

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
المدرسة الوطنية متعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique



DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE
MAGISTER
EN ELECTRONIQUE
Option Electricité Solaire

Présenté par
SEHLAOUI AMINA
Ingénieur d'Etat en Electronique
Université AMAR TELIDJI – Laghouat

Thème

**Etude et réalisation d'un débitmètre
électromagnétique**

Devant le Jury d'examen composé de:

M. TRABELSI Mohamed	Maître de conférences (ENP)	Président
M. HADDADI Mourad	Professeur (ENP)	Rapporteur
M. LARBES Cherif	Maître de conférences (ENP)	Examineur
M. MALEK Ali	Maître de Recherches (CDER)	Examineur
M. ZERGUI Rachid	Chargé de cours (ENP)	Examineur

2005

Remerciement

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire de l'Electricité Solaire de l'Ecole Nationale Polytechnique.

J'exprime ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse M. HADDAD Mourad, pour leurs soutiens, encouragements et précieux conseils.

J'exprime ma profonde reconnaissance à M. MEHENN Mohamed, qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Je tiens aussi à exprimer mes remerciements et ma plus vive gratitude à M. AOUCHER Moussa, M. MALEK Ali, M. BOUSSEKSOU Boulem, qui ont accepté de juger mon travail.

Je tiens également à remercier M C. LARBES, ainsi que tous les autres enseignants du Laboratoire de l'Electricité Solaire et tout le personnel du Département d'Electronique.

Mes remerciements chaleureux à tous mes collègues, en particulier Abdelhak BACHIRI et Seddik MAKHLOUFA.

Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail soient remerciés.

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes très chers parents, pour leurs sacrifices et encouragements durant toutes ces années d'études, pour leurs conseils et orientations dans ma vie.

Je le dédie également à mes frères et mes sœurs.



Une brève histoire des photopiles

Le physicien français Edmond Becquerel décrit le premier l'effet photovoltaïque en 1839 et Einstein en expliqua les mécanismes en 1912, mais cela reste une curiosité scientifique de laboratoire jusque dans les années 50. Becquerel découvre que certains matériaux délivrent une petite quantité d'électricité quand on les expose à la lumière. L'effet fut étudié dans les solides tels que le sélénium par Heinrich Hertz dès les années 1870. Avec des rendements de l'ordre de 1%, le sélénium fut rapidement adopté par les photographes comme luxmètre.

De rapides progrès furent obtenus dès les années 1950 par les équipes de Bell Laboratories qui fabriquèrent la première cellule au silicium cristallin de rendement 4% à partir du procédé de tirage Czochralski. Ce furent en fait les programmes spatiaux qui donnèrent à cette technique ses premières applications commerciales. En 1958, le satellite artificiel américain "Vanguard" emportait un petit panneau de cellules solaires pour alimenter sa radio. Elles fonctionnèrent si bien que les générateurs solaires ont depuis fidèlement accompagné la conquête spatiale et ce sont des centaines de milliers de cellules solaires qui nous permettent aujourd'hui de communiquer par téléphone et par télévision d'un continent à l'autre.

L'industrie des semi-conducteurs contribua largement au développement des cellules solaires. Après tout, une cellule solaire classique n'est rien d'autre qu'une grande diode au silicium ayant la surface de la totalité de la plaquette sur laquelle elle est déposée. La taille des photopiles accompagna d'ailleurs la progression de la dimension des wafers de l'industrie des circuits intégrés, de 2 pouces dans le début des années 70, à 3 pouces à la fin des années 70, 4 pouces

au début des années 80, avant de s'émanciper par la découverte de la croissance de lingots multicristallins parallélépipédiques qui donnèrent des plaquette carrées de 10 cm de côté, et qui atteignent aujourd'hui couramment 12.5 à 15 cm de côté.

Jusqu'au milieu des années 70, les photopiles étaient vraiment trop chères pour être économiquement utilisées sur terre. Ce n'est que depuis le deuxième choc pétrolier au début des années 80 qu'un intérêt véritable s'est rapidement manifesté à travers le monde pour les applications énergétiques terrestres photopiles.

Liste de figures

Le système de pompage photovoltaïque

Figure 1.1.	Schéma d'un système de pompage photovoltaïque	3
Figure 1.2.	Analyse spectrale du rayonnement solaire	4
Figure 1.3.	Trajectoire du Soleil selon les saisons pour une latitude nord	5
Figure 1.4.	Un plan incliné capte plus de rayonnement qu'un plan horizontal	6
Figure 1.5.	Composantes du rayonnement solaire au sol	7
Figure 1.6.	Description d'une cellule photovoltaïque	8
Figure 1.8.	Caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'une cellule solaire pour un ensoleillement et une température donnés.	11
Figure 1.9.	Les cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension	12
Figure 1.10.	Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension	12
Figure 1.11.	Caractéristique $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un module solaire constitué de 36 cellules en série pour différents ensoleillements S avec $T = 30^{\circ}\text{C}$.	15
Figure 1.12.	Caractéristique $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un module solaire constitué de 36 cellules en série pour différentes températures T avec $S = 1000\text{W}/\text{m}^2$.	15
Figure 1.13.	Composantes d'un champ de modules photovoltaïques	16
Figure 1.14.	Cellules, module et champ photovoltaïques	17
Figure 1.15.	Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batterie	18
Figure 1.16.	Pompe à piston (<i>Jack pump</i>) : pour de grandes profondeurs et de petits débits d'eau	19
Figure 1.17.	Caractéristiques d'une pompe volumétrique	20
Figure 1.18.	Cheminement de l'écoulement dans une pompe centrifuge à étages multiples	20
Figure 1.19.	Pompe submersible centrifuge à étages multiples	21
Figure 1.20.	Caractéristiques d'une pompe centrifuge	21
Figure 1.21.	Pompe centrifuge flottante	22
Figure 1.22.	Courbe d'ondes de sortie d'un onduleur de pompage	23

