100\%} \right) + (4\text{mA}) \quad \text{Eq.II.3.2.a}$$

En générale, dans ce genre de relation dans les différents types de transmetteurs :

$$\text{valeur}_{\text{mesurée}} = (\text{étendu}) \left( \frac{x}{100\%} \right) + (\text{LRV}) \quad \text{LRV : Lower Value,}$$

$x$  : point de la valeur d'entrée Eq.II.3.2.a

Exemple :

Un transmetteur de température mesure sur un étendu de 50 à 140°F, avec un signal de sortie 4-20mA, si la température mesurée est 79°F, la sortie sera comme suit :

$$79^\circ\text{F} \text{ donne } x = 32.2\%, \text{ et } \text{courant} = (16\text{mA}) \left( \frac{32.2}{100\%} \right) + (4\text{mA})$$

La sortie sera donc 9.16mA.

Donc l'image de 79°F en courant est 9.16mA.

### 4.3. Conversion courant tension :

L'entrée sur le  $\mu\text{C}$  est en tension, donc il nous faut convertir le signal issu du transmetteur en tension car les entrées du  $\mu\text{C}$  sont en tension de  $V_{\text{max}} = 5\text{V}$ , tout en gardant une linéarité et une bonne résolution.

La solution est d'utiliser une simple résistance de précision, le  $\mu\text{C}$  reçoit [0,5] V, donc

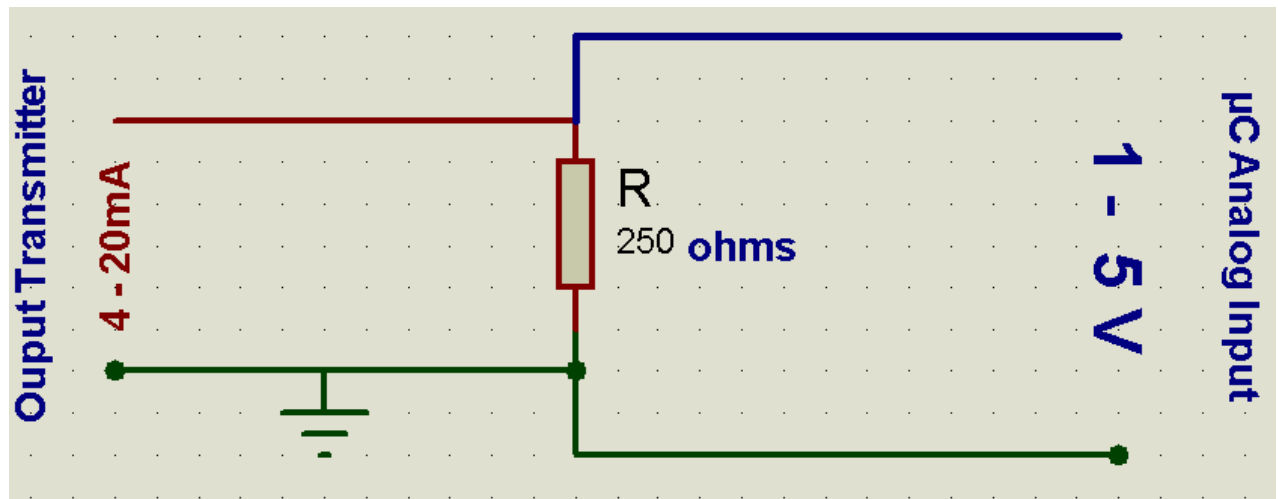


Fig. II.3.3.a conversion courant-tension

x Pourcentage de la mesure	%	signal 4-20 mA	signal 1-5 V
0		4.0	1
10		5.6	1.4
20		7.2	1.8
25		8.0	2.0
30		8.8	2.2
40		10.4	2.6
50		12.0	3.0
60		13.6	3.4
70		15.2	3.8
75		16.0	4.0
80		16.8	4.2
90		18.4	4.6
100		20.0	5.0

Tab .II.3.3. Tableau de conversion courant-tension

La figure et le tableau montrent qu'on va utiliser les entrées analogiques du microcontrôleur. Dans ce projet, nous avons trois entrées analogiques (analog input), le traitement par le  $\mu\text{C}$  est numérique, le signal nécessite donc une conversion analogique-numérique à l'entrée analogique du  $\mu\text{C}$ ,

#### 4.4. Conversion analogique/numérique (A/N) :

La conversion A/N, ou la numérisation du signal analogique, est l'interface entre les grandeurs physiques qui sont analogiques (qui prennent une infinité de valeurs) ou les capteurs (transmetteur) analogique, et les unités de traitement (calculateurs, processeur...) car ces unités ne peuvent pas traiter tout les points (niveaux) que peut prendre cette grandeur, d'où la nécessité majeure de cette opération dans ce genre de réalisation. Ce signal va être numériser par un module (Convertisseur A/N) (CAN) ou (ADC en anglais).

Plusieurs types de ADC, sont utilisés, ils sont basés sur plusieurs techniques de conversion ;(ADC à rampes, ADC à approximations successives, ADC parallèles –flash-...), c'est le type d'ADC utilisé qui détermine les performances métrologiques du système (résolution, précision et stabilité...), l'ADC dans ce projet est intégré au microcontrôleur.

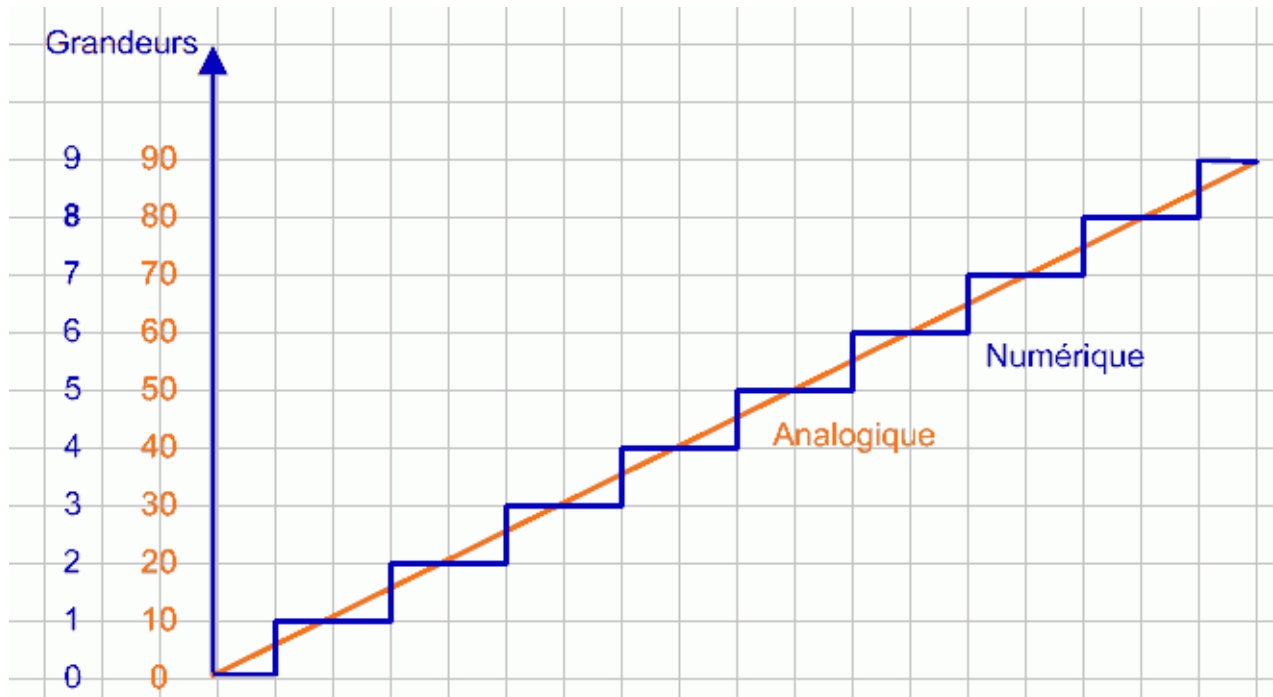


Fig. II.3.4.a conversion A/N (Fonction transfert du convertisseur)

Sachez que le principe utilisé dans notre  $\mu C$ , est celui de l'approximation successive. C'est une méthode de type dichotomique, c'est un bien grand mot pour exprimer une méthode somme toutes assez intuitive. Il s'agit tout simplement de couper l'intervalle dans lequel se trouve la grandeur analogique en 2 parties égales, et de déterminer dans laquelle de ces 2 parties se situe la valeur à numériser. Une fois cet intervalle déterminé, on le coupe de nouveau en 2, et ainsi de suite jusqu'à obtenir la précision demandée.

#### 4.5. Principes de conversion des microcontrôleurs:

Jusqu'à présent, nous venons de raisonner en décimal. Les PIC®, eux travaillent en binaire. Notre microcontrôleur travaille avec un convertisseur analogique / numérique ADC qui permet un échantillonnage sur 10 bits. Le signal numérique peut donc prendre 1024 valeurs possibles. Pour pouvoir convertir une grandeur, nous devons connaître la valeur minimale qu'elle peut prendre, ainsi que sa valeur maximale. Le microcontrôleur considère dans ce projet la valeur minimale ( $V_{ref} = 1\text{Volts}$  pour  $R = 250\Omega$ ), tandis que la valeur maximale correspond à la tension positive d'alimentation  $V_{dd}$ . Nous verrons cependant qu'il est possible d'utiliser d'autres valeurs. Nous n'avons toujours pas parlé des méthodes utilisées pour convertir physiquement la grandeur analogique en grandeur numérique au coeur du microcontrôleur. Il est inutile d'entrer ici dans un cours d'électronique appliquée, mais il est bon de connaître le principe utilisé, car cela va nous aider à comprendre la suite. La séquence est la suivante :

Le microcontrôleur connecte la pin (brêche) sur laquelle se trouve la tension à numériser à un condensateur interne, qui va se charger via une résistance interne jusque la tension appliquée. La pin est déconnectée du condensateur, et ce dernier est connecté sur le convertisseur analogique/numérique interne.

Le microcontrôleur procède à la conversion.

Plusieurs remarques et questions sont soulevées par cette procédure. En tout premier lieu, le condensateur va mettre un certain temps à se charger, il nous faut donc connaître ce temps. Ensuite, il nous faut comprendre comment fonctionne la conversion, pour évaluer le temps mis pour cette conversion.

Ceci nous donnera le temps total nécessaire, afin de savoir quelle est la fréquence maximale d'échantillonnage pour notre microcontrôleur.

Remarquez que si le signal varie après le temps de charge du condensateur interne, cette variation ne sera pas prise en compte, puisque la pin sera déconnectée du dit condensateur.

#### 4.6. Caractéristique de l'ADC du microcontrôleur:

Un ADC est un circuit électronique qui reçoit à l'entrée un signal de tension analogique, et génère à la sortie un signal binaire multi-bit (numérique), Le  $\mu\text{C}$  contient un ADC intégré dont les caractéristiques sont :

##### 4.6.1. La résolution de l'ADC:

La résolution est un paramètre important pour les ADCs, c'est le nombre ( $n$ ) de bits du mot binaire délivré à la sortie de l'ADC, ce nombre donne  $2^n$  niveaux discret, ou bien  $2^n - 1$  incréments, qui peuvent être donnés par le ADC, cette résolution est exprimée en bit.

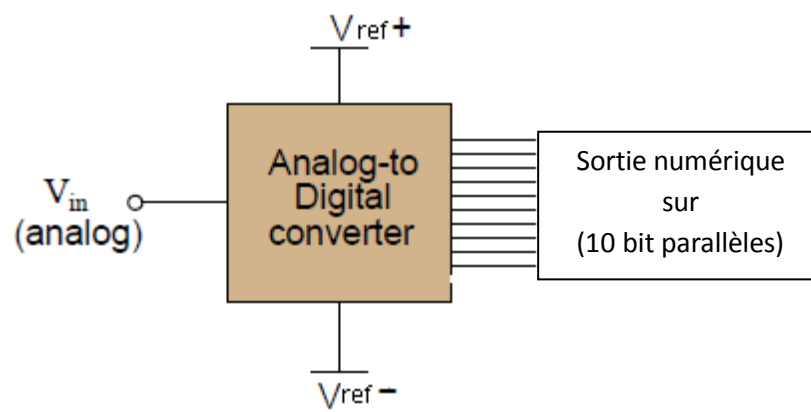


Fig. II.3.5.1.a convertisseur Analogique-Numérique

$V_{in}$  provient de la mesure.

$V_{ref+}$ ,  $V_{ref-}$  sont les tensions de références de l'ADC,  $V_{ref+}=5\text{Volts}$ ,  $V_{ref-}=1\text{Volts}$  pour  $R=250\Omega$ . Ces deux valeurs déterminent l'échelle maximale de la conversion correspondant à 4-20mA.

##### 4.6.1.1. Précision et incertitude :

La résolution analogique, ou bien la précision de l'ADC, est exprimée par l'expression suivante :

$$resolution\_ana\logique = \frac{\text{étendue(volts)}}{2^n - 1} \quad Eq.II.3.4.1.2$$

Pour ce projet l'échelle est (1-5) V, l'étendue est de 4volts.

Le mot binaire est de 10 bit donc  $n=10$ .

La précision en tension sera  $\Delta V=3.91\text{ mVolts}$ .

La précision en courant est de  $\Delta I=15.64\text{ }\mu\text{Ampère}$ .

La précision en unité de la grandeur mesurée  $\Delta P$ ,  $\Delta T$ ..., se calcul de la même manière selon le cas. Car chaque'un a une étendue différente.

Cette précision sera nécessaire pour connaître les incertitudes dans le comptage car, chaque entrée analogique correspond à une grandeur (température, pression statique et pression différentielle), et elle sera configurée lors de l'exploitation du système car chaque exploitant a son étendue particulière selon l'application de comptage. Dans ce mémoire on va faire des essais, vous trouverez un exemple dans le chapitre 4.

#### 4.6.1.2. Temps d'acquisition :

C'est le temps qu'il faut pour que le condensateur interne atteigne une tension proche de la tension à convertir. Cette charge s'effectue à travers une résistance interne et la résistance de la source connectée à la pin.

Ce temps est incrémenté du temps de réaction des circuits internes, et d'un temps qui dépend de la température (coefficient de température). Il faut savoir en effet que les résistances augmentent avec la température, donc les temps de réaction des circuits également.

Donc, si on pose :

Tacq = temps d'acquisition total

Tamp = temps de réaction des circuits

Tc = temps de charge du condensateur

Tcoff = temps qui dépend du coefficient de température.

La formule est donc :

Tacq = Tamp + Tc + Tcoff

Le temps de réaction Tamp est typiquement de 2µs, donc pas de problème à ce niveau :

Tamp = 2µs

Pour le coefficient de température, il n'est nécessaire que pour les températures supérieures à 25°C. Dans les autres cas, il n'entre pas en compte. Ce coefficient est typiquement de 0,05 µs par °C qui est supérieur à 25°C. Il s'agit bien entendu de la t° du microcontrôleur, et non de la température ambiante.

Donc, ce temps Tcoff sera au minimum de 0 (à moins de 25°C) et au maximum de (50-25)\*0.05, soit 1,25 µs. La t° du microcontrôleur ne pouvant pas, en effet, excéder 50°C.

$$0 \leq T_{\text{coff}} \leq 1,25\mu\text{s}$$

Première constatation, si nous voulons bénéficier d'une fréquence maximale, nous devons maintenir le microcontrôleur sous 25°C.

Reste le temps de charge. Ce temps de charge dépend de la résistance placée en série avec le condensateur. En fait, il y a 2 résistances, celle de notre source de signal, et celle à l'intérieur du microcontrôleur.

Il est recommandé que la résistance de notre source reste inférieure à 10KOhms.

Celle interne au PIC® est directement liée à la tension d'alimentation. Plus la tension baisse, plus la résistance est élevée, donc plus le temps de chargement est long.

Donc, de nouveau, pour obtenir de hautes vitesses, il faudrait alimenter le microcontrôleur avec la tension maximale supportée, soit 6V à l'heure actuelle pour le 16F876.

La résistance interne totale (composée de 2 résistances internes) varie de 6Kohms à 6V pour arriver à 12Kohms sous 3V, en passant par 8Kohms sous 5V.

De plus, comme la charge du condensateur dépend également de la résistance de la source du signal, pour augmenter la vitesse, nous devons également utiliser une source de signal présentant la plus faible impédance (résistance) possible.

Sachant que le condensateur interne à une valeur de 120pF pour les versions actuelles de microcontrôleur (18F4520), les formules données pour le calcul du temps de chargement d'un condensateur restent valables, pour toute la gamme de **Microchip** la formule du temps de charge du condensateur est :

$$T_c = -C \times (R_{\text{interne}} + R_{\text{source}}) \times \ln(2047) \quad \text{Eq.II.3.4.1.a}$$

Le 2047 provient de ce que pour numériser avec une précision de 1/2 bit, la numérisation utilisant une valeur maximale de 1023, la charge du condensateur doit être au minimum de 2046/2047ème de la tension à mesurer.

Comme « C » est fixe et « ln(1/2047) »

La formule devient donc :



$$T_c = 0.914895 \times 10^9 \times (R_{\text{interne}} + R_{\text{source}}) \quad \text{Eq.II.3.4.1.b}$$

Si on se place dans le cas le plus défavorable (tension de 3V, et résistance source = 10Kohms), notre temps de chargement est de :

$$T_c = 0,914895 * 10^{-9} * (10 * 10^3 + 12 * 10^3)$$

$$T_c \text{ maximal} = 20,12 \mu\text{s}$$

Maintenant le cas le plus favorable (tension de 6V, et résistance source négligeable) :

$$T_c = 0,914895 * 10^{-9} * (0 * 10^3 + 6 * 10^3)$$

$$T_c \text{ minimal} : 5,48 \mu\text{s}.$$

Si, maintenant, nous prenons un cas typique, à savoir une tension d'alimentation de 5V et une résistance de source de 10 Kohms, nous aurons :

$$T_c = 0,914895 * 10^{-9} * (10 * 10^3 + 8 * 10^3)$$

$$T_c \text{ typique} = 16,46 \mu\text{s}.$$

Nous allons maintenant calculer les temps minimum, maximum, et typique du temps total d'acquisition  $T_{\text{acq}}$ .

Le cas le plus défavorable est : une température de 50°C et un  $T_c$  maximal, ce qui nous donne:

$$T_{\text{acq}} = T_{\text{amp}} + T_{\text{ac}} + T_{\text{coff}}$$

$$T_{\text{acq}} \text{ maximum} = 2\mu\text{s} + 20,12\mu\text{s} + 1,25\mu\text{s} = 23,37 \mu\text{s}$$

Le cas le plus favorable, une température inférieure ou égale à 25°C et un  $T_c$  minimal, nous donne :

$$T_{\text{acq}} \text{ minimum} = 2\mu\text{s} + 5,48\mu\text{s} = 7,48 \mu\text{s}.$$

Maintenant, pour notre utilisation, sous 5V, nous aurons dans le pire des cas :

$$T_{\text{acq}} \text{ sous 5V} = 2\mu\text{s} + 16,46\mu\text{s} + 1,25\mu\text{s} = 19,71\mu\text{s}.$$

Donc, nous prendrons un  $T_{\text{acq}}$  de 20 $\mu\text{s}$  pour notre microcontrôleur alimenté sous 5V. ce qui nous arrange et est suffisant car les variations des grandeurs physiques sont très lentes.

Il est également possible d'utiliser une horloge constituée d'un oscillateur interne de type RC. Cet oscillateur donne un temps de conversion compris entre 2 et 6 $\mu\text{s}$ , avec une valeur typique de 4 $\mu\text{s}$ . Pour les versions LC du (16F876), ce temps passe entre 3 et 9 $\mu\text{s}$ .

Le temps de conversion  $T_{\text{ad}}$  ne peut descendre, pour des raisons électroniques, en dessous de 1,6 $\mu\text{s}$  pour les versions classiques de 16F87x, et en dessous de 6 $\mu\text{s}$  pour les versions LC. On remarque que si cela se produit un message d'erreur apparait sur Proteus lors de la simulation.

Donc, en fonction des fréquences utilisées pour le quartz du microcontrôleur, il faudra choisir le diviseur le plus approprié. Voici un tableau qui reprend les valeurs de diviseur à utiliser pour quelques fréquences courantes du quartz et pour les microcontrôleur de type classique. La formule d'obtention des temps  $T_{\text{ad}}$  est simple, puisqu'il s'agit tout simplement, comme expliqué ci-dessus, du temps d'instruction ( $T_{\text{osc}}$ ) divisé par le diviseur donné. Exemple, à 20Mz, le temps d'instruction est de 1/20.000.000, soit 50ns. Donc, avec un diviseur de 2, on aura 100ns.

AD Clock Source (TAD)		Maximum Device Frequency	
Operation	ADCS2:ADCS0	PIC18F2X20/4X20	PIC18LF2X20/4X20 <sup>(4)</sup>
2 TOSC	000	2.86 MHz	1.43 kHz
4 TOSC	100	5.71 MHz	2.86 MHz
8 TOSC	001	11.43 MHz	5.72 MHz
16 TOSC	101	22.86 MHz	11.43 MHz
32 TOSC	010	40.0 MHz	22.86 MHz
64 TOSC	110	40.0 MHz	22.86 MHz
RC <sup>(3)</sup>	x11	1.00 MHz <sup>(1)</sup>	1.00 MHz <sup>(2)</sup>

Les valeurs en vert sont celles qui correspondent au meilleur diviseur en fonction de la fréquence choisie. Les valeurs en bleu sont inutilisables, car le temps  $T_{\text{ad}}$  serait inférieur à 1,6 $\mu\text{s}$ . Quand aux

valeurs en jaune, pour l'utilisation de l'oscillateur interne RC à ces fréquences, la mise en sommeil du microcontrôleur est impératif durant le temps de conversion.

Il faut à présent préciser que le microcontrôleur nécessite un temps  $T_{ad}$  avant le démarrage effectif de la conversion, et un temps supplémentaire  $T_{ad}$  à la fin de la conversion. Donc, le temps total de conversion est de :

$T_{ad}$  : avant le début de conversion (le temps de connexion du condensateur est inclus)

$10 * T_{ad}$  pour la conversion des 10 bits du résultat

$T_{ad}$  supplémentaire pour la fin de la conversion de  $b_0$

Soit, au total, un temps de  $12 T_{ad}$ , soit dans le meilleur des cas, un temps de  $12 * 1,6\mu s = 19,2 \mu s$ . Notez qu'un temps équivalent à  $2 * T_{ad}$  est nécessaire avant de pouvoir effectuer une nouvelle conversion.

Résumons donc le temps nécessaire pour effectuer l'ensemble des opérations :

On charge le condensateur interne (nécessite le temps  $T_{acq}$ )

On effectue la conversion (nécessite le temps  $12 * T_{ad}$ )

On doit attendre  $2 * T_{ad}$  avant de pouvoir recommencer une autre conversion

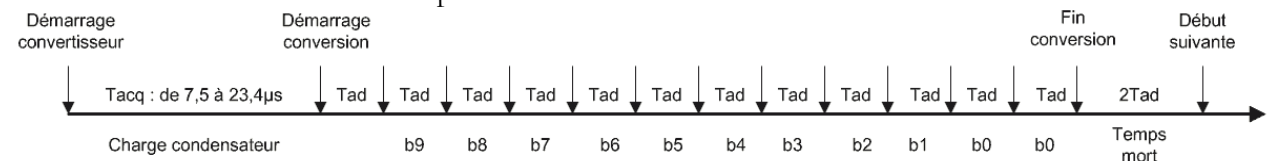


Fig. II.3.6.2.temps de conversion

Pour résumer, le temps nécessaire à la conversion est égal au temps nécessaire à la conversion d'un bit multiplié par le nombre de bits désirés pour le résultat. Concernant notre microcontrôleur, il faut savoir qu'il nécessite, pour la conversion d'un bit, un temps qu'on va nommer  $T_{ad}$ . Ce temps est dérivé par division de l'horloge principale. Le diviseur peut prendre une valeur de 2, 8 ou 32.

**Attention :** on divise ici l'horloge principale, et non le compteur d'instructions. Donc, une division par 2 signifie un temps 2 fois plus court que celui nécessaire pour exécuter une instruction, puisque ce temps d'exécution est de  $T_{osc}/4$ .

Nous avons détaillé cette section, car elle importante pour la gestion du temps d'execution de l'algorithme de travail du système de comptage

Compromis vitesse/resolution :

La première chose à savoir, c'est que l'augmentation de vitesse au delà de ces limites ne peut se faire qu'au détriment de la précision en terme de nombre de bits significatifs du résultat. Cette augmentation se paye également par une plus grande difficulté au niveau de la programmation.

#### 4.6.1.3. Configuration de l'ADC :

La configuration de l'ADC, du convertisseur se fait par voie software, car il est intégré dans le  $\mu C$ , on verra dans le chapitre suivant (chapitre 3)

#### 4.7. L'échantillonnage :

Il faut déterminer la fréquence d'échantillonnage maximale pour optimiser la vitesse d'acquisition.

On peut ne pas passer par les calculs mentionnés dans les datasheets car, Dans l'instrumentation industrielle les grandeurs physiques varient lentement de l'ordre de centième de secondes, les opérations faites par le  $\mu C$ , sont de l'ordre de  $\mu$ Secondes

Donc il suffit de faire un cycle d'acquisition tous les (200mS), ce qui suffit largement pour le comptage du flux sans que les grandeurs Température, Pression statique et pression différentielle varient.

$$f = 50\text{hz}$$

## 5. Affichage et communication :

Dans ce paragraphe on va décrire le chemin des résultats du traitement fait par le  $\mu C$ , qui seront affichés in situ, enregistrés et transmis par un protocole de communication,

### 5.1. L'affichage :

C'est l'afficheur qui détermine en gros, le rôle du système, car c'est lui l'interface entre l'opérateur (exploitant) et l'appareil. Pour notre application, on va utiliser un afficheur LDC à caractères alphanumériques, la figure suivante illustre le schéma de câblage de l'afficheur avec le  $\mu C$ .

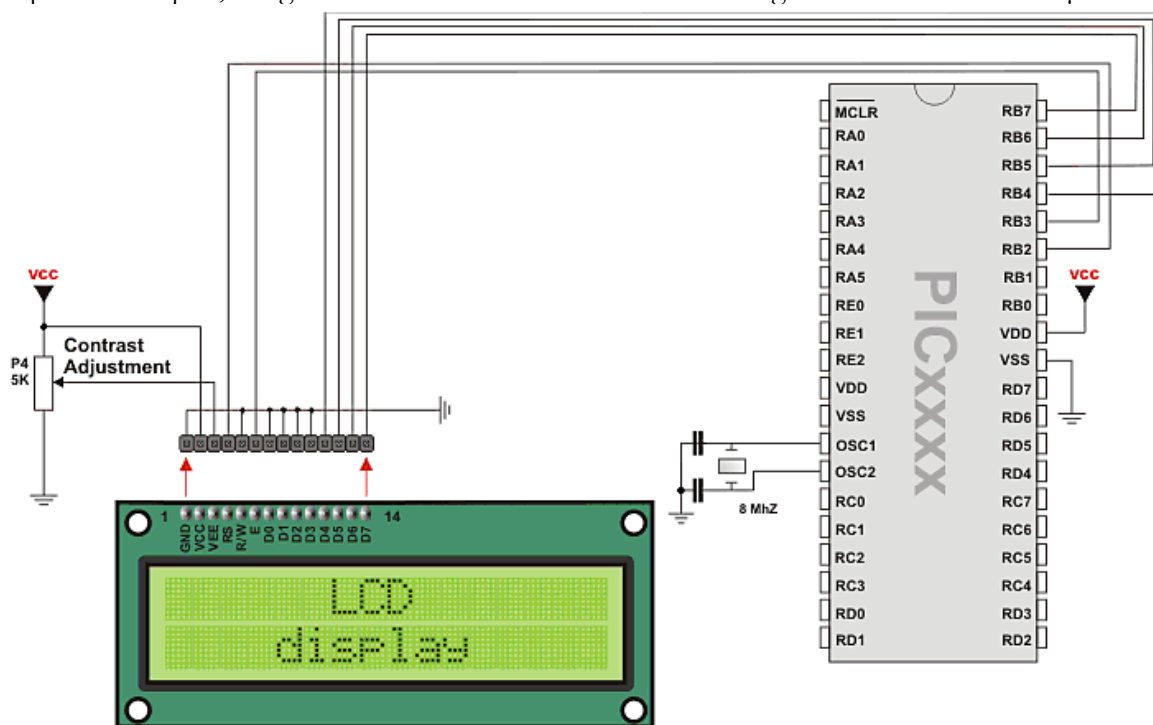


Fig. II.4.1.a connexion du PIC avec l'afficheur

### 5.2. Communication et réseaux:

#### 5.2.1. Communication série :

Il est souvent nécessaire de transférer les données numériques d'un appareil à un autre, car on a besoin de l'information sous plusieurs formes et dans différents endroits, ce qui nous aide énormément pour le contrôle et la supervision des processus industriels.

Pour cela, il faut bien choisir le mode de communication selon les applications telle que ethernet, WiFi, USB ..., pour transférer les données, ces applications sont régies par des protocoles de communications,

dans ce paragraphe on va décrire le mode de communication utilisé pour notre projet, ce qui nous paraît convenable selon le matériel de développement qu'on a :

on va utiliser le **RS232** ;

le standard EIA/TIA-232 connu ci-devant par le RS232, qui se trouve à la couche 1 du modèle OSI(couche physique), (voltage, courant...) et il a aussi des caractéristiques de la couche 2 du

modèle OSI (transfert asynchrone, handchecking...) ce standard est dédié pour connecter 2 appareils

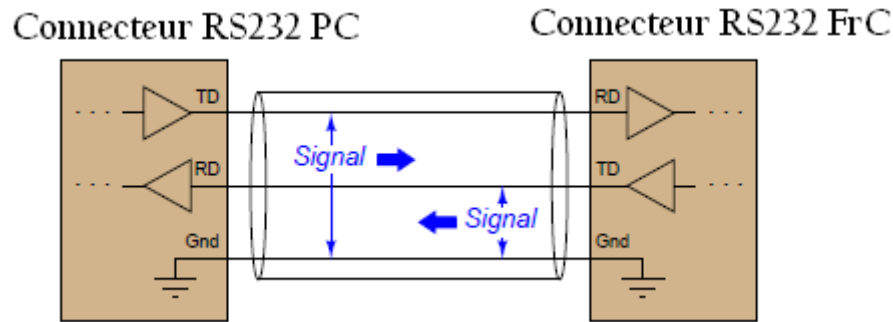


Fig. II.4.2.a communication RS232 émetteur/recepteur

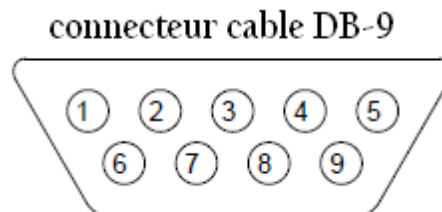


Fig. II.4.2.b Connecteur câble DB-9

Pin number	Assignment	Abbreviation
1	Carrier Detect	CD
2	Received Data	RD
3	Transmitted Data	TD
4	Data Terminal Ready	DTR
5	Signal Ground	Gnd
6	Data Set Ready	DSR
7	Request To Send	RTS
8	Clear To Send	CTS
9	Ring Indicator	RI

Tab. II.4.2. illustration des pins du connecteur DB-9

Les sorties séries asynchrones sont souvent utilisées pour fournir des diagnostics des données et pour la capture de l'information provenant du système, son implémentation software est simple, en utilisant le logiciel de programmation, voir chapitre 3, Le port de communication RS232, est illustré dans la figure Fig. II.1.1.2.b, FCDC sur la carte EasyPic5 utilise un circuit intégré MAX232A,

### 5.2.2. Communication réseaux :

Pour que notre système puisse fonctionner en réseaux ethernet, internet, on doit lui ajouter un port de communication (RJ45), la gestion de cette communication est facile du point de vue de la programmation sur PIC, en utilisant le langage MicroC, qu'on va voir au (chapitre 3), mais cette partie, ne va pas être réalisée, à cause de la contrainte temps seulement si on arrive à la réalisation finale du circuit du système car dans la carte EasyPic5, ce port n'existe pas.

## 6. Conclusion:

La conception des systèmes à  $\mu$ contrôleurs ou (processeurs en général) doit suivre une certaine méthodologie telle que la notre, pour pouvoir réaliser un système qui donne les meilleurs résultats attendus par le demandeur de produit, optimal et durable

Pour cela il faut définir le rôle global, dans ce chapitre on a détaillé l'architecture hardware, qui est composée de trois axes principales : acquisition, traitement par  $\mu$ C et communication des données.