Mesure et capteurs de débit

Figure 2.1.	Schéma synoptique d'un capteur	25
Figure 2.2.	Constitution d'une chaîne de mesure classique	26
Figure 2.3.	Ligne de courant et tube de courant	28
Figure 2.4.	Les différents profils de vitesse	29
Figure 2.5.	Répartition des vitesses d'un fluide pour différents régimes d'écoulement	32

Débitmètre électromagnétique

Figure 3.1.	Tube cylindrique d'un débitmètre électromagnétique	34
Figure 3.2.	Tube isolant	37
Figure 3.5.	Tube conducteur	38
Figure 3.6.	Schéma d'un débitmètre électromagnétique	42
Figure 3.7.	Le système d'un capteur	44

Figure 3.8.	La tension induite de débitmètre	45
Figure 3.9.	Une vue de la réalisation	48
Figure 3.10.	Schéma du montage qui permet l'élimination de la f.e.m parasite	49

Description de la réalisation

Figure 4.1.	Schéma synoptique général du système	51
Figure 4.2.	Principe de fonctionnement du débitmètre électromagnétique	52
Figure 4.3.	Circuit de traitement général du système	52
Figure 4.4	Schéma de principe du débitmètre électromagnétique	53
Figure 4.5.	Filtre passe bande accordé à la fréquence $f_0=1KHz$	56
Figure 4.6.	Amplificateur de puissance	56
Figure 4.7.	Amplificateur non inverseur de gain unité	57
Figure 4.8.	Etage suiveur à grande impédance d'entrée	58
Figure 4.9.	Schéma équivalent de l'ampli opérationnel	58
Figure 4.10.	Schéma de l'amplificateur utilisé	60
Figure 4.11.	Circuit de l'amplification à grande impédance d'entrée	60
Figure 4.12.	Schéma d'un détecteur de crête	61
Figure 4.13.	Brochage du LCD	63
Figure 4.14.	Brochage du 24C64	63
Figure 4.15.	Brochage de la RS232	64
Figure 4.16.	Bloc émetteur	65
Figure 4.17.	Bloc récepteur	65
Figure 4.18.	Bloc de traitement	66
Figure 4.19.	Circuit imprimé du bloc émetteur	66
Figure 4.20.	Circuit imprimé du bloc récepteur	67
Figure 4.21.	Circuit imprimé du bloc de traitement	67
Figure 4.22.	Montage électronique de simulation de la 1 ^{ère} partie de l'émetteur	68
Figure 4.23.	Représentation graphique d'entrée/sortie de l'étage de filtre	68
Figure 4. 24.	Montage global de simulation de la chaîne de réception	69
Figure 4. 25.	Graphes des tensions amplifiées et sortie du détecteur	69
Figure 4.26.	Organigramme principal	70
Figure 4.27.	Obtention du signal carré	71
Figure 4.28.	Organigramme du calendrier	71
Figure 4.29.	Organigramme de la transmission	72
Figure 4.30.	Ecran illustrant le débit de l'eau avec date et heure	73
Figure 4.31.	Signal carré (5V, 1Khz) issu du PIC	73
Figure 4.32.	Signal de la tension de sortie du bloc émetteur (5V, 1Khz) vers le bobinage	73
Figure 4.33.	Signal de la tension du détecteur	74
Figure 4.35.	Tableau illustrant les valeurs des débits de l'eau obtenue et les valeurs enregistrées par le débitmètre réalisé.	74

Figure 4.35.	Courbe d'étalonnage de débitmètre (diamètre mesuré du tuyau = 8mm).	75
--------------	---	----

Annexe A

Figure A.1.	Le diaphragme	80
Figure A.2.	Tube de Venturi	80
Figure A.3.	Tuyère	81
Figure A.4.	Débitmètre à cible	82
Figure A.5.	Rotamètre	82
Figure A.8.	Débitmètre massique thermique	84
Figure A.9.	Débitmètre à turbine	85
Figure A.10.	Débitmètre à effet Vortex	85
Figure A.11.	Débitmètre à ultrasons	86

Annexe B

Figure B.1.	Circuit de l'émetteur	87
Figure B.2.	Circuit de récepteur	87
Figure B.3.	Circuit de traitement	87

Sommaire

Introduction générale**Chapitre 1 : Le système de pompage photovoltaïque**

1.1.	Introduction.....	3
1.2.	L'énergie du soleil.....	4
1.2.1.	La ressource solaire.....	4
1.2.2.	Mesure du rayonnement solaire.....	6
1.3.	le système photovoltaïque.....	8
1.3.1.	L'effet photovoltaïque.....	8
1.3.2.	La cellule photovoltaïque.....	8
1.3.3.	Le module photovoltaïque.....	14
1.4.	Le champ photovoltaïque.....	17
1.5.	Composants d'un système de pompage photovoltaïque.....	18
1.5.1.	Les types de pompes.....	19
1.5.1.1.	La pompe volumétrique.....	20
1.5.1.2.	la pompe centrifuge.....	21
1.5.2.	Les type de moteurs.....	24
1.5.3.	Onduleur.....	24
1.6.	Conclusion.....	26

Chapitre 2 : Mesure et capteurs de débit.

2.1.	Introduction.....	27
2.2.	Capteur.....	27
2.2.1.	Définition.....	27
2.2.2.	Chaîne de mesure.....	29
2.2.3.	Types de grandeur physique.....	29
2.2.4.	Transmission du signal de mesure.....	29
2.2.5.	Performances d'un capteur :définition métrologique.....	30
2.3.	Généralités sur l'écoulement.....	30
2.3.1.	Débits.....	30
2.3.2.	Équation de conservation de la masse ou équation de continuité.....	31
2.3.2.1.	Définition.....	31
2.3.2.2.	Conservation du débit.....	32
2.3.2.3.	Expression du débit en fonction de la vitesse V	32
2.3.2.4.	Vitesse moyenne.....	32
2.3.3.	Viscosité.....	33
2.3.4.	Pertes de charge.....	33
2.3.5.	Facteurs influant sur l'écoulement des fluides dans les conduites.....	33
2.3.5.1.	Vitesse du fluide.....	33
2.3.5.2.	Frottement de la conduite.....	34

2.3.5.3.	Viscosité dynamique du fluide.....	34
2.3.5.4.	Masse volumique du fluide.....	34
2.3.6.	Régimes d'écoulement dans une canalisation.....	34
2.3.6.1.	Écoulement laminaire.....	35
2.3.6.2.	Écoulement turbulent.....	35
2.3.7.	Mesure de débit dans les conduites	35
2.5.	Conclusion.....	35

Chapitre 3 : Débitmètre électromagnétique.