Ces trois axes sont constitués de plusieurs étages, chaque étage a un rôle précis dans le montage, ce qui donne à la fin le fonctionnement désiré. Pour arriver à dimensionner chaque étage, il faut décomposer la conception de l'architecture hardware en plusieurs blocs, et chercher les composants électroniques pour chaque bloc. En résumé, pour atteindre l'objectif il faut bien comprendre ce qu'on doit faire et être méthodique pour le faire naître,

Concernant le chapitre suivant, l'architecture software, c'est le même principe sauf que maintenant il faut respecter l'architecture hardware, suivre la méthode du comptage citée dans les deux normes AGA3 et ISO5167-2 :2003, optimiser la taille du programme implémentée dans le  $\mu$ Contrôleur

**Chapitre III :**  
**Conception de l'architecture software,**  
**implémentée sur le microcontrôleur**  
**PIC18F4520**

---

## 1. Introduction :

L'architecture hardware consiste à concevoir un logiciel de calcul embarqué dans le système, ce calcul est basé sur les deux normes ISO 5167-2:2003 et AGA3, donc deux techniques différentes, sachant qu'il n'existe pas de grandes différences entre les normes car, la norme ISO 5167-2:2003 est une copie du AGA3, sauf dans la formule choisie pour le calcul du coefficient de décharge, un nombre important d'expérimentateurs ont, depuis un siècle, mesuré les coefficients de décharge  $C_d$  de divers orifices. Les données ont été rassemblées d'abord en tables, puis on les a lissées sous forme de relations empiriques susceptibles d'être traitées par des calculatrices numériques de bureau, et plus récemment par des microordinateurs; ces relations sont donc évolutives et c'est ainsi que la formulation due à Stolz, utilisée depuis 1980 pour les diaphragmes, tend à devenir obsolète au profit de l'équation de Reader/Harris-Gallagher qui permet d'abaisser sensiblement, dans certains cas, la limite inférieure du rapport d'ouverture, avec l'évolution des microprocesseurs et des microcontrôleurs

Le travail de conception software, traité dans ce chapitre, a pour objectif de réaliser la configuration, l'implémentation de la méthode de calcul du débit et du volume total du gaz traversant le pipe. Le chapitre est organisé comme suit,

la description de la configuration des différents éléments nécessaires pour le fonctionnement du système; deuxièmement, le principe et la méthode de calcul du débit et l'estimation de l'incertitude basée sur les deux normes, ensuite la description de la programmation qui contient le logiciel de programmation, la technique de l'implémentation du programme complet en langage C sous Windows à l'aide du logiciel MicroC<sup>®</sup>, en fin une conclusion résumant ce qu'il faut retenir de ce chapitre.

## 2. Configuration du Calculateur du débit :

La configuration du calculateur consiste à définir tous les paramètres de l'équation principale de calcul du débit, et les valeurs déterminant les limites d'utilisation du système en terme de capacités de mesure, performance et application, aussi le choix de la norme qui définit la formule du coefficient de décharge, l'unité qu'on va utiliser dans le programme de calcul du débit.

### 2.1. Paramètres de calcul :

Dans l'équation du calcul du débit, des paramètres nécessitent d'être définis pour le fonctionnement du système, qui seront classifiés en trois groupes :

Propriétés du fluide :

Ceux sont les propriétés intrinsèques au fluide à des conditions de pression et de température données : densité, gravité spécifique, viscosité...

Paramètres des dispositifs de mesure :

Ceux sont les grandeurs physiques caractérisant les dispositifs de mesure : diamètre du pipe, diamètre de l'orifice, coefficient de dilatation ...

Conditions d'écoulement :

Ceux sont les conditions spécifiques d'écoulement du fluide,

**Les autres paramètres** qui dépendent, de la pression, la température seront calculés au cours du calcul global du débit car ils dépendent du:

Choix des prises de pression :

Comme nous avons vu dans la *Fig. I.3.4.1.* plusieurs techniques piquage de pression sont prévues, on choisit entre à la bride, dans les angles ou D-D/2, car ces prises influent légèrement sur l'ordre de grandeur de la pression différentielle.

## 2.2. Capacités et étendue de la mesure :

N'importe quel instrument dans le monde doit être limité par des extremums qui définissent sa capacité. En tant que concepteur du système, on utilise le terme (capacité), l'opérateur, utilise le terme étendue, ces limites dans notre système dépendent de plusieurs paramètres, mais les paramètres que peut définir l'exploitant, sont ceux de la pression différentielle, statique et la température, cette configuration peut être implémentée sur site. Les deux figures suivantes illustrent les deux voies de configuration :

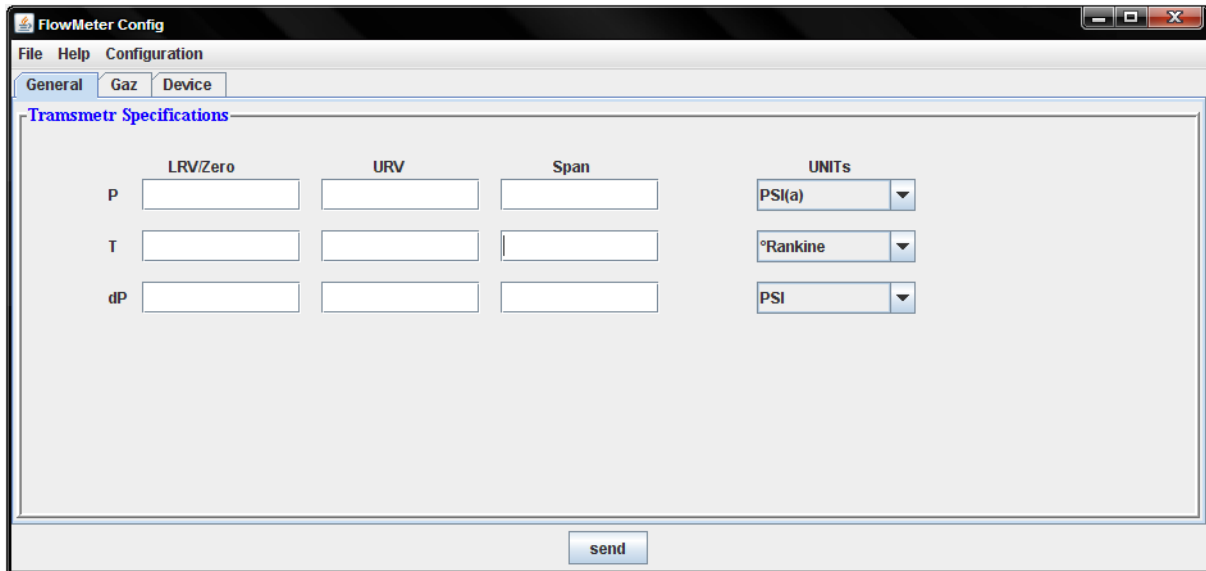


Fig. III.2.2.a. Interface de communication software

## 2.3. Choix de la norme :

L'opérateur doit choisir la norme qu'il va utiliser dans son travail, soit par l'interface hardware, ou bien par l'interface software, cette configuration peut être faite sur site à l'aide de l'interface hardware sur le cadran de l'appareil, il doit choisir entre :

ISO 5167-2 :2003 , débit volumique en m<sup>3</sup>/hr, massique en Kg/hr  
ou bien

AGA3, débit volumique en ft<sup>3</sup>/hr, massique en lbm/hr

Les formules de conversions entre les unités utilisées par les deux normes sont :

Températures :

$$^{\circ}F = (^{\circ}C)\left(\frac{9}{5}\right) + 32 \quad ^{\circ}C = (^{\circ}F - 32)\left(\frac{5}{9}\right)$$

Distances:

1 inch (**in**) = 2.54 centimeters (**cm**)

1 foot (**ft**) = 12 inches (**in**)

1 yard (**yd**) = 3 feet (**ft**)

1 mile (**mi**) = 5280 feet (**ft**)

Volumes

1 gallon (**gal**) = 231.0 cubic inches (**in<sup>3</sup>**) = 4 quarts (**qt**) = 8 pints (**pt**) = 16 cups = 128 fluid

ounces (**fl. oz.**) = 3.7854 liters (**l**)

1 milliliter (**ml**) = 1 cubic centimeter (**cm<sup>3</sup>**)



Les masses:

$$1 \text{ pound-mass (lbm)} = 0.4535924 \text{ kilogram (kg)} = 0.031081 \text{ slugs}$$

La pression:

$$1 \text{ pound per square inch (PSI)} = 2.03602 \text{ inches of mercury (in. Hg)} = 27.6799 \text{ inches of water (in.W.C.)} = 6.894757 \text{ kilo-pascals (kPa)} = 0.06894757 \text{ bar}$$

Tableau de conversion volume	ft <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
ft <sup>3</sup>	1	0.02832
m <sup>3</sup>	35.31	1

Tab. III.2.3.a tableau de conversion des volumes

Tableau de conversion masse	Kg	lbm
Kg	1	2.20
Lbm	0.45359	1

Tab. III.2.3.b tableau de conversion des masses

Pour la conversion des autres grandeurs, veuillez voir les tableaux conversion universels.

### 3. Principe et Méthode de Calcul :

Un nombre important d'expérimentateurs ont, depuis un siècle, mesuré les coefficients de décharge  $C_d$  de divers orifices. Les données ont été rassemblées d'abord en tables, puis ont été lissées sous forme de relations empiriques susceptibles d'être traitées par des calculatrices numériques de bureau, et plus récemment par des microordinateurs ; ces relations sont donc évolutives et c'est ainsi que la formulation due à Stolz, utilisée depuis 1980 pour les diaphragmes, tend à devenir obsolète au profit de l'équation de Reader/Harris-Gallagher mentionnée dans le chapitre 1, qui permet d'abaisser sensiblement, dans certains cas, la limite inférieure du rapport d'ouverture. La phase préliminaire nous a permis de faire un choix parmi les types d'éléments primaires connus. Il nous faut maintenant confirmer et arrêter ce choix en calculant de façon précise l'appareil envisagé. Il s'agit, on va le voir, d'un calcul itératif dont l'exécution manuelle est particulièrement malaisée, aussi proposons-nous, dans le présent travail, un programme permettant le calcul par un microcontrôleur, embarqué sur un carte électronique, réalisant l'appareil de comptage, respectant les normes internationales. D'autres éléments primaires pourraient être pris en compte dans une version ultérieure de ce programme, s'ils apparaissent comme susceptibles d'intéresser d'autres étudiants voulant contribuer dans ce projet pour le rendre complet, c'est-à-dire contenant le calcul de tous les éléments déprimogènes existant dans les normes.

#### 3.1. Calcul du débit :

L'équation pratique utilisée par notre système est celle du calcul du débit volumique:

$$Q_v = 7709.61 \cdot C_d (FT) \cdot Y_1 \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{Z_s \cdot G_r \cdot P_{f_1} \cdot h_w}{Z_{f_1} \cdot T_f}} \quad \text{Eq.III.3}$$

avec la symbolique déjà citée dans le chapitre 1 et dans les abréviations:

La mise en oeuvre de l'équation Eq.III.3, pose problème. Les formules de calcul du coefficient  $C_d$  comprendront par exemple, en variable et bien qu'il soit le résultat du calcul à effectuer, le rapport d'ouverture  $\beta$  ou encore, dans le cas des gaz et de la vapeur, le coefficient de détente  $\varepsilon$ , qui dépendra de la valeur de la pression différentielle que l'on doit justement calculer. La solution est du type itératif ; grandement facilitée par la micro-informatique, elle peut consister à calculer une première fois  $\beta$  avec un jeu de valeurs approchées des coefficients tel que  $C = 0,6$  et  $\varepsilon = 1$  ; on obtient alors un  $\beta$  inexact, assorti d'un nouveau jeu ( $C, \varepsilon$ ) un peu plus proche de la réalité, et ainsi de suite jusqu'à ce que la différence des résultats de deux itérations successives soit inférieure à une limite que l'on aura fixé à l'avance, par exemple  $5 \times 10^{-6}$  pour les deux normes, et en valeur relative. On pourrait envisager d'optimiser cette procédure avec des algorithmes plus élaborés, mais ceci ne semble pas nécessaire car avec un jeu de données cohérent la convergence est rapide, et le temps de calcul sur un PC récent bien inférieur à la seconde. Bien que le présent exposé ait été jusqu'à présent implicitement centré sur la conception d'un débitmètre adapté aux données du processus, le logiciel considère également les problèmes de son exploitation. Il est donc prévu de procéder, au choix,

Bien que les calculs internes au logiciel soient programmés uniquement en unités SI, celui-ci accepte, en entrée, d'anciennes unités métriques encore employées pour leur commodité, et dont il assure lui-même la conversion. La notice d'utilisation du logiciel donne toutes les explications à ce sujet.

### 3.2. Calcule du volume total :

Pour calculer, le volume total qui passe par le pipe, il suffit d'intégrer le débit sur un intervalle de temps, par programmation, on multiplie la durée de la boucle de comptage, par le résultat ( $Q_v$ ), et on cummule dans une variable T(Total), pour plus de détails voir l'organigramme de fonctionnement de programme dans le (§à signaler), ce volume total, donne le volume du gaz passant à travers le pipe, durant le fonctionnement du calculateur, son unité dépend de la norme choisie, il peut être initialisé par, l'interface de commande sur le cadran.

### 3.3. Estimation de l'incertitude :

La norme ISO5167-2:2003, prévoit un calcul d'incertitude, pour lequel il conviendra de consulter également la norme AFNOR. Les formules de calcul de l'incertitude associée aux valeurs de  $C_d$  et  $\varepsilon$  obtenues par les formules normalisées sont spécifiées dans la norme ; l'incertitude dépend de la valeur des variables : rapport des diamètres, pression différentielle, pression amont. Les erreurs à prendre en compte pour les autres grandeurs, suivant le calcul à effectuer :

- diamètre  $d$  de l'orifice ;
- diamètre  $D$  de la canalisation ;
- débit ;
- pression différentielle  $\Delta P$
- masse volumique  $\rho_1$  ;

Elles sont laissées à l'appréciation de l'utilisateur, selon son jugement propre, bien que la norme admette que l'on se fixe une erreur maximale « par défaut » de 0,4 % sur  $D$  et 0,07 % sur  $d$ . Un point important est que la norme admet aussi l'*indépendance des erreurs*, ce qui n'est cependant pas théoriquement justifié puisque  $C$  et  $\varepsilon$ , entre autres, sont respectivement fonction de  $\beta$  et de  $\Delta P$ . Il devient alors possible de déterminer l'incertitude sur la mesure par un classique calcul de dérivées. La formule spécifiée par ISO est, pour l'incertitude totale sur le débit :

$$\frac{\partial Q_m}{Q_m} = \left\{ \left( \frac{\partial C}{C} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varepsilon}{\varepsilon} \right)^2 + \left[ \frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right]^2 \left[ \frac{\partial D}{D} \right]^2 + \left[ \frac{2}{1-\beta^4} \right]^2 \left( \frac{\partial d}{d} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{\partial \Delta P}{\Delta P} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{\partial \rho}{\rho} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Eq. III.3.3

À ces incertitudes sont associées un niveau de confiance de 95 %, dans l'hypothèse d'une distribution gaussienne des mesures. La prise en compte, dans le calcul d'incertitude et pour une partie des variables, de niveaux de confiance différents, égaux ou supérieurs à 95 % selon le cas, est traitée dans les documents AFNOR mais reste trop complexe pour être commentée ici.

Les valeurs des incertitudes  $\partial d$ ,  $\partial D$  sont données par le fournisseur des équipements tel que pipe, élément déprimogène,

Les valeurs des incertitudes  $\partial C$ ,  $\partial \rho$ ,  $\partial \varepsilon$ , seront calculées à partir des équations déterminant ces paramètres

Les valeurs des incertitudes  $\partial \Delta P$ ,  $\partial T$ ,  $\partial P$  seront estimées à partir de la tolérance donnée par les transmetteurs, et la résolution du convertisseur analogique-numérique sur microcontrôleur.

Le calcul de  $\partial \Delta P$ ,  $\partial T$ ,  $\partial P$  est donné dans le paragraphe II.3.6.1.1,

Donc on constate que ces termes dépend essentiellement de,

Capacité en pression et en température,

Caractéristiques de l' ADC

Caractéristiques des transmetteurs utilisés.

### 3.4. Exemple de calcul :

L'exemple ci-dessous montre un exemple de calcul dans des conditions nominales et indique les ordres de grandeur utilisés, dans les normes internationales ; les calculs effectués par la machine ne sont pas développés. Soit le cas d'école d'une conduite de diamètre 0.2 m, dans laquelle circule de l'eau à la température de 50 °C, à une pression de 3 bars absolus, et une pression différentielle de 50mbars,

Le calcul de notre système nous a donné, 0.1944 m<sup>3</sup>/s,

On peut, en faisant ces exemples de calcul, déterminer la capacité de comptage de notre système selon l'étendue des transmetteurs utilisés, comme dans cet exemple.

La pression est [0-3]bars

La pression différentielle est [0-50]mbars

La température est [10-50]°C

Le débit maximum est 24490.49 ft<sup>3</sup>/h => 0.1944m<sup>3</sup>/s

### 3.5. Capacité de débit et rangeabilité

La notion de capacité de débit (Flow Capacity) apparaît dans beaucoup d'anciens documents, et certains bureaux d'étude l'utilisaient encore il y a une décennie ou deux. En s'écartant de la symbolique peu conviviale d'AGA [10], reprise par Spink [1], on peut exprimer cette quantité par :

$$C \cdot \varepsilon \cdot E \cdot \beta^2 = \frac{4Q_m}{\pi \cdot D^2 \sqrt{2 \cdot \Delta P \cdot \rho_1}} \quad \text{Eq. III.3.5}$$

Avec les notations précédemment utilisées et en remaniant l'équation Eq.III.3.3. On avait autrefois recours à ce type de formulation, sous une autre forme algébrique le cas échéant, pour

dégrossir le calcul du diamètre de l'orifice ; mais ceci n'a plus guère d'intérêt avec les logiciels et les programmes actuels. Le lecteur remarquera cependant que le débit massique  $Q_m$  varie comme le coefficient de décharge  $C_d$  ce qui signifie que, toutes choses égales par ailleurs, une tuyère ( $C \cong 0,9$ ) « passera » un débit plus important qu'un diaphragme (orifice) ( $C \cong 0,6$ ). La capacité de débit peut donc être considérée lors du choix d'un type d'élément primaire.

Il y a lieu, en outre, d'établir une distinction entre capacité de débit et rangeabilité. La rangeabilité (ou dynamique) est la plage de débit qui peut être couverte par un élément primaire en fonctionnement, entre les déviations minimale et maximale du transmetteur de pression différentielle. La capacité de débit, elle, est l'étendue de débit qui peut être couverte par un type d'élément primaire déterminé, dans l'hypothèse où l'on ferait – en théorie – varier  $\beta$  entre ses valeurs minimale et maximale possibles : à titre d'exemple, pour un diaphragme dont  $\beta$  peut varier de 0,1 à 0,75, l'étendue du terme  $E \cdot \beta^2$  est de l'ordre de 50. La notion de capacité de débit s'adresse au concepteur alors que la rangeabilité concerne l'utilisateur.

#### 4. Algorithme de fonctionnement du système :

La figure suivante illustre le fonctionnement par blocs, du calculateur (appareil de comptage), le fonctionnement par étapes sera donc :

**Etape1** : mesure des données nécessaires pour le calcul du débit (diamètres,  $\beta$ ,  $E_v \dots$ )

**Etape2** : acquisition des grandeurs physiques provenant des transmetteurs (pression statique, pression différentielle et température)

**Etape3** : Calcul des propriétés physiques et des termes intermédiaires qui varient en fonction des grandeurs physiques

**Etape4** : Calcul du débit et du volume total du gaz et correction du calcul à l'aide de la boucle de comptage

**Etape5** : affichage, enregistrement et transfert des données par RS232.

#### 5. La Programmation :

##### 5.1. Algorithme de comptage :

Pour pouvoir faire un algorithme puissant, il faut bien comprendre la méthode de calcul donnée par les deux normes, et les organiser sous formes d'organigramme, qui illustre les différentes équations, conditions et boucles...

L'organigramme suivant, illustre celui de AGA3, page suivante :

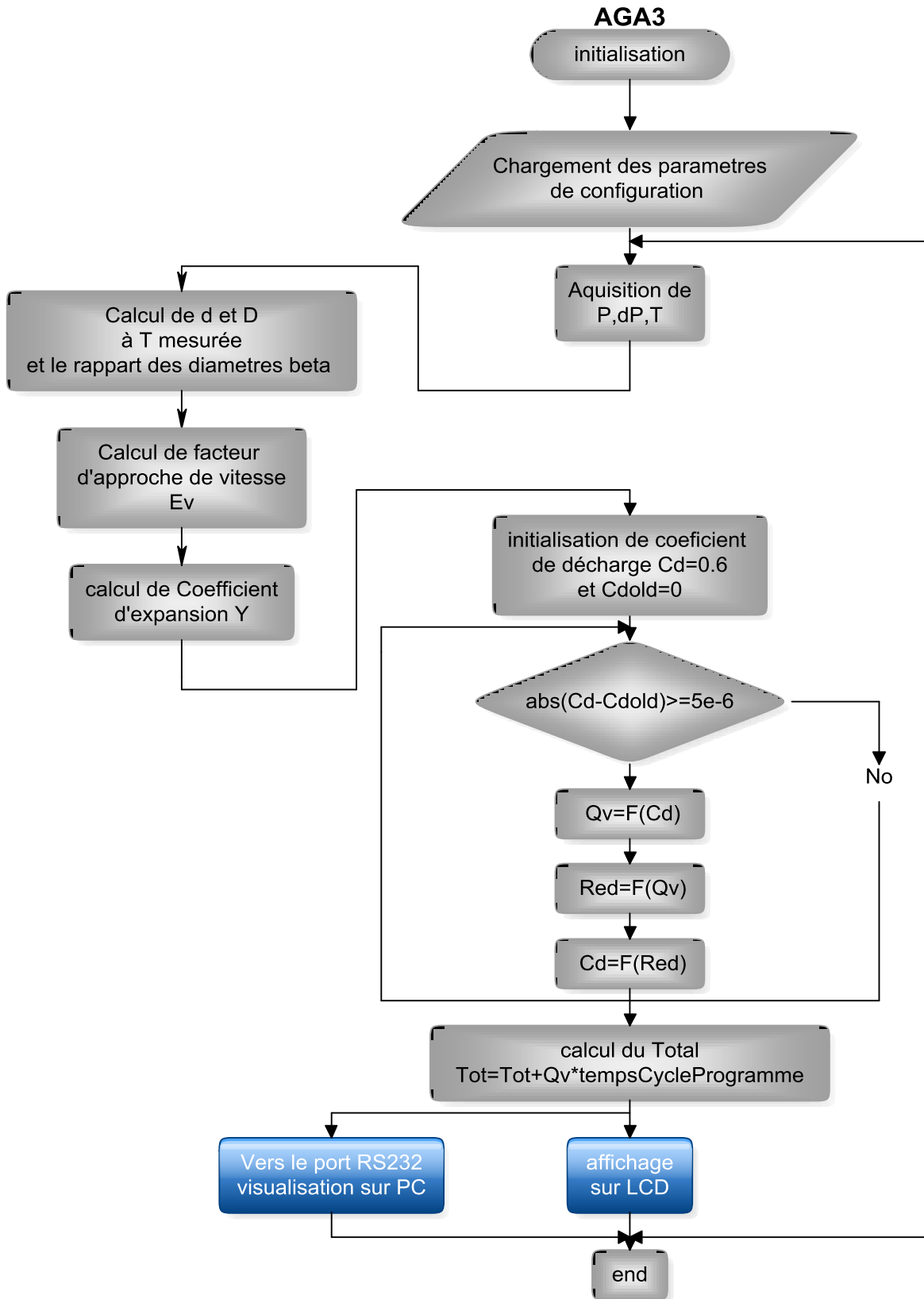


Fig. III.5.1.orgnigramme de calcule du débit de gaz selon AGA3

**5.2. Logiciel de programmation :**

Comme tout projet de développement des systèmes autour de  $\mu$ processeurs ( $\mu$ Contrôleur), on a utilisé un environnement dédié à la carte de développement qui est le MikroC, qu'on va présenter dans ce paragraphe.

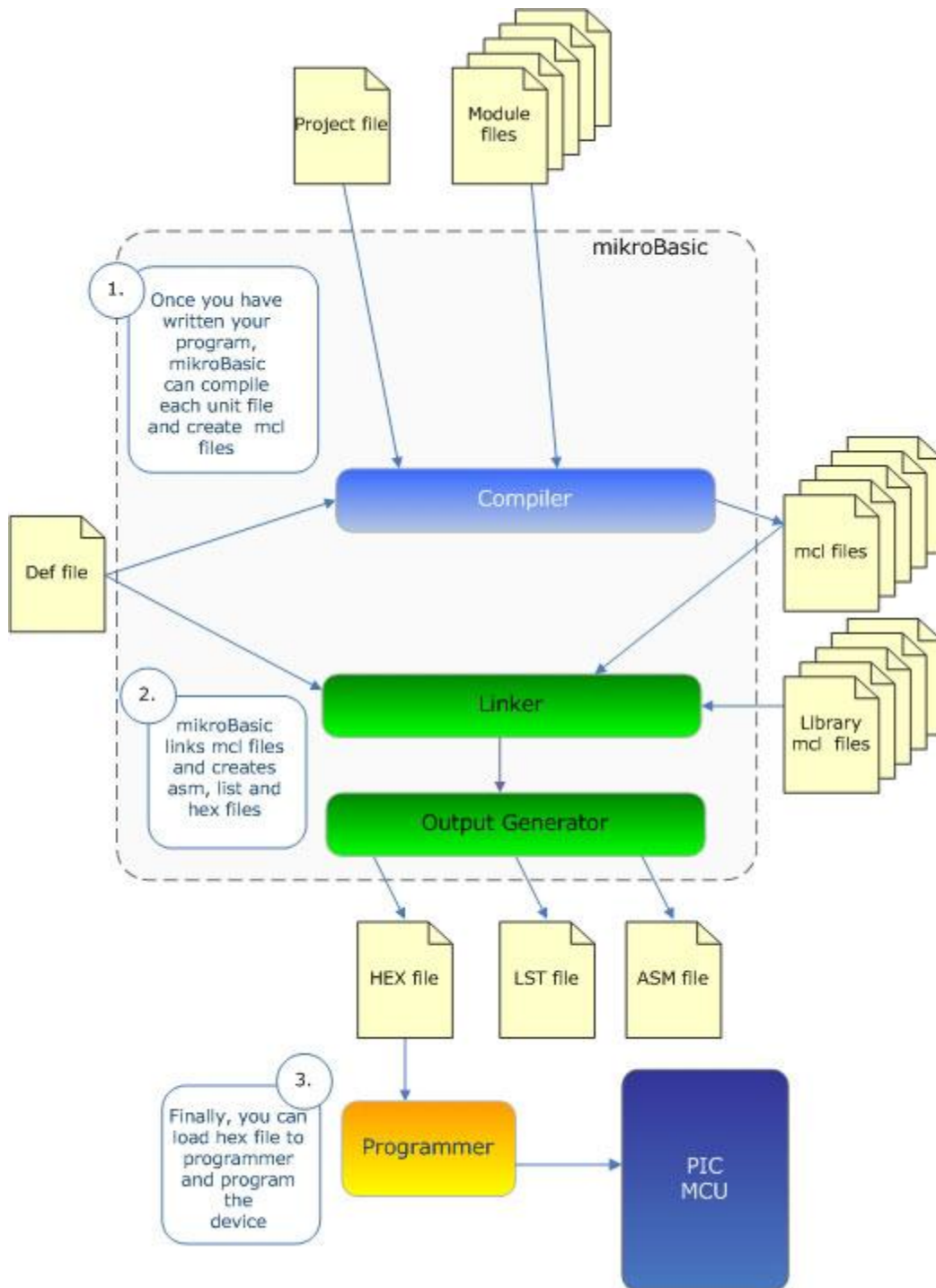


Fig. IV 5.2.architecture du MikroC

**5.2.1. Présentation :**

Le mikroC est un instrument puissant, de développement, riche de caractéristique pour PICmicros. Il est conçu pour fournir au programmeur la solution la plus facile possible pour des applications pouvant être développée pour des systèmes embarqués, sans compromettre le rendement ou le contrôle. La figure ci-dessous montre l'interface mikroC IDE.

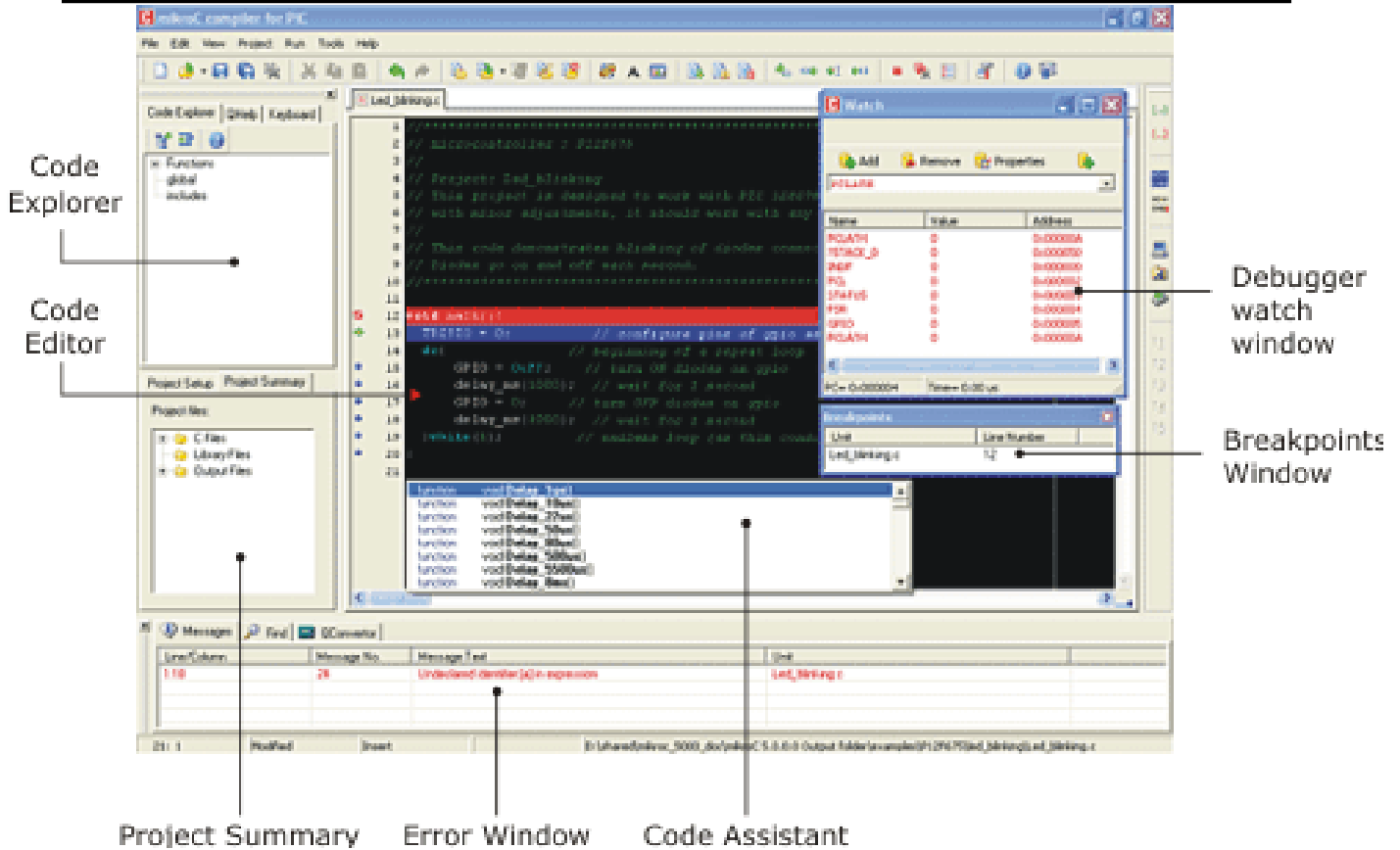


Fig.III.4.1.1vue globale de l'environnement de travail MikroC IDE

Les PIC et le langage C sont adaptés ensemble : Le PIC de 8 bits le plus populaire, utilisé dans une large variété d'applications, le langage C, estimé pour son rendement, est le choix naturel pour les systèmes embarqués se développants. Le mikroC fournit le compilateur conforme hautement avancé d'IDE, de norme ANSI, l'ensemble grand de bibliothèques de visserie, possède une puissante documentation qui contient beaucoup d'exemples prêts à fonctionner. Ils peuvent être utilisé pour des petites applications : {mesure de tension, affichage...}

le mikroC permet de développer et de déployer, rapidement, des applications complexes et permet de :

Sauvegarder vos codes sources de C, en utilisant, l'éditeur inhérent d'indicatif (les aides d'indicatif et de paramètre, mettre en valeur la syntaxe, automatique rectifiant, des descripteurs d'indicatif, et plus...)

Employer les bibliothèques incluses de mikroC pour accélérer d'une manière spectaculaire le développement : par acquisition de données, mémoire, étalages, conversions, transmissions... Pratiquement toutes les puces P12, P16, et P18 sont supportées.

Surveiller votre structure, variables, et fonctionnements de régime dans l'explorateur d'indicatif.

Produire de l'assembleur commenté et compréhensible pour l'utilisateur, et compatible HEX compatible avec tous les programmeurs.

Examiner le déroulement du programme et mettre au point la logique exécutable avec le débogueur intégré.

Obtenir les rapports détaillés et les graphiques (statistiques) : Carte de RAM et ROM, statistiques d'indicatif, impression d'assemblage, appelant l'arbre, et plus...

Vue globale sur le MikroC IDE :

Code Editor: L'éditeur d'indicatif comporte la syntaxe réglable mettant en valeur, assistant de l'éditeur, aide de paramètres, rectification automatique pour les typos courants et les descripteurs.

Code Explorer : avec un browser des raccourcis des commandes du clavier et une aide rapide, sont disposés, pour gérer le projet facilement.

Error Window : permet de visualiser toutes les erreurs lors de la compilation.

Debugger : permet de faire l'exécution du programme étape par étape.