3.1	Introduction.....	36
3.2.	Calcul de la F.E.M. induite dans un liquide en mouvement.....	37
3.2.1.	Les équations fondamentales de l'électromagnétisme.....	39
3.2.2.	Tube isolant.....	40
3.2.3.	Tube conducteur par un milieu isolant.....	41
3.3.	Dimension et forme de la section du conduit de mesure.....	44
3.4.	Elimination des bruits parasites.....	45
3.5.	Circuit Magnétique.....	45
3.5.1.	Influence de la largeur.....	46
3.5.2.	Influence de la courbe des lignes de champs.....	46
3.6.	Influence de l'impédance d'entrée de l'amplificateur.....	47
3.7.	Emploi d'une induction magnétique alternative.....	48
3.7.1.	Réduction de la tension induite par couplage capacitif.....	48
3.7.2.	Réduction de la tension induite par couplage inductif.....	48
3.7.3.	Elimination de la tension parasite.....	49
3.7.4.	Tension induite dans le liquide.....	50
3.7.5.	Influence des harmoniques du champ.....	50
3.8.	Influence du débit sur la polarisation des électrodes.....	50
3.9.	Influence de la conductivité du fluide sur la mesure du débit.....	50
3.10.	Description du système.....	51
3.11.	Débitmètre à induction sinusoïdale.....	52
3.12.	Conclusion.....	53

Chapitre 4 : Description de la réalisation.

4.1.	Introduction.....	54
4.2.	Système électronique.....	57
4.2.1.	L'émetteur.....	57
4.2.1.1.	Générateur du signal sinusoïdal d'émission.....	57
4.2.1.1.1.	Filtre passe bande.....	57
4.2.1.1.2.	Amplificateur de puissance.....	59
4.2.2.	Récepteur.....	60
4.2.2.1.	Amplification à grande impédance d'entrée.....	60
4.2.2.1.1.	Etage suiveur à grande impédance d'entrée.....	61

4.2.2.1.2.	Etage amplificateur.....	63
4.2.2.2.	Détecteur de crête.....	63
4.2.2.2.1.	Fonctionnement du détecteur.....	64
4.2.3.	Bloc de traitement.....	65
4.2.3.1.	La lecture de donnée.....	65
4.2.3.2.	L'affichage.....	66
4.2.3.3.	Stockage dans la mémoire externe.....	66
4.2.3.4.	L'interface PC.....	67
4.3.	Circuits électroniques réalisés.....	68
4.4.	Circuit imprime.....	69
4.5.	Simulation.....	70
4.5.1.	Simulation de la chaîne de mise en forme de la tension des bobines(émetteur)	70
4.5.2.	Simulation de la chaîne de réception.....	72
4.6.	L'organigramme du programme.....	73
4.6.1.	L'organigramme principal.....	73
4.6.2.	Organigrammes des programmes d'interruption	73
4.6.2.1.	Organigramme de Programme de commande.....	73
4.6.2.2.	Organigramme de Programme de calendrie.....	74
4.6.2.3.	Organigramme de Programme de transmission.....	75
4.7.	Tests et résultats des mesure.....	76
7.8.	Etalonnage.....	77
7.9.	Conclusion.....	78
Conclusion générale		79
Référence bibliographique		80
Annexe A		82
Annexe B		90
Annexe C		105

Introduction générale :

Depuis la généralisation de l'utilisation de l'électricité, la consommation énergétique n'a cessé d'augmenter ; des années 60 à nos jours celle-ci a triplé. Actuellement, les principales sources d'énergie proviennent des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et du nucléaire. Cependant, depuis les crises successives du pétrole des années 70, le problème de la conversion et du stockage de l'énergie a conduit à la recherche et au développement de nouvelles sources d'approvisionnement. Cet intérêt s'est accru face à l'épuisement inéluctable des énergies fossiles, à leur impact sur l'environnement et aux déchets qu'elles engendrent.

Cependant et afin de décoloniser et de diversifier l'origine de la production d'électricité, de nouvelles énergies dites «renouvelables», ont émergé telles la biomasse, l'éolien, la géothermie, la marémotrice et le solaire. Elles ont toutes l'immense avantage d'être d'origine naturelle, inépuisables et non polluantes. Parmi celles-ci, l'énergie solaire est la mieux partagée par tous les habitants du globe terrestre. Son exploitation permettrait de fournir en électricité des sites isolés des réseaux électriques et éviterait la création de nouvelles lignes électriques qui demandent généralement un lourd investissement.

La technologie photovoltaïque (PV) est une solution attrayante comme remplacement ou complément aux sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de ses nombreux avantages :

- Elle est un moyen fiable qui requiert peu d'entretien.
- Elle fournit de l'électricité grâce à l'énergie gratuite et renouvelable du soleil.
- Elle ne nécessite aucun combustible.
- Elle est silencieuse, non polluante et respectueuse de l'environnement.
- Elle est polyvalente et peut être ajustée selon les besoins.

Avec une grande facilité de maintenance, l'énergie photovoltaïque peut permettre de couvrir les besoins d'une habitation en électricité tels que l'éclairage, le pompage de l'eau et la production du froid.

Le pompage PV est l'une des applications prometteuses de l'utilisation de l'énergie PV. Le système de pompage PV est généralement composé d'un générateur PV, d'un convertisseur d'énergie, d'un moteur et d'une pompe.