New Project Wizard : est une fenêtre qui permet de créer un nouveau projet, d'une façon très rapide,

Les fichiers d'aide sont sensibles à la syntaxe et au contexte.

Comme avec n'importe quelle application Windows moderne, vous pouvez personnaliser la disposition du mikroC au meilleurs circuits selon vos nécessités

### **5.2.2. Création de projet :**


La création du projet permet de faire la configuration de plusieurs paramètres, spécifiant le fonctionnement du  $\mu$ Contrôleur, elle se fait suivant les étapes suivantes :

le mikroC dispense des applications en projets, se composant d'un seul fichier projet (extension .ppc) et d'un ou plusieurs fichiers source (extension .c). Vous pouvez compiler des fichiers source seulement s'ils font partie d'un projet.

Le fichier projet diffuse les informations suivantes :

nom du projet et description optionnelle, périphérique cible, indicateurs de dispositif (mot de config), horloge de dispositif, liste de fichiers source de projet avec des circuits.

Noter que le projet n'inclue pas les fichiers dans le même mode de préprocesseur, pour voir pour ajouter/retirer des dossiers du projet ci-dessous.

La voie la plus facile de créer un nouveau projet, est d'utiliser l'icône **New Project** , ou bien aller à **Project > New Project**, remplir la fenêtre illustrée ci-dessous dans la figure Fig.III.4.1.2, ou l'on met tous les paramètres de configuration du PIC (choix du PIC, horloge...)



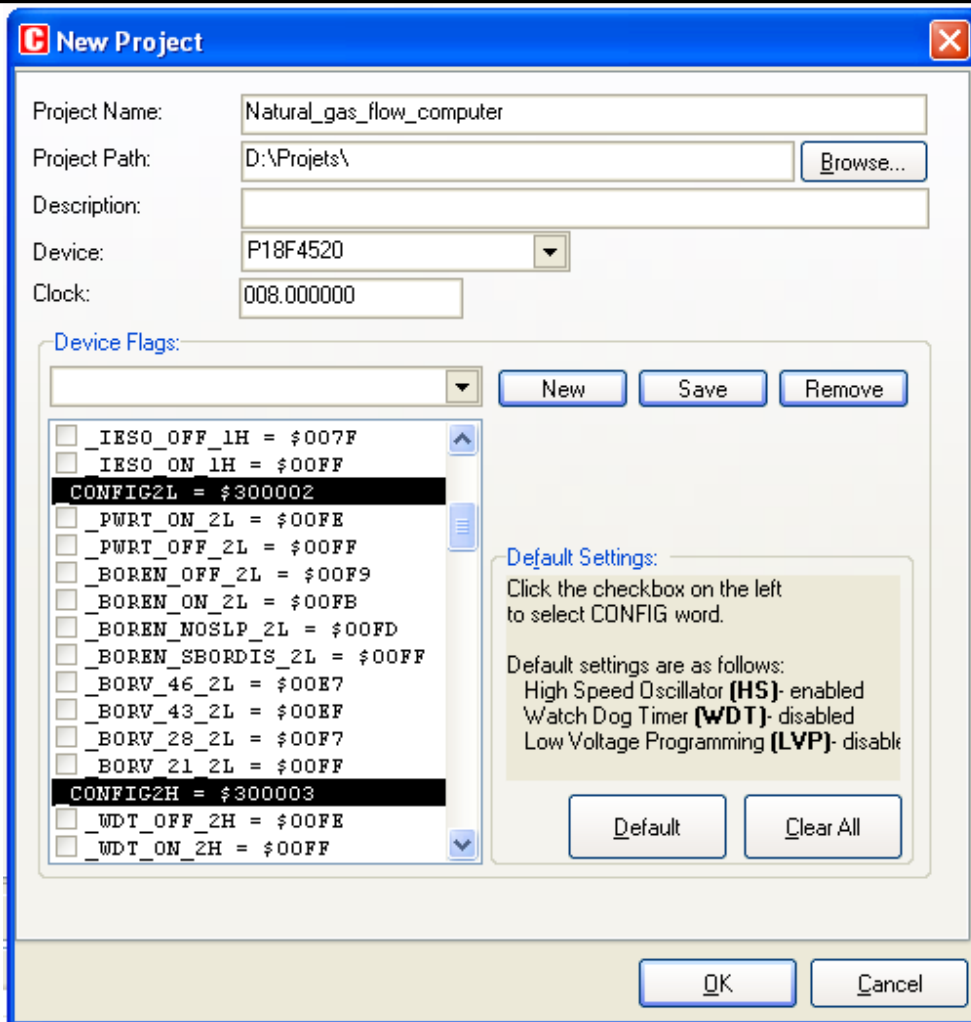


Fig.III.4.1.2 configuration des paramètres du PIC à l'aide du MicroC

Pour effectuer des changements dans le projet, allez à **Project > Edit Project**, on peut faire des modifications sur paramètres.

### 5.2.3. L'éditeur du code :

Pour la programmation, on utilise l'éditeur de code qui est un éditeur de texte, développé pour la programmation des  $\mu\text{C}$  en langage C, pour les professionnels, il contient aussi les propriétés des éditeurs standards ( copier, coller...)

Caractéristiques avancées de cet Editeur :

Syntaxe ajustable

Aide indicative.

Aide de paramètres.

Achèvement automatique des instructions et des mots clef.

Correction automatique des typos communs

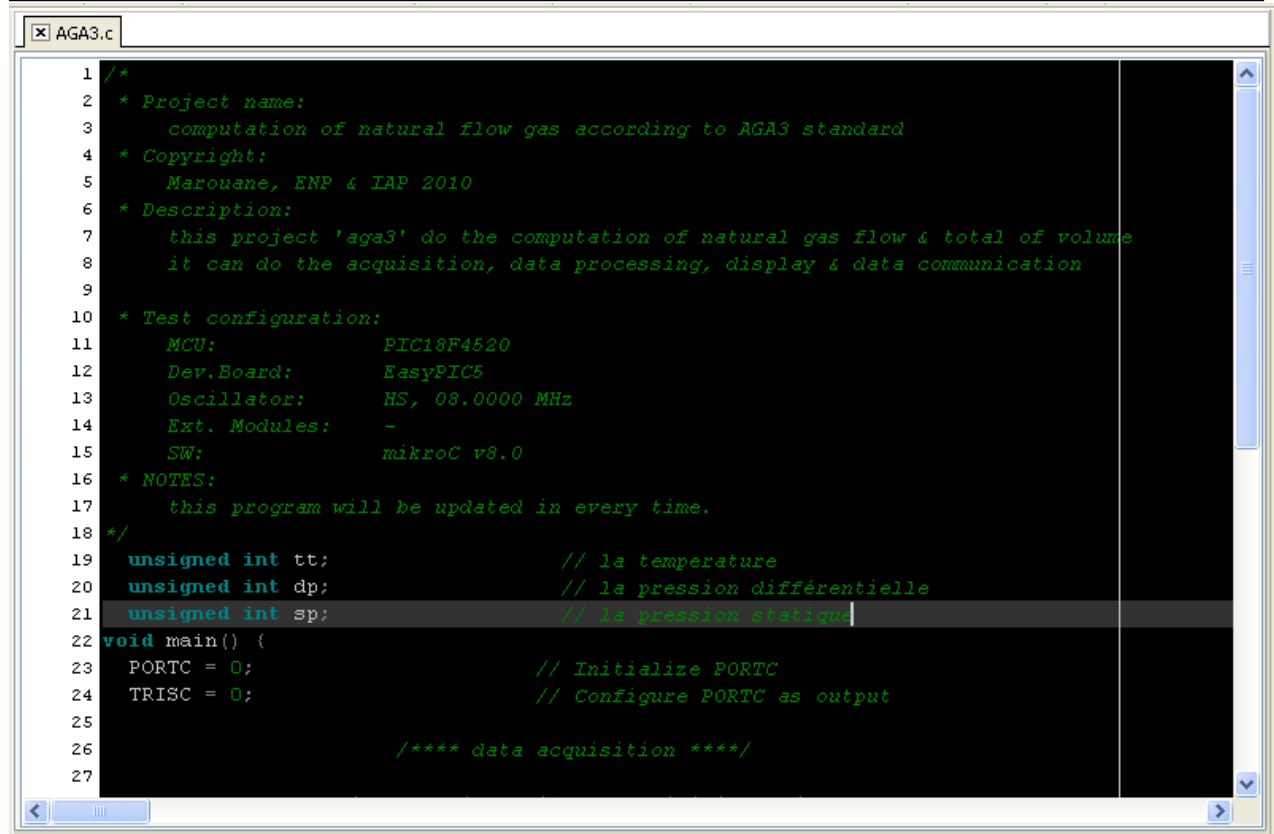

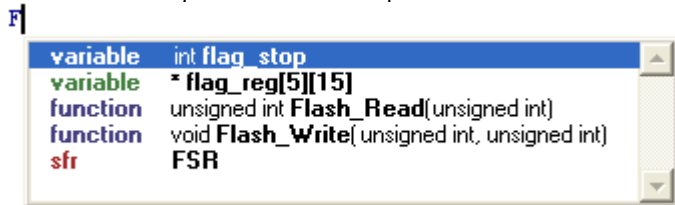


Fig. III.4.1.3.l'Editeur de programme

On peut configure l'éditeur de texte, l'aide de l'éditeur à l'aide de tools icon , ou bien en utilisant dans la barre d'outils **Tools > Options**. On peut changer beaucoup de paramètres tel que (couleur...)

L'assistant de l'éditeur :

Si vous tapez les premières lettres, d'un mot et vous appuyez sur Ctrl+Space, les identifications qui commencent par les mêmes lettres vont apparaitrent tel que.



Si cette fenêtre apparait, vous pouvez choisir la fonction parmi celles qui figurent dans la liste.

### 5.3. La programmation:

#### 5.3.1. Configuration du microcontrôleur:

La configuration du µContrôleur, se fait en deux modes, le premier se fait lors de la création du projet, ce mode est contient les paramètres qui ne changent pas pour tous les fichiers source qui appartiennent au projet, le second mode de configuration se fait par des instructions spécifiques aux (application, registres...)

#### 5.3.2. L'acquisition :

On met le port A, du µC, en entrée à travers le registre TRISA, en affectant à ce registre TRIS1=0×FF // tous les pins du PORTA sont en entrée

La configuration du Nombre de canal pour l'acquisition analogique, et les tensions de références qu'on va utiliser pour l'ADC, à l'aide du registre ADCON1,

U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
—	—	CHS3	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	ADON
bit 7						bit 0	

Bit 7-6 **inutilisable**: lus comme '0'

Bit 5 VCFG1: bit de Configuration des tensions de Référence (VREF- source)

1 = VREF- (AN2)

0 = VSS

Bit 4 VCFG0: Voltage Reference Configuration bit (VREF+ source)

1 = VREF+ (AN3)

0 = VDD

Bit 3-0 PCFG3:PCFG0: A/D Port Configuration Control bits:

Le tableau suivant, illustre la table de configuration les bits du registre de contrôle ADCON1,

PCFG3: PCFG0	AN12	AN11	AN10	AN9	AN8	AN7 <sup>(2)</sup>	AN6 <sup>(2)</sup>	AN5 <sup>(2)</sup>	AN4	AN3	AN2	AN1	AN0
0000 <sup>(1)</sup>	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0001	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0010	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0011	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0100	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0101	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0110	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A	A
0111 <sup>(1)</sup>	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A	A
1000	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A	A
1001	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A	A
1010	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A	A
1011	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A	A
1100	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A	A
1101	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A	A
1110	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	A
1111	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D

Tab .III.5.1.1 configuration de l'ADC du PIC18F4520

Le registre de contrôle ADCON0, permet la sélection du canal

U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
—	—	CHS3	CHS2	CHS1	CHS0	GO/DONE	ADON
bit 7						bit 0	

Bit 7-6 **inutilisable** : lus comme '0'

Bit 5-2 **CHS3:CHS0**: bit de sélection de canal

0000 = Canal 0 (AN0)

0001 = Canal 1 (AN1)

0010 = Canal 2 (AN2)

0011 = Canal 3 (AN3)

0100 = Canal 4 (AN4)

- 0101 = Canal 5 (AN5) (1,2)
- 0110 = Canal 6 (AN6)(1,2)
- 0111 = Canal 7 (AN7) (1,2)
- 1000 = Canal 8 (AN8)
- 1001 = Canal 9 (AN9)
- 1010 = Canal 10 (AN10)
- 1011 = Canal 11(AN11)
- 1100 = Canal 12(AN12)
- 1101 = inutilisable (2)
- 1110 = inutilisable (2)
- 1111 = inutilisable (2)

**Note 1:** ces canaux ne figurent pas sur le boitier de 28-pin.

Bit 1 **GO/DONE:** bit d'état de conversion A/D

Quand ADON = 1:

- 1 = A/D conversion in progress
- 0 = A/D Idle

Bit 0 **ADON:** A/D On bit

- 1 = A/D module de conversion active
- 0 = A/D module de conversion desactivé

Le registre de contrôle ADCON2, permet la configuration du paramètre temps, fréquence d'horloge,

R/W-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
ADFM	—	ACQT2	ACQT1	ACQT0	ADCS2	ADCS1	ADCS0
bit 7							bit 0

Bit 7 ADFM: A/D bit de sélection du format des résultats.

- 1 = justifié à droite
- 0 = justifié à gauche

Bit 6 **inutilisable:** lus comme '0'

Bit 5-3 ACQT2:ACQT0: bit de sélection du temps d'Acquisition

- 111 = 20 TAD
- 110 = 16 TAD
- 101 = 12 TAD
- 100 = 8 TAD
- 011 = 6 TAD
- 010 = 4 TAD
- 001 = 2 TAD
- 000 = 0 TAD (1)

Bit 2-0 ADCS2:ADCS0: bit de sélection de l'horloge de Conversion A/D

- 111 = FRC horloge dérivée à partir de l'oscillateur
- 110 = FOSC/64
- 101 = FOSC/16
- 100 = FOSC/4
- 011 = FRC (clock derived from A/D RC oscillator) (1)
- 010 = FOSC/32
- 001 = FOSC/8
- 000 = FOSC/2

### 5.3.3. L'affichage:

La gestion de l'afficheur LCD, par le programme à l'aide de MikroC, est réalisée avec des fonctions prédéfinies dans la bibliothèque du MikroC, sa programmation est faite sur trois étapes principales dont doit contenir n'importe quel programme, qui sont :

Configuration de LCD, où on définit les pins et la façon de brochage du  $\mu$ C 18F4620, avec l'afficheur LCD en utilisant la fonction

```
Lcd_Config (&PORTB, 4, 5, 6, 3, 2, 1, 0);
```

Initialisation de LCD, cette étape est nécessaire, pour la réinitialisation du système pour commencer l'affichage, à nouveau sans erreur due aux affichages précédents, la fonction utilisée initialise les pins du port utilisé :

```
Lcd_Init (&PORTB);
```

Impression du texte sur l'afficheur, réalisée, à l'aide de la fonction,

```
Lcd_Out(1, 3, "texte à afficher");
```

Communication avec PC:

La gestion de la communication, par le programme à l'aide de MikroC, est réalisée avec des fonctions prédéfinies dans les bibliothèques du logiciel, sa programmation sera donc, comme suit avec : USART Library

- [Usart Init](#)
- [Usart Data Ready](#)
- [Usart Read](#)
- [Usart Write](#)

Software UART Library

- [Soft Uart Init](#)
- [Soft Uart Read](#)
- [Soft Uart Write](#)

#### 5.3.4. Libraries:

Le logiciel MikroC, contient des bibliothèques très riches en fonctions, pour faire un développement complet de software embarqué sur toute la famille de  $\mu$ C de Microchip, ces bibliothèques initialisent et simplifient la programmation des  $\mu$ Contrôleurs en utilisant le langage C, chaque bibliothèque contient des fonctions dont les objectifs sont :

faciliter l'application,  
ne pas reprogrammer à chaque fois les applications de base,  
gagner du temps de développement  
...

Le MikroC contient trois catégories de bibliothèques, on citera seulement celles qu'on a utilisées pour notre application:

Hardware/PIC-specific Libraries

Cette catégorie contient des bibliothèques de fonctions qui s'occupent des spécifications du  $\mu$ C,

ADC Library

LCD(4-bit interface) Library

USART Library

Keypad Library

Standard ANSI C Libraries

Cette catégorie contient des bibliothèques de fonctions qui s'occupent des traitements dont le  $\mu$ C va effectuer lors de son fonctionnement

ANSI C Math Library

Miscellaneous Libraries

Cette catégorie contient des bibliothèques diverses qui comportent différentes fonctions

Conversions Library

**5.3.5. Description du Code source:**

Le code qu'on a développé est rédigé par le MikroC\_Editor, en langage C et utilise les fonctions de différentes bibliothèques que possède MikroC, ce code est une traduction intégrale de l'algorithme qui est illustré dans la figure Fig.III.4.5. où l'algorithme de comptage est illustré dans la figure Fig.III.5.1, vous trouverez aussi toutes les fonctions de programmation de la totalité du projet.