Pour les systèmes DC, trois types peuvent être utilisés. Le premier est constitué d'un générateur PV couplé directement à un groupe motopompe. Le deuxième est celui qui utilise le stockage de l'énergie à l'aide des batteries. Il est rarement utilisé. Le troisième système est composé d'un générateur PV couplé à une motopompe DC à travers un convertisseur DC/DC.

Pour une station expérimentale de pompage, un des paramètres intéressant à surveiller est le débit de l'eau.

C'est ce qui nous a amené à étudier un débitmètre, notre choix s'étant fixé sur un type électromagnétique.

La mesure d'un débit liquide peut être effectuée par différentes méthodes. Les méthodes directes utilisent des compteurs volumétriques tels que les compteurs rotatifs alors que les méthodes indirectes permettent la mesure par l'intermédiaire de variables auxiliaires. Tous ces procédés sont souvent utilisés industriellement et sont très sensibles.

Notre travail consiste à concevoir et réaliser un dispositif électronique destiné à mesurer le débit de l'eau à l'aide d'un capteur électromagnétique, et l'adaptation de ce débitmètre aux contraintes d'un pompage photovoltaïque.

Cette réalisation devra permettre aussi de stocker les valeurs mesurées avec la date et l'heure des mesures correspondantes dans une mémoire, et puis les envoyer vers un PC pour des traitements futurs.

Notre mémoire se présente en quatre chapitres. Dans le premier nous donnons quelques notions de base sur le système de pompage solaire,

Dans le deuxième chapitre nous présenterons d'autres notions sur l'écoulement des fluides. Ensuite nous citons les différents débitmètres qui existent dans l'industrie.

Le troisième chapitre traite plus en détail la conception d'un débitmètre électromagnétique

Dans le quatrième chapitre, nous abordons la conception et la réalisation du dispositif électronique à base d'un microcontrôleur 16F876 ainsi que les différents éléments avec leur fonctionnement et les tests du système global ainsi que le logiciel de gestion de ce dispositif électronique.

Une conclusion sur les résultats obtenus et les perspectives de ce travail terminent ce mémoire.

Chapitre 1 :

Le système de pompage photovoltaïque

1.1. Introduction :

Un des systèmes photovoltaïques intéressant du point de vue utilité, autonomie et fiabilité est le système photovoltaïque de pompage. Ce système est très utilisé dans les zones rurales et sites isolés pour le pompage de l'eau. L'installation ainsi définie est soumise aux impératifs suivants:

- Un bon rendement
- Une excellente fiabilité
- Une autonomie de fonctionnement

Un tel système se présente comme illustré sur la figure 1.1. Il consiste à faire fonctionner la motopompe à partir d'une source de génération photovoltaïque

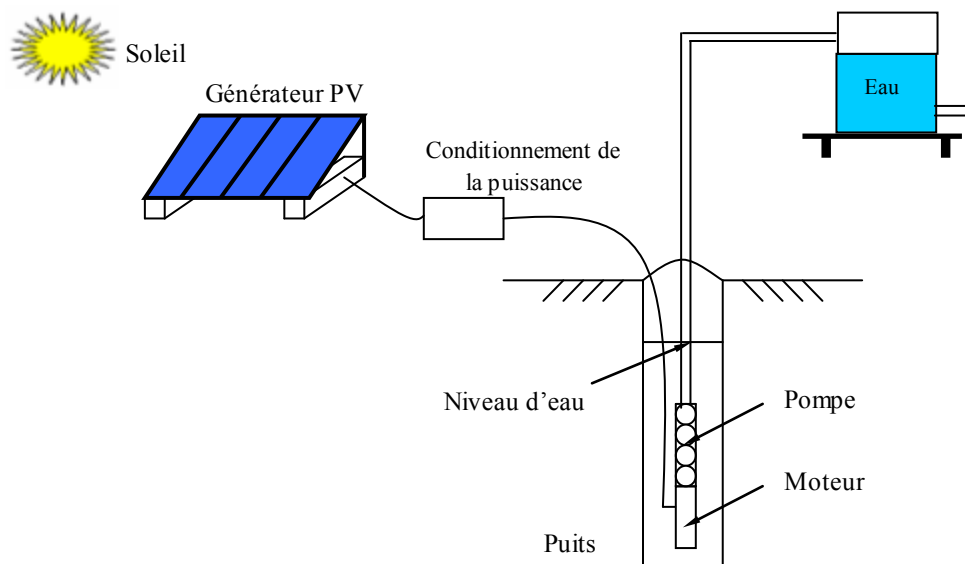


Figure 1.1. Schéma d'un système de pompage photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque générée est transformée en une énergie potentielle du liquide pompé, qui est ensuite distribué.

1.2. L'énergie du soleil :

1.2.1. La ressource solaire:

Le Soleil est une étoile de forme pseudo- sphérique dont le diamètre atteint 1 391 000Km. Il est situé à une distance moyenne de 149 598 000 Km de la Terre. Composé de matières gazeuses, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, il est le siège de réactions de fusions nucléaires permanentes et sa température de cœur atteint 10^7 °K.

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (μm). La figure 1.2 représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 9% dans la bande des ultraviolets ($<0,4 \mu\text{m}$),
- 47% dans la bande visible ($0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$),
- 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8 \mu\text{m}$).

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt au mètre carré (kW/m^2), à plus ou moins 3 %, selon que la Terre s'éloigne ou se rapproche du Soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement $1,2\text{kW}/\text{m}^2$ ($1200\text{W}/\text{m}^2$). La rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus.