**6. L'interface de communication**

l'interface de communication graphique, est réalisée à l'aide du langage JAVA et logiciel Eclipse, permet la configuration des paramètres du comptage du gaz,

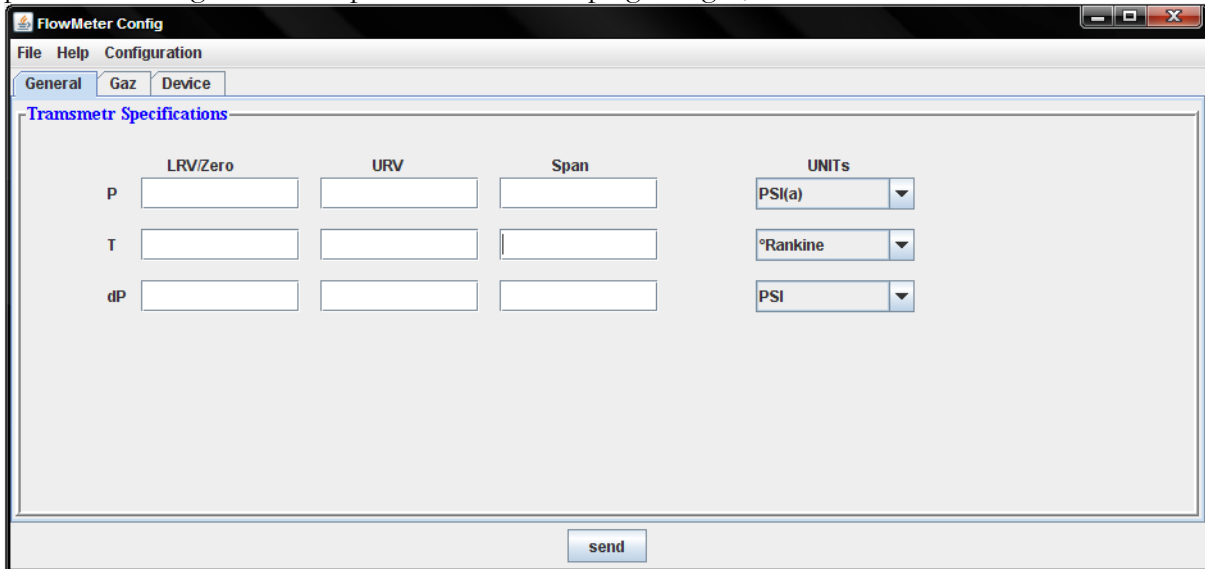


Fig.III 6.a. configuration des intervalles des pression, pression différentielle, température

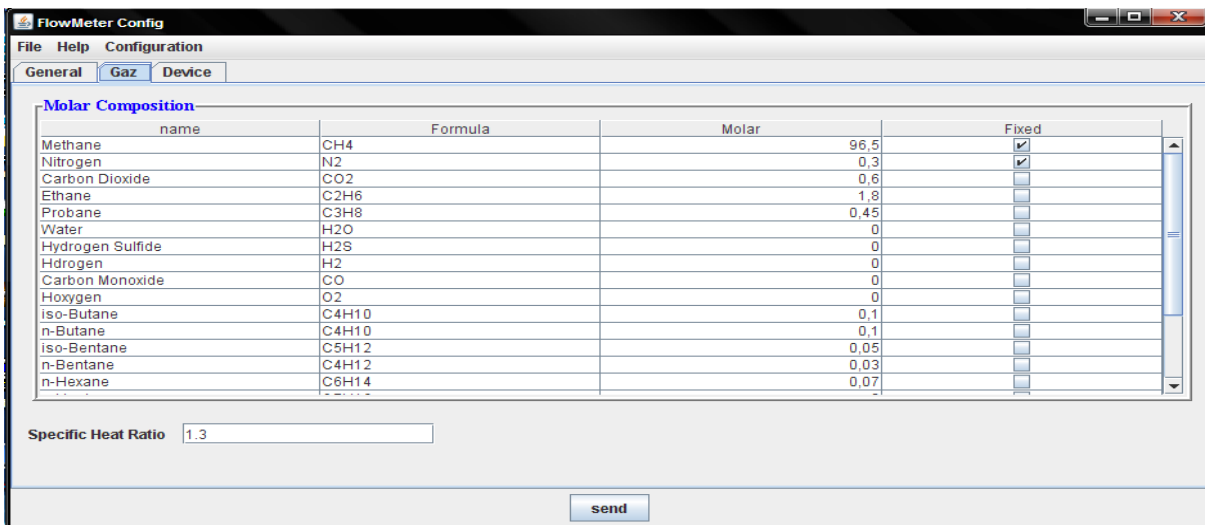


Fig.III 6.b. configuration de la constitution du gaz

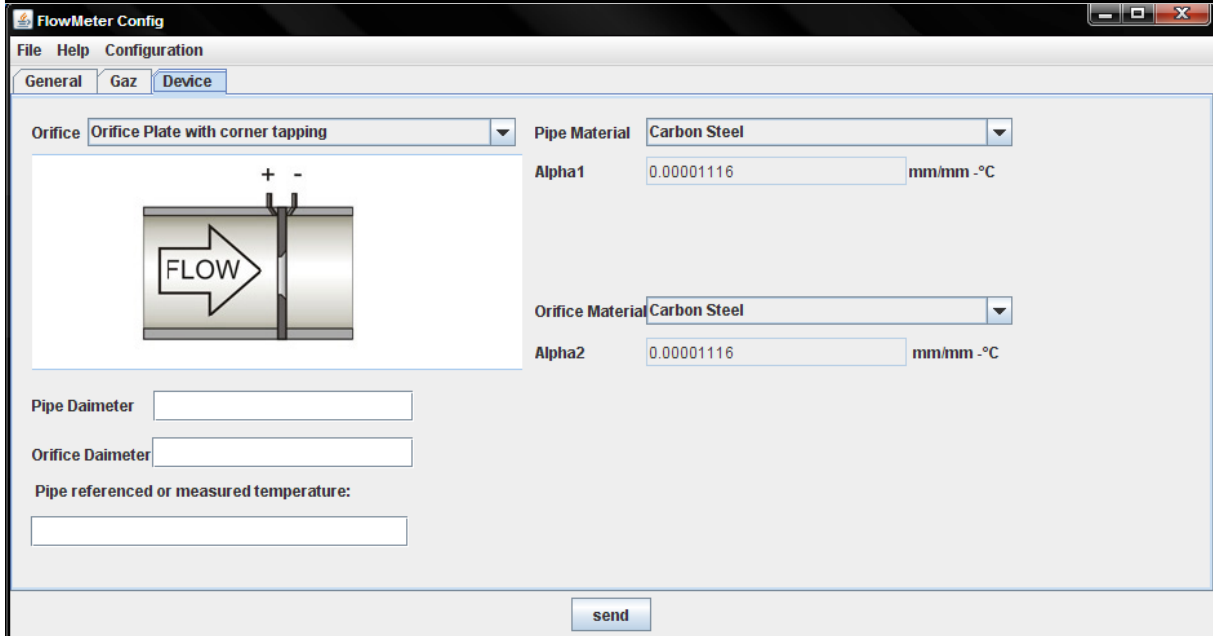


Fig.III 6.a. configuration de la prise des pressions (aux angles), types de matériaux

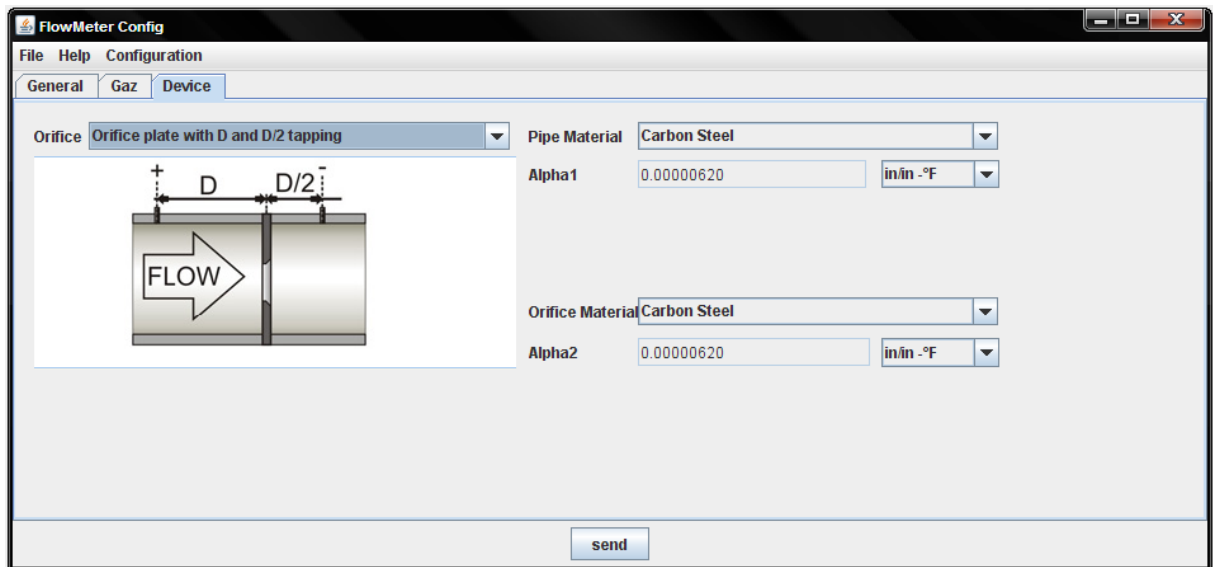


Fig.III 6.a. configuration de la prise des pressions (D-D/2), types de matériaux

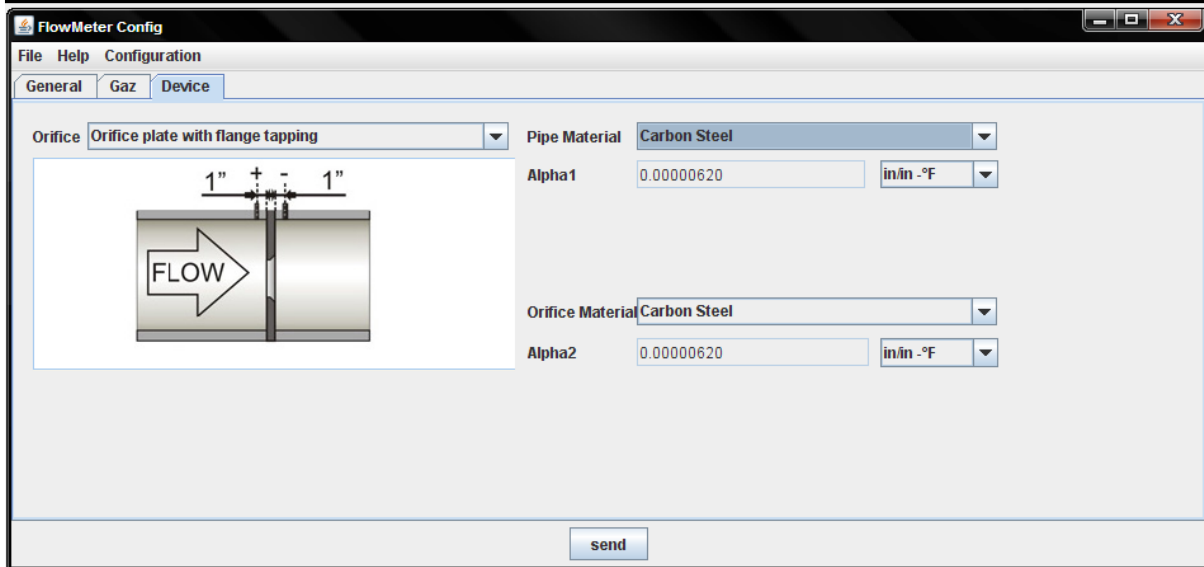


Fig.III 6.a. configuration de la prise des pressions (falnge-taps), types de matériaux

Dans cette interface, il suffit de choisir l'image qui correspondent aux techniques de piquage de pression, le programme de comptage sur le PIC18F4520,

## 7. Conclusion:

Dans ce genre de projet, de conception software, qui se base sur la structuration et la planification des principales fonctions du système, on divise l'algorithme général de fonctionnement, en sous algorithmes, sous forme de blocs, selon leurs rôles dans le fonctionnement global du système

Dans notre réalisation, de comptage de gaz naturel, on a décrit le fonctionnement global du calculateur dans le figure Fig.III.4.5., puis dans la suite de ce chapitre, on a détaillé l'algorithme de fonctionnement de chaque bloc sauf le code source, dont on ne peut que décrire d'une façon superficielle dans ce type document, on a donné une initiation au logiciel de programmation MikroC et une description succincte, des bibliothèques utilisées dans notre projet.

Enfin la conception de l'interface graphique de communication (expliquée dans la section 6) du calculateur avec PC via RS232, qui permet la configuration des paramètres physiques du banc de comptage, cette interface est réalisée avec le langage Java, elle se caractérise par une simplicité d'utilisation

Dans la suite du document, dans le chapitre suivant on va traiter la préparation du banc de mesure, la spécification et calibrage des instruments, les techniques de mesure et de prélèvement des données dont le calculateur utilise pour obtenir le débit de gaz et son cumul soit en volume ou en masse.



# Chapitre IV :

## Essais expérimentales, simulation et résultats

---

## 1. Introduction :

La réalisation des systèmes nécessite de faire des simulations, des essais avant de réaliser le prototype. Les essais pour ce type d'applications d'instrumentation nécessite des connaissances particulières, envers les instruments de mesures utilisés pour le prélèvement des trois grandeurs exploitées par l'équation principale du débit mentionnée dans le premier chapitre, l'organisation de ce chapitre est comme suit :

En premier lieu, il faut connaître toutes les informations qui concernent le banc de mesure en faisant une description qui va être sous forme de spécifications techniques des instruments utilisés ainsi que de toutes les pièces ; puis, on montre les différentes techniques du montage et de l'installation des transmetteurs, après, le quatrième paragraphe illustre le calibrage et l'ajustement des transmetteurs, enfin on donne un exemple de mesure et les résultats donnés par notre ordinateur et on termine par une conclusion de ce chapitre où on va discuter les résultats et des techniques utilisées dans ce type d'applications

## 2. Description du banc de mesure :

Le banc de comptage de gaz, est constitué des éléments qui permet de faire le calcul du débit selon la théorie et les normes expliquées dans les chapitres précédents, le banc de mesure est constitué des éléments illustrés dans la figure suivante :

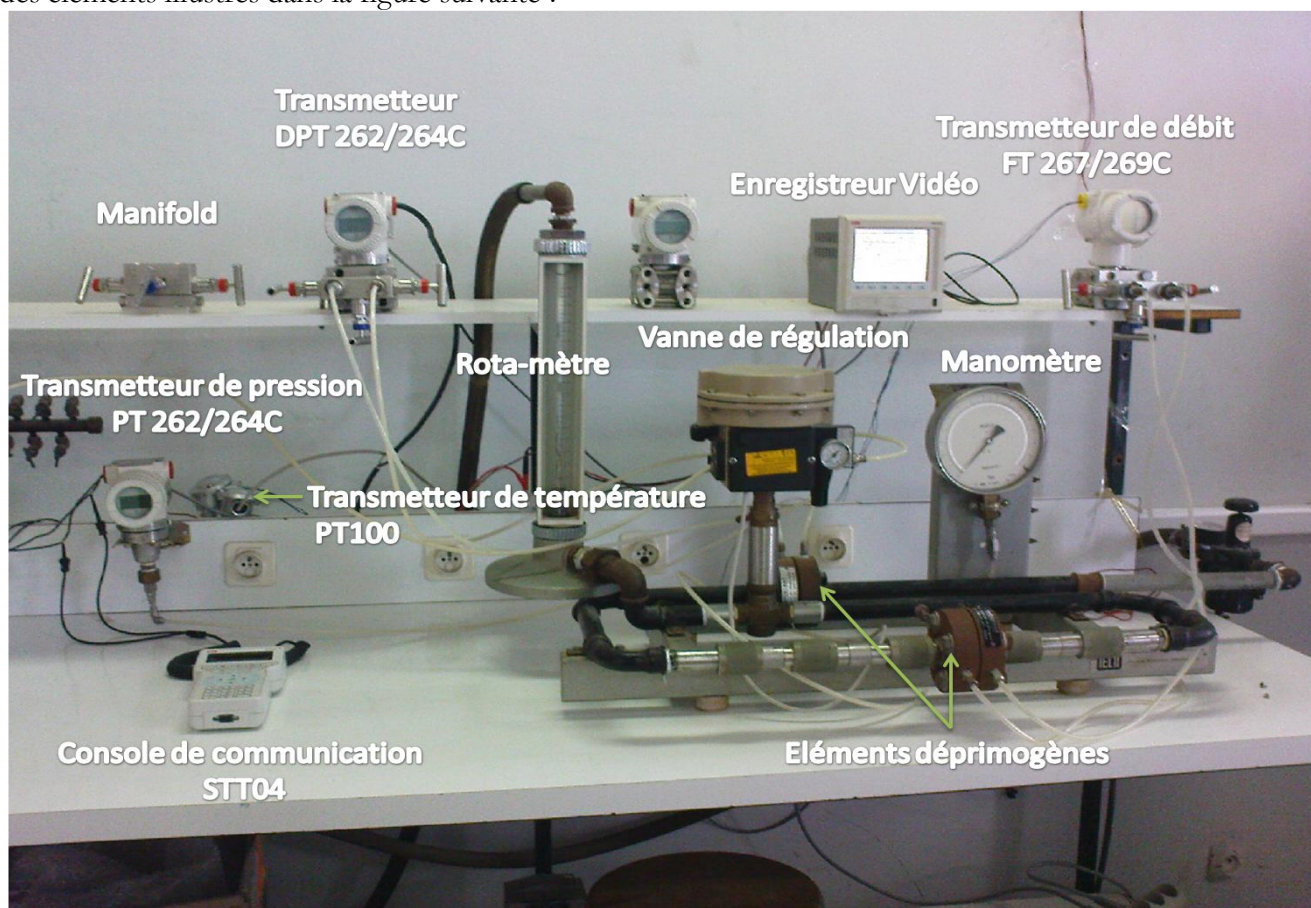


Fig. IV.2.image du banc de comptage au labo de métrologie à l'IAP

## 2.1. Transmetteurs :

Les exemples suivants sont des schémas de montage standard pour l'instrumentation, adaptés aux différentes applications indiquées