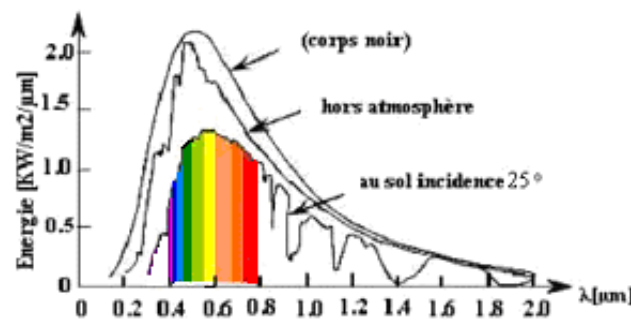


Figure 1.2. Analyse spectrale du rayonnement solaire

L'utilisation du rayonnement solaire comme source d'énergie pose donc un problème bien particulier. En effet, le rayonnement solaire n'est pas toujours disponible ; en outre, on ne peut l'emmagasiner ni le transporter. Le concepteur d'un système qui emploie le rayonnement solaire comme source d'énergie doit donc déterminer la quantité d'énergie solaire disponible à l'endroit visé et le moment où cette énergie est disponible.

Il faut d'abord comprendre l'effet de la rotation (moment de la journée) et de l'inclinaison (saison de l'année) de la Terre sur le rayonnement solaire. L'absorption atmosphérique est plus faible lorsque le Soleil se trouve à son point le plus haut dans le ciel, c'est-à-dire plein sud dans l'hémisphère nord et plein nord dans l'hémisphère sud. En effet, la distance que doit parcourir le rayonnement dans l'atmosphère est plus courte lorsque le Soleil est directement au-dessus de l'endroit visé. C'est le « midi solaire », moment où le rayonnement direct est le plus intense. Comme le Soleil est plus haut et que les journées sont plus longues en été, la quantité totale d'énergie reçue sur un plan horizontal y est plus grande qu'en hiver.

La figure 1.3 illustre ce phénomène, en reproduisant la trajectoire du Soleil dans le ciel au cours des quatre saisons de l'année.

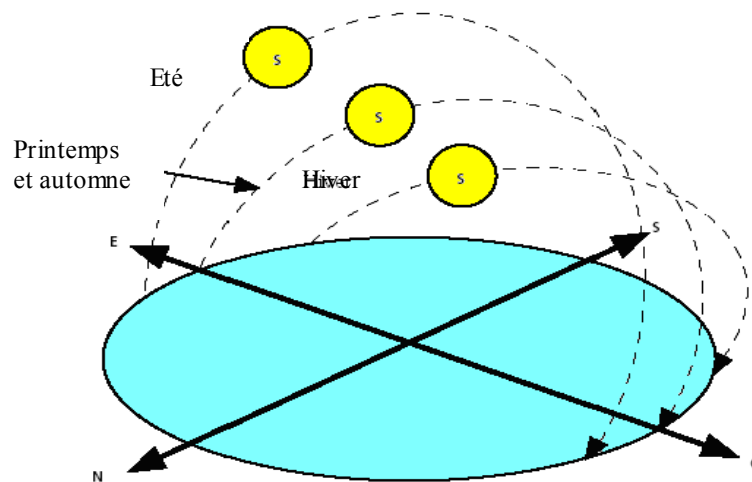


Figure 1.3. Trajectoire du Soleil selon les saisons pour une latitude nord

La latitude a aussi un effet important : les journées estivales s'allongent à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur, et le Soleil est plus bas au midi solaire. Les journées d'hiver sont également plus courtes, et le Soleil encore plus bas qu'à l'équateur. Autrement dit, l'intensité maximale (à midi) et la quantité totale de rayonnement solaire sur un plan horizontal diminuent à mesure qu'augmente la latitude.

Inversement, le rayonnement atteint son intensité maximale lorsque le plan est perpendiculaire aux rayons du Soleil, donc l'intensité du rayonnement solaire sur un plan quelconque augmente quand on l'incline vers le Soleil (figure 1.4).

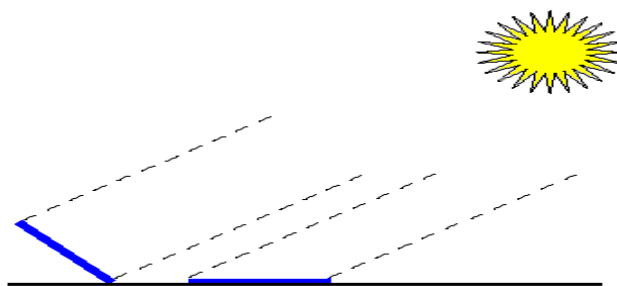


Figure 1.4. Un plan incliné capte plus de rayonnement qu'un plan horizontal

On maximise par conséquent la quantité d'énergie solaire directe captée quand on change constamment l'inclinaison du plan pour le maintenir à angle droit avec les rayons du Soleil. Si le plan est fixe, la quantité d'énergie reçue sera minimale, car les rayons du Soleil le frapperont de biais la majorité du temps.

Les phénomènes atmosphériques, telles les conditions météorologiques (nébulosité, poussières, humidité, etc.) et la couverture du sol, ont une influence encore plus marquée sur le rayonnement solaire effectivement reçu à la surface de la Terre.

On peut dire que l'intensité du rayonnement solaire est extrêmement variable suivant :

- La localisation géographique du site (spécialement par rapport à sa latitude).
- La saison.
- L'heure.
- Les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...).
- L'altitude du lieu.

1.2.2. Mesure du rayonnement solaire :

L'ensoleillement correspond à l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan à un moment donné. Il s'exprime habituellement en watts par mètre carré (W/m^2); l'ensoleillement varie de zéro, au lever du Soleil, à sa valeur maximale, typiquement au midi solaire.

L'ensoleillement peut également exprimer la quantité d'énergie solaire captée sur un plan pendant un intervalle déterminé. Il s'exprime habituellement en kilowattheure par mètre carré (kWh/m^2), en « heure de soleil maximum », en mégajoule par mètre carré (MJ/m^2) ou en calorie par centimètre carré (cal/cm^2) pour l'intervalle déterminé – une journée ou une heure, par exemple. $1kWh/m^2 \cdot j = 1$ heure de soleil maximum ($1000W/m^2$). jour

$$= 3,6 MJ/m^2 \cdot j$$

$$= 86 cal/cm^2 \cdot j$$

Les valeurs quotidiennes d'ensoleillement sont habituellement présentées sous forme de moyennes mensuelles pour différentes latitudes et inclinaisons à des endroits précis (afin

de rendre compte de l'effet de conditions météorologiques différentes). Le plus souvent, on exprime l'ensoleillement en « heures de soleil maximum », c'est-à-dire par le nombre équivalent d'heures par jour où l'éclairement est en moyenne de $1000\text{W}/\text{m}^2$. Ainsi, un ensoleillement de six heures de soleil maximum indique que le rayonnement reçu au cours d'une journée est le même que si le Soleil avait brillé pendant six heures à $1000\text{W}/\text{m}^2$. Les heures de soleil maximum sont un indice utile pour le dimensionnement des systèmes photovoltaïques, car ces systèmes sont habituellement évalués en watt-crête (Wc), c'est-à-dire sous un éclairement de $1000\text{W}/\text{m}^2$.

Il y a quatre types de rayonnement comme illustré sur la figure 1.5 :

- Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du Soleil. Il peut être mesuré par un pyréliomètre.
- Le rayonnement diffus est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.
- Le rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

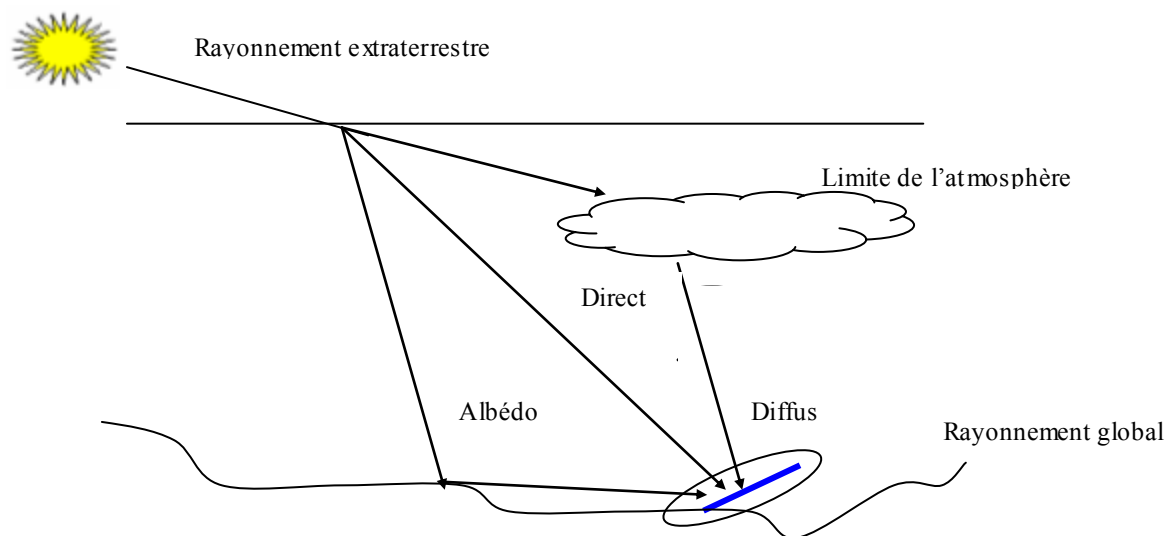


Figure 1.5. Composantes du rayonnement solaire au sol

À noter que certains capteurs solaires concentrent le rayonnement solaire afin d'augmenter le rendement du capteur par rapport à une surface donnée. Ces capteurs à

concentration ne peuvent utiliser que le rayonnement direct provenant du Soleil. Dans les endroits avec une forte proportion d'ensoleillement diffus, ces capteurs ne peuvent pas fonctionner efficacement car l'ensoleillement diffus ne peut être concentré en un point [25].

1.3. Le système photovoltaïque :

1.3.1. L'effet photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité. À l'encontre de l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structuraux d'un bâtiment pour mieux le chauffer (ou le refroidir), et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur (liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du Soleil (on pense au chauffe-eau), l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observé la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Telephone, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque.

1.3.2. La cellule photovoltaïque :

Une cellule solaire est un élément semi-conducteur qui convertit l'énergie solaire en une énergie électrique (figure 1.6). Elle consiste en une base de silicium dopée de type P couverte d'une mince couche de type N, au-dessus de laquelle on dispose une grille métallique qui constitue avec la base arrière les électrodes de sortie de la cellule.

Lorsque la cellule est éclairée par une radiation lumineuse d'énergie $h\nu$ supérieure ou égale à l'énergie de la bande interdite E_g du semi-conducteur, un couple électron-trou est créé, c'est l'effet photovoltaïque. Ces charges sont refoulées par le champ électrique interne de la jonction PN vers ses extrémités ce qui va créer une différence de potentiel appelée tension photovoltaïque. Si une charge est appliquée aux bornes de la cellule, cette tension génère un courant I_{ph} appelé courant photovoltaïque.

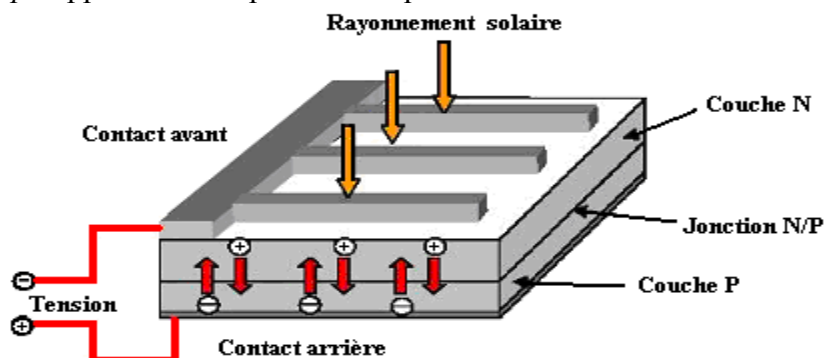


Figure 1.6. Description d'une cellule photovoltaïque

1.3.2.1. Caractéristiques de la cellule photovoltaïque :

On a pris le modèle fréquemment utilisé afin de décrire ses caractéristiques électriques, modèle qui prend en compte les différentes résistances internes, (Figure I.7) [19] [23].