### 2.1.1. Transmetteur de température :

Pour mesurer la pression la température, on utilise un transmetteur de température de ABB TH01, montré par la figure suivante :



Fig. IV.2.1.1. Transmetteur de température

On donne quelques caractéristiques, décrites par le fournisseur dans la fiche technique :

- **Paramétrage / configuration sans logiciel ni drivers spéciaux :**
  - Nombreux programmes de paramétrage
  - Logiciels de configuration :
    - DSV401 (SMART VISION),AMS,...
  - Consoles portables DHH691 (691 HT), STT04,HC275,HC375,...
- **Entrée**
  - Sondes à résistance (2, 3, 4 fils)
  - Thermocouples
  - Potentiomètre de recopie (0...5000 Ω)
  - Tensions mV (-125...+1200 mV)
- **Sortie**
  - Technique 2 fils
  - 4...20 mA
- **Isolement électrique (E/S)**
- **Surveillance continue sonde et transmetteur**
  - Sauvegarde permanente des **paramètres** sur EEPROM
  - Surveillance de rupture de sonde selon NAMUR NE 89
- **Stratégie de repli en cas de défaut (NE 43)**
- **Agréments pour protection contre les explosions**
  - Sécurité intrinsèque II 2 (1)G EEx [ja ]ib IIC T6, montage en zone 1
- **CEM selon EN 50082-2 et NE 21**

Thermocouples

**Types :** B,C,D,E,J,K,L,N,R,S,T,U

Le choix du thermocouple détermine la plage de mesure du TH01.

Pour plus d'informations, consultez la fiche technique que fournit ABB.

### 2.1.2. Transmetteur de pression :

Les transmetteurs de pression peuvent être utilisés, pour mesurer la pression statique et différentielle, dans notre application les transmetteurs de la série 2600T de modèle 264 de ABB sont utilisés :

Modèle 264DC pression différentielle/ relative

Modèle 264HC pression relative

Modèle 264NC pression absolue



Fig. IV.2.1.2.a image de transmetteur

■ **Précision de base :  $\pm 0.075\%$**

■ **Étendue de mesure**

– 0.54 à 16000kPa; 2.14inH<sub>2</sub>O à 2320psi

– 1.1 à 16000kPa abs; 8mmHg à 2320psia

■ **Système de mesure fiable associé aux dernières technologies numériques**

■ **Grand choix de cellules**

– optimisation des performances et de la stabilité

■ **Stabilité garantie 5 ans**

■ **Souplesse des moyens de configuration**

– localement avec les touches locales et l'indicateur

LCD ou avec un terminal portatif ou une

Plate-forme de configuration basée sur PC

■ **Multi protocoles**

– permet l'intégration des communications HART®, PROFIBUS PA et FOUNDATION Fieldbus en offrant les possibilités d'interchangeabilité et de mise à jour du transmetteur.

■ **Grand choix de variantes, d'options, fluides de remplissage, matériaux en contact avec le fluide**

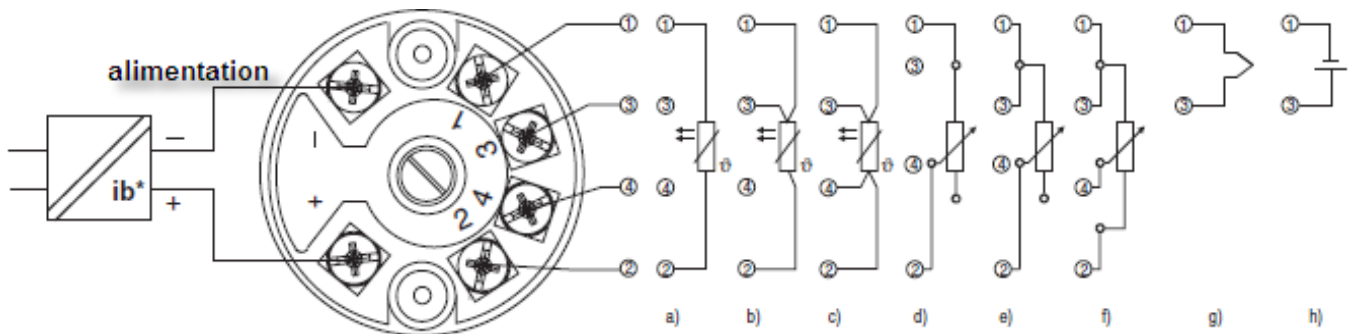
– permettant une grande souplesse et l'optimisation des coûts, ainsi que l'utilisation avec des applications sur des procédés difficiles dans une gamme de température étendue

■ **Conforme à la directive pression PED (Sound Engineering Practice-SEP)**

## 3. Installation des transmetteurs :

### 3.1. Transmetteur de température :

Le Plan des connexions TH01-Ex est illustré Dans la figure ci-dessous



- a) Thermomètre à résistance, 2 conducteurs
- b) Thermomètre à résistance, 3 conducteurs
- c) Thermomètre à résistance, 4 conducteurs
- d) Entrée potentiomètre (2 conducteurs)
- e) Entrée potentiomètre (3 conducteurs)
- f) Entrée potentiomètre (4 conducteurs)
- g) Elément thermique
- h) Mesure de la tension

Fig. IV.3.1 connexion électrique du transmetteur de température

**N.B :** l'abréviation **Ex**, signifie que le transmetteur, peut travailler dans les zones où il y a un risque d'explosion

### 3.2. Transmetteurs de pression :

#### 3.2.1. Montage sur le banc :

L'installation pour mesure de débit avec la technique de la plaque à orifice, on distingue trois types de montages standards qui sont :

- POSITIONNEMENT DU TRANSMETTEUR DE PRESSION DIFFIRENTIELLE :

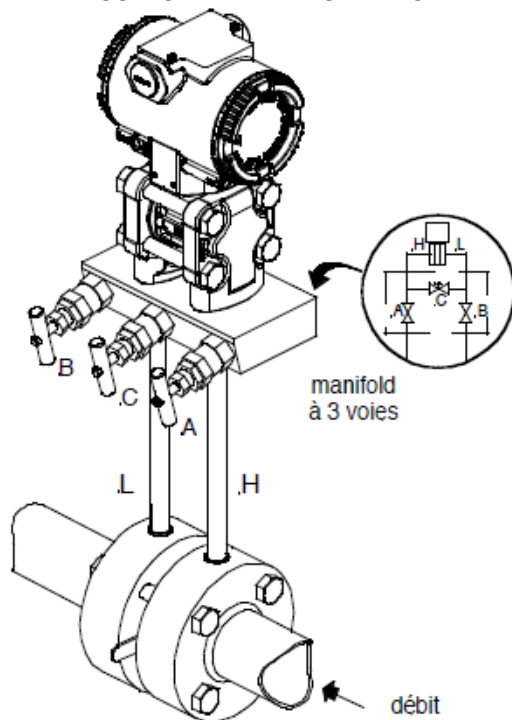


Fig. IV 3.2.1.a montage verticale

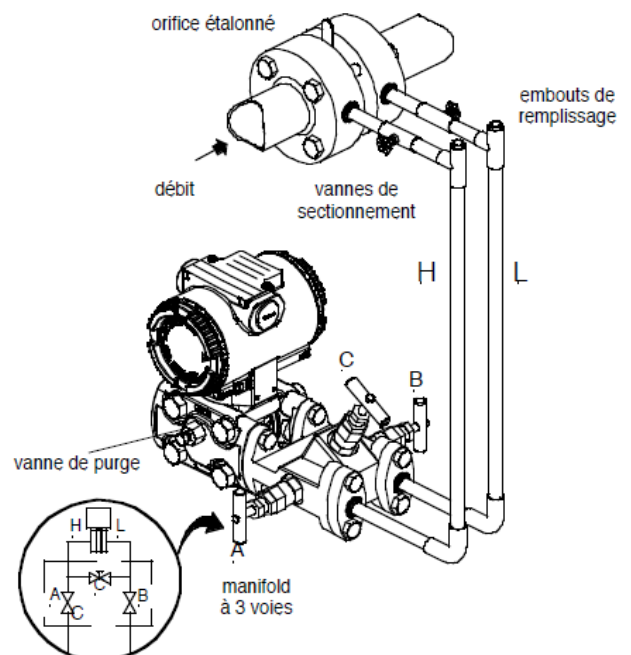


Fig. IV.3.2.1.b avec vannes de sectionnement 1

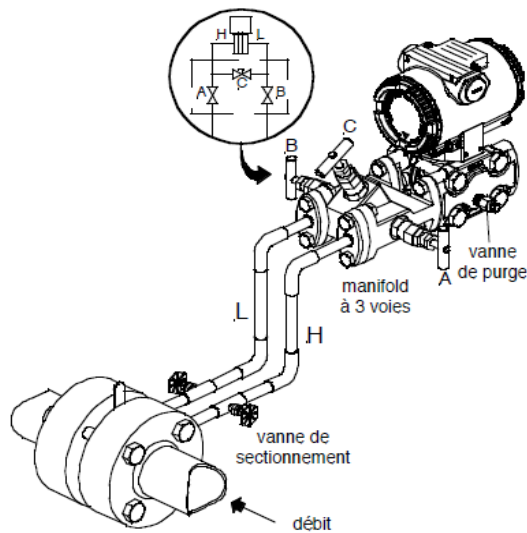


Fig. IV 3.2.1.c. avec vannes de sectionnement 2

1. Installer les prises de pression sur le côté de la ligne
2. Monter à côté des prises ou sous celles-ci
3. Monter la vanne de purge dans la partie supérieure de la bride
4. En cas d'applications avec vapeur, remplir la section verticale des lignes de connexion avec un fluide compatible, en utilisant les embouts de remplissage prévus à cet effet.

### 3.2.2. Branchement électrique au transmetteur :

- **MISE A LA TERRE**

Tous les transmetteurs sont équipés d'une borne extérieure pour mise à la terre. Brancher cette connexion de terre marquée à un point de terre adapté. Pour une boucle de mesure, la connexion de terre devrait présenter une résistance de 5 ohm ou moins. Utiliser un conducteur adapté, d'au moins  $\varnothing 1,6 \text{ mm}_2/15 \text{ AWG}$ .

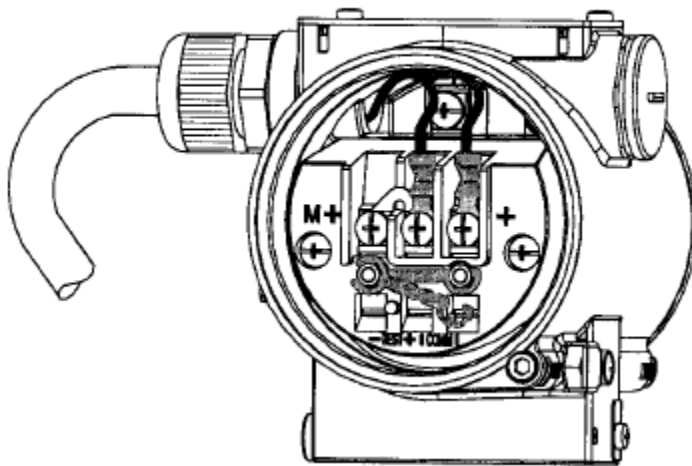


Fig. IV.3.2.2.a vue de la mise à la terre du transmetteur

- **CONNEXIONS ELECTRIQUES**

Le signal de sortie 4-20ma cc et l'alimentation du transmetteur utilisent la même paire de conducteurs. La tension d'alimentation aux bornes du transmetteur HART doit être entre les limites de 10,5 et 42V cc. Pour les approbations EEx ia ou à sécurité intrinsèque FM, CSA, SAA, l'alimentation ne doit pas dépasser 30 Vcc.

1. Enlever les bouchons de protection en plastique, de l'un ou des deux accès pour les connexions électriques, présents sur les côtés dans la partie supérieure du boîtier du transmetteur.
2. Ces accès peuvent être filetés 1/2 NPT, M20, Pg13.5 ou 1/2 GK. On peut éventuellement utiliser des adaptateurs pour s'adapter au standard de câblage du site.
3. Enlever le couvercle du boîtier du côté "connexions" (voir l'indication sur la plaque supérieure du boîtier). Pour des installations antidéflagrantes (certification EEx d), ne pas ouvrir les couvercles du transmetteur lorsque la tension d'alimentation est présente.
4. Au cas où un indicateur de sortie serait présent, l'enlever en le déboîtant. Exercer une forte pression sur tout l'indicateur pour éviter que le couvercle ne se déboîte de sa base.
5. Faire glisser le câble dans le presse-étoupe et dans l'accès ouvert.
6. Relier le conducteur positif à la borne + et le négatif à la borne.
7. Serrer le presse-étoupe et sceller les accès électriques. Lorsque l'installation est terminée, s'assurer que les accès électriques sont bien scellés, contre l'entrée de pluie, de gaz ou de vapeurs corrosives.
8. Si possible, réaliser le câblage avec une boucle d'"égouttement", dont la partie basse sera au-dessous de la connexion de la conduite et du boîtier du transmetteur. Au cas où un indicateur serait présent sur la sortie, s'assurer d'enlever le cavalier de by-pass, puis enficher l'indicateur dans les douilles prévues à cet effet.
9. Revisser le couvercle du boîtier, en le tournant jusqu'à ce qu'apparaisse le O-ring et continuer à serrer jusqu'au contact métal-métal entre le couvercle et le boîtier. Pour les installations antidéflagrantes EEx d, bloquer l'ouverture du couvercle en tournant la vis de blocage (utiliser la clé mâle à six pans de 3 mm fournie avec l'instrument).

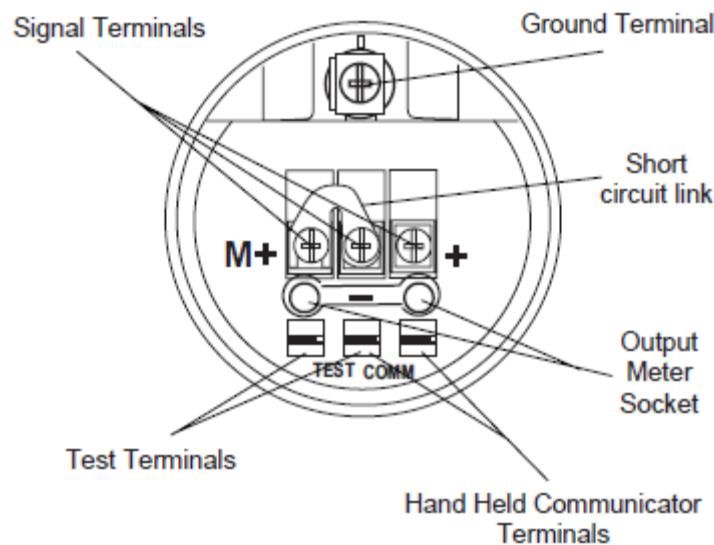


Fig. IV.3.2.2.b branchement du transmetteur

## • CONDITIONS REQUISES DES BRANCHEMENTS DE L'ALIMENTATION

Pour les branchements signal/alimentation, il faut utiliser des câbles avec paires torsadées de 18 à 22 AWG / de 0,8 à 0,35 mm<sup>2</sup> de diamètre ayant une longueur allant jusqu'à 1500 mètres (5000 feet). De plus grandes longueurs demandent des fils de diamètre supérieur. Si l'on utilise un câble blindé, le blindage doit être mis à la terre à un seul bout. En cas de mise à la terre du côté du transmetteur, il faut utiliser la borne intérieure au boîtier marquée.