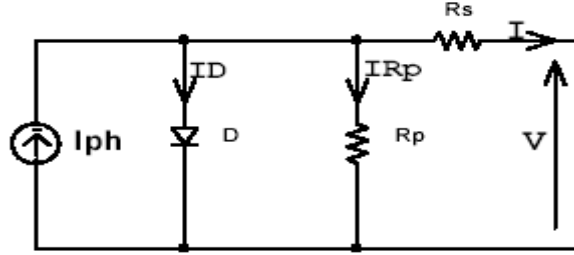


Figure 1.7. Circuit équivalent d'une cellule solaire

R_p représente la résistance shunt qui modélise les fuites par l'effet de bord autour de la cellule solaire ; R_s prend en considération les contacts ohmiques entre le métal et le semi-conducteur ainsi que la résistance intrinsèque du silicium ; I_{ph} est le courant photovoltaïque engendré par les radiations lumineuses, et la diode D représente la jonction PN de la cellule.

A partir du modèle précédent on a :

I et V sont respectivement le courant et la tension de sortie.

$$\text{D'après la loi de Kirchoff : } I_{ph} = I_D + I_{Rp} + I \quad (1.1)$$

$$\text{Le courant passant dans la résistance shunt (Rp) : } I_{Rp} = \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_p} \quad (1.2)$$

$$\text{Le courant de jonction } I_D \text{ est donné par : } I_D = I_0 \left\{ \exp \left[\frac{e(V + I \cdot R_s)}{\alpha \cdot k \cdot T_c} \right] - 1 \right\} \quad (1.3)$$

En remplaçant les expressions de I_{Rp} et I_D dans l'équation (1.1), nous aurons l'expression du courant de sortie I

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{e(V + I \cdot R_s)}{\alpha \cdot k \cdot T_c} \right] - 1 \right\} - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_p} \quad (1.4)$$

Si on admet que la résistance shunt R_p est très grande, l'équation (1.4) devient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{e(V + I \cdot R_s)}{\alpha \cdot k \cdot T_c} \right] - 1 \right\}$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{(V + I \cdot R_s)}{V_i} \right] - 1 \right\} \quad (1.5)$$

Avec $V_t = \frac{\alpha \cdot k \cdot Tc}{e}$ tension thermique, I_0 le courant de saturation de la diode D , R_s la résistance série de la cellule (Ω), R_p la résistance parallèle (Ω), α facteur d'idéalité, Tc la température de la cellule (K), e la charge élémentaire d'électron ($1.6021 \cdot 10^{-19}$ C), k la constante de Boltzmann ($1.3854 \cdot 10^{-23}$ JK⁻¹).

I_{ph} , I_0 , R_s , R_p et V_t sont les 5 paramètres qui dépendent de l'éclairement et de la température de la cellule. La détermination de ces paramètres se base généralement sur les données des constructeurs et relatives aux conditions de références définies par la caractéristique $I=f(V)$ du module photovoltaïque.

Une cellule solaire est caractérisée par les paramètres fondamentaux suivants qui apparaissent sur la figure I.8 :

- Courant de court-circuit I_{sc} : c'est le courant maximal généré par la cellule ; il est produit lorsqu'elle est soumise à un court circuit $V = 0$, puisque $R_s \ll R_p$ on peut mettre $I_{sc} \approx I_{ph}$.
- Tension à circuit ouvert V_{oc} : c'est la tension aux bornes de la cellule sans charge où le courant généré $I = 0$. Elle reflète la tension de seuil de la jonction PN. En négligeant le courant qui passe dans la résistance parallèle R_p , V_{oc} est exprimée comme suit :

$$V_{oc} = \frac{\alpha K T c}{e} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) = V_t \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (1.6)$$

- Point de puissance maximale : c'est le point de fonctionnement (V_{mp}, I_{mp}) où la cellule solaire génère sa puissance maximale $P_{max} = V_{mp} \cdot I_{mp}$.
- Facteur de remplissage FF (*Fill Factor* en anglais) : il correspond au rapport de puissance maximale sur le produit de V_{oc} et I_{sc} , $FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$ et reflète la qualité de la cellule par rapport à une cellule idéale ($FF = 1$).
- Le rendement de la cellule : c'est le rapport de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, qui est égal au rapport de la puissance maximale de sortie sur la puissance des radiations lumineuses.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (1.7)$$

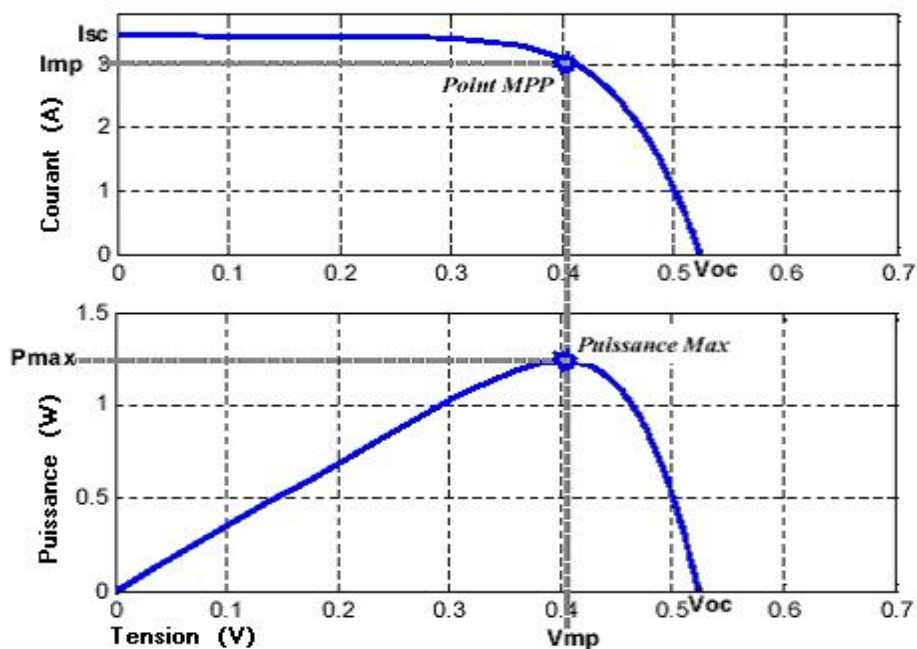


Figure 1.8. Caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'une cellule solaire pour un ensoleillement et une température donnés.