### 3.2.3. Fonctionnement du transmetteur :

On donne une idée sur le principe de fonctionnement, du transmetteur de pression, qui utilise un capteur de pression illustré dans les figures suivantes. D'après ce schéma, le déplacement du ferrite traduit la différence de pression, sous forme de signal électrique, puis à l'aide de la circuiterie de conditionnement, du transmetteur il se produit un signal courant 4-20mA qui sera proportionnel à la pression.

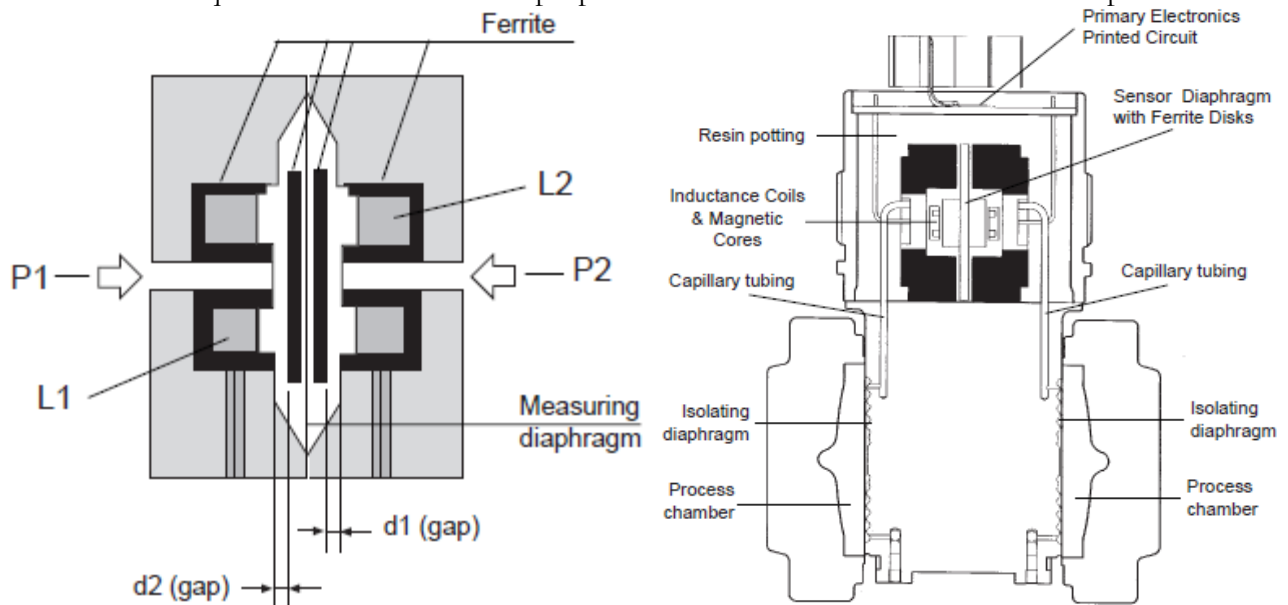


Fig. IV.3.2.3.élément primaire du détecteur

#### • mesure de pression

1. Ouvrir lentement la vanne de sectionnement pour faire entrer le fluide de procédé dans le côté H du transmetteur.
2. Purger tout l'air (pour les liquides) ou les condensats (pour les gaz) de la chambre de procédé, en utilisant la vanne de vidange/purge.
3. Fermer la vanne de sectionnement.
4. Porter le procédé dans la condition de lecture de zéro désirée, par exemple:
  - a. En cas de branche "sèche", ouvrir la vanne de vidange pour porter la chambre de procédé à la pression atmosphérique.
  - b. En cas de branche humide, ouvrir lentement l'embout de remplissage (et s'assurer que la branche est complètement remplie),
5. La sortie devrait être 4 mA cc. En cas contraire:
  - a. Tourner la plaque d'identification pour avoir accès aux boutons extérieurs.
  - b. Appuyer sur le bouton zéro (Z) dans la partie supérieure du transmetteur (Fig. 5.3) pendant au moins deux secondes.
  - c. La sortie passe à 4 mA et, si l'afficheur intégral est présent, apparaît le message "ZERO PASS".
  - d. Si c'est le message "WRITE DISABLE" qui apparaît sur l'afficheur intégral, vérifier la position des interrupteurs DIP (il faut ouvrir le couvercle sur le côté de l'électronique et ôter l'afficheur intégral; cf. Fig. 5.1)
  - e. En cas d'autres messages de diagnostic, voir le manuel de référence.
6. Fermer tout embout de remplissage ou toute vanne de vidange.
7. Ouvrir la vanne de sectionnement.



## 4. Calibrage et ajustement des instruments (instrument calibration) :

Pour un bon fonctionnement des instruments de mesure, dans le cas analogique, il faut effectuer ces opérations, avant de commencer la mesure, car leur conception est faite tel qu'on doit faire un calibrage et un ajustement ou un arrangement qu'on illustre dans le paragraphe suivant. Ensuite, on expliquera la procédure de calibrage et de configuration des transmetteurs qu'on va utiliser pour faire les essais de mesure pour le comptage de gaz avec l'appareil qu'on a conçu.

### 4.1. Calibrage et arrangement :

Un instrument a au moins une entrée et une sortie, pour un transmetteur de pression, l'entrée est la pression du fluide et la sortie est un signal électronique, dans ce cas, par exemple on a deux types de transmetteurs qui sont utilisés pour prélever les grandeurs physiques (température et pression), deux opérations à effectuer pour le bon fonctionnement des transmetteurs, calibrage et rangement.

Ranger un instrument, signifie qu'on établit les valeurs maximale et minimale, de l'étendue de mesure, aussi appelé l'intervalle de travail de l'instrument, donc définir LRV et URV, qui correspondent respectivement à 4 et 20 mA,

Exemple :

pression : 0-3bar ou bien 0-43.51 PSI => 0bar=0PSI=4mA et 3bar=43.51PSI=20mA

Le calibrage de l'instrument, signifie qu'on ajuste (si nécessaire), sa réponse, c'est-à-dire la sortie correspond exactement à son entrée pour tous les points qui appartiennent à l'étendue de mesure.

Il faut faire la différence entre le calibrage et l'arrangement de l'instrument, on peut dire que l'arrangement est un calibrage sur les deux extrêmes de l'étendue, pour les instruments analogiques

### 4.2. Procédure de calibrage :

Le procédé de calibrage le plus simple pour un instrument analogique et linéaire est la so-disant méthode de zéro-et-envergure. La méthode est comme suit :

1. Appliquer à l'entrée de l'instrument la valeur minimale LRV, et laisser stabiliser.
2. Déplacer l'ajustement « nul » jusqu'à ce que l'instrument s'enregistre exactement à ce point.
3. Appliquer à l'entrée de l'instrument la valeur maximale URV, et laisser stabiliser
4. Déplacer l'ajustement de « envergure » jusqu'à ce que l'instrument s'enregistre exactement à ce point.
5. Répéter les étapes 1 à 4 selon les besoins pour réaliser la bonne exactitude aux deux extrémités de la gamme

Une amélioration au-dessus de ce procédé brut est de vérifier la réponse de l'instrument à plusieurs points entre les valeurs minimales et maximales. Un exemple commun de ceci est le calibrage dit de cinq points où l'instrument est vérifié à 0% (LRV), 25%, 50%, 75%, un 100% (URV) de l'étendue. Une variation sur ce thème est de vérifier aux cinq points de 10%, de 25%, de 50%, de 75%, et de 90% tout en faisant toujours zéro et ajustements d'envergure (étendue) à 0% et à 100%. le but est de s'assurer que nous réalisons (au moins) l'exactitude nécessaire de minimum à tous les points le long de la balance, ainsi la réponse de l'instrument peut donner confiance une fois mis en service. Encore une autre amélioration au-dessus de l'essai de cinq points de base est de vérifier la réponse de l'instrument à cinq points de calibrage diminuant aussi bien que l'augmentation. De tels essais désignés souvent sous le nom des calibrages d'Up-down. Le but d'un tel essai est de déterminer si l'instrument a une hystérésis significative : un manque de réponse à un changement de la direction. Quelques instruments analogiques fournissent des moyens d'ajuster des linéarités. Cet ajustement devrait être déplacé si et seulement s'il est

absolument nécessaire ! L'ajustement de linéarités d'un instrument devrait être changé seulement si l'exactitude demandée ne peut pas être réalisée sur l'étendue complète de l'instrument.

Autrement, il est recommandé d'ajuster le zéro et les commandes d'envergure (span) et diviser l'erreur entre les points les plus élevés et les plus bas sur l'échelle, et laisser la linéarité seule

#### Calibrage du transmetteur de pression par le communicateur HART

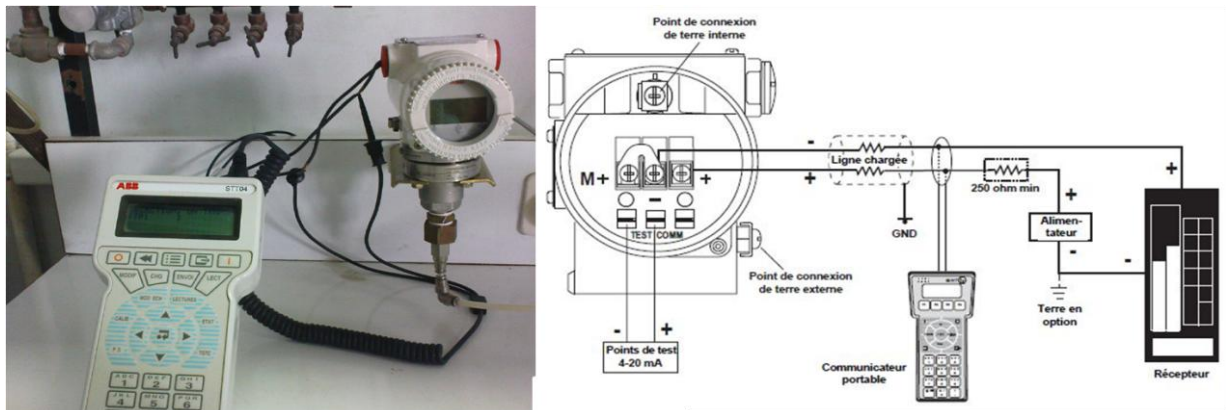


Fig. IV.4.2.a, circuit de calibrage de transmetteur de pression à l'aide de communicateur HART

#### Calibrage du transmetteur de température par le communicateur HART

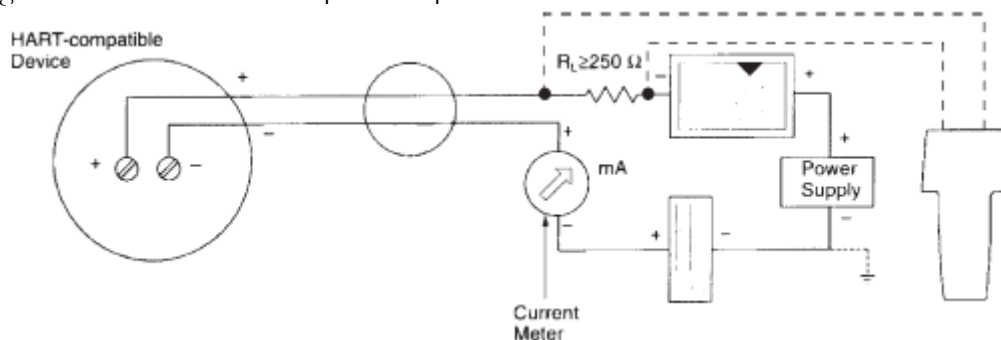


Fig. IV.4.2.b calibrage du transmetteur par le communicateur HART

### 5. Exemple de mesure :

Pression statique :

0-3bar ou bien 0-43.51 PSI => 0bar=0PSI=4mA et 3bar=43.51PSI=20mA

Pression différentielle :

0-50mbar=0-0.725PSI => 0bar=0PSI=4mA et 50mbar=0.725PSI=20mA

Température :

10-50°C ou bien 50-122°F => 10°C=50°F=4mA et 50°C=122°F=20mA

### 6. Conclusion :

La réalisation d'un banc de mesure constitué par des instruments de mesure tels qu'on a vu dans ce chapitre nécessite, des connaissances supplémentaires sur les spécifications et l'utilisation

de ces instruments, aussi des techniques de mesure sont inévitables telles que le calibrage et la configuration préliminaire des instruments, le choix du positionnement des transmetteurs par rapport à l'orifice, aussi savoir comment respecter les standards et les normes internationales qui déterminent les informations, ce qui permet de faire une mesure juste, précise et fidèle.

Toutes les instructions vues dans ce chapitre créent un environnement normalisé, pour le fonctionnement de notre calculateur ou appareil de comptage de gaz, et permet aussi de détecter en cas d'erreurs les sources d'erreurs et facilite la maintenance, le réglage et la reconfiguration de tous les éléments présents pour un comptage correct.

## Conclusion Générale

Ce qu'il faut noter dans ce projet, est la méthodologie dans le domaine de l'instrumentation ce qui permet de structurer la conception et la réalisation et de formuler des équations mathématiques, décrivant les phénomènes physiques. Cette méthode permet de classer les grandeurs physiques entre grandeurs directes (accessibles), et autres indirectes (non-accessibles). Les grandeurs directes sont mesurables par des transmetteurs dédiés et celles indirectes sont déterminées à partir des grandeurs accessibles, après optimisation des équations. Cette première phase est donnée par la norme AGA3 & ISO5167

La phase suivante est la conception d'une circuiterie permettant de concevoir trois blocs principaux de fonctionnement : l'acquisition, le traitement et la restitution des données. Cette architecture est conçue et réalisée selon la disponibilité du matériel et l'optimisation du circuit. Dans ce projet la technologie microprogrammée est la technologie utilisée; vient alors l'étape suivante, qui est la conception du programme qui responsable de la gestion des trois blocs, la technique itérative est utilisée pour le calcul du débit, on doit réaliser un algorithme conforme et compatible avec le hardware. Ensuite, on conçoit d'autres sous systèmes qui permettent de réaliser quelques fonctionnalités du système principal : une interface graphique pour communiquer les données avec le PC, réalisée à l'aide du langage JAVA et le logiciel Eclipse et la documentation nécessaire à l'utilisation de ce projet.

Il est évident qu'un projet n'est jamais complet, nous citerons quelques perspectives non réalisées faut de temps ou à cause d'une réglementation non existante pour permettre l'officialisation et la standardisation d'une technique d'implémentation, ces perspectives sont :

Communication réseaux (Ethernet)

Communication radio

Contrôle et Supervision SCADA

Implémentation d'autres techniques : tube de venturi, gicleur de venturi...

Utilisation d'un afficheur LCD graphique, avec un écran tactile pour afficher et configurer le calculateur

---

## Bibliographie

- [1] Tony R. Kuphaldt, Lessons In Industrial Instrumentation, Version 1.1 – Last update December 9, 2009
- [2] Claude GAILLEDREAU, Débitmètres à pression différentielle, techniques de l'ingénieur
- [3] Orifice metering of natural gas and other related hydrocarbon fluids, PART 3(Natural Gas Applications), troisième édition Aout 1992, American Gas Association
- [4] European Standard EN ISO 5167, Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduit running full,
- [5] Tony R. Kuphaldt, Lessons In Electric Circuits Volume IV-Digital, Fourth Edition, last update November 01, 2007
- [6] Tony R. Kuphaldt, Lessons In Electric Circuits Volume I- DC Fifth Edition, last update October 18, 2006
- [7] Tony R. Kuphaldt ,Lessons In Electric Circuits Volume V-Référence Fourth Edition, last update April 19, 2007
- [8] Ivan Marić, Software objects in distributed flow measurements, Ruder Bosković Institute, Division of Electronics, Laboratory for Information Systems, Bijenička C. 54, P.O.B. 180, Zagreb 10002, Croatia ~Received 1 February 2002; accepted 22 August 2002!
- [9] TRAN-TIEN LANG, Acquisition et traitement des signaux de mesure à l'aide de microprocesseurs, techniques de l'ingénieur
- [10] Flow orifices : SpringerLink
- [11] Adolf bigonoff, Programmation des PICs R28 LA GAMME MID-RANGE PAR L'ETUDE DES 16F87X (16F876-16F877) (pic16f84). PREMIERE PARTIE – Révision 28 DEMARRER LES PIC® AVEC LE PIC16F84
- [12] Adolf bigonoff, Programmation des PICs R18 LA GAMME MID-RANGE PAR L'ETUDE DES 16F87X (16F876-16F877) (pic16f84). SECONDE PARTIE – Révision 18