1.3.2.2. Les associations de cellules PV :

En fait, l'association de cellules PV est analogue à l'association de générateurs de courant :

- En série, leurs tensions s'ajoutent.
- En parallèle, leurs courants s'ajoutent.

Cependant, leur fonctionnement est altéré si l'une des cellules associées est occultée (ombre par exemple).

1.3.2.2.1. L'association en série de cellules PV :

Les cellules sont connectées en série en soudant le contact devant de chaque cellule au contact arrière de la suivante.

Si on assemble en série des cellules, la tension aux bornes de l'assemblage est égale à la somme des tensions délivrées par chacune des cellules.

$$V = \sum_{cell=0}^n V_{cell} \quad (1.8)$$

V (Volt) : Tension aux bornes de l'assemblage.

V_{cell} (Volt) : Tension aux bornes de la cellule d'indice " cell ".

Dans ce cas, le courant qui traverse les cellules est le même mais les cellules peuvent fonctionner à des tensions différentes.

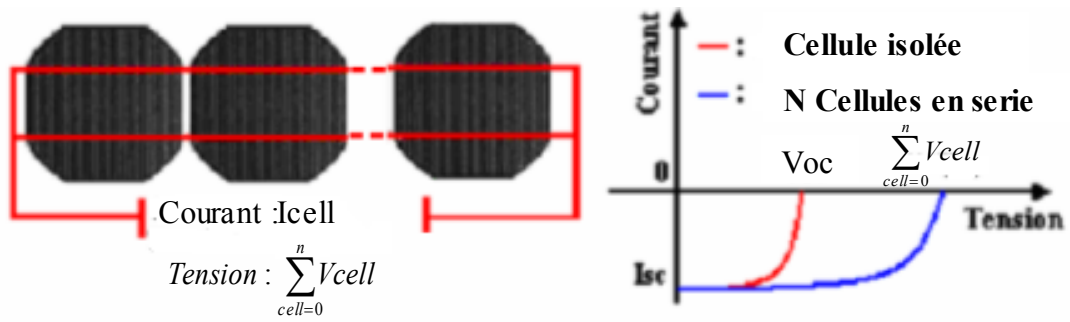


Figure 1.9. Les cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension

Si une cellule est occultée (si elle ne reçoit plus qu'une faible partie de l'énergie solaire reçue par les cellules voisines), elle ne peut délivrer qu'un courant limité. Elle fonctionne donc en inverse (comme un récepteur soumis à une tension inverse de celle produite en direct) par rapport aux autres cellules du module qu'elles délivrent un courant supérieur à ce courant limité. En fonctionnant ainsi, un échauffement de la cellule apparaît et pourrait provoquer son claquage.

Pour limiter la tension inverse maximum susceptible de se développer aux bornes d'une cellule, les fabricants de modules photovoltaïques placent une diode parallèle, appelée diode by-pass, toutes les 18 à 36 cellules (selon les applications).

1.3.2.2.2. L'association parallèle de cellules PV :

Dans le cas d'un montage en parallèle, le courant de l'ensemble sera égal à la somme des courants produits par chacune des cellules.

$$I = \sum_{cell=0}^n I_{cell} \tag{1.9}$$

I (Ampère) : Courant circulant dans l'assemblage.

I_{cell} (Ampère) : Courant circulant dans chaque cellule d'indice " cell ".

Dans le cas d'une association en parallèle, les cellules délivrent la même tension mais elles peuvent fonctionner avec des courants différents.

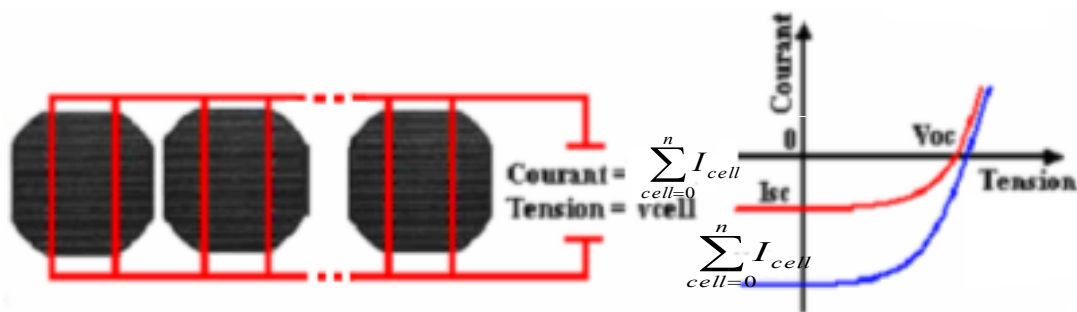


Figure 1.10. Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension

Cependant, si une ou plusieurs cellules sont occultées, les autres deviennent réceptrices car la tension de fonctionnement est supérieure à la tension de circuit ouvert. Bien qu'une cellule puisse dissiper un courant important, il est préférable de disposer d'une diode anti-retour, laquelle empêche également de gaspiller dans une autre cellule occultée une partie de la puissance produite par les cellules fonctionnant normalement. Pour limiter ces pertes et protéger les cellules, on place donc une diode en série, appelée diode série, toutes les n cellules (n étant fonction des caractéristiques du montage).

1.3.2.2.3. Utilisation des diodes by-pass et séries :

Les diodes by-pass de protection d'association de cellules en série sont montées :

- Par les fabricants lors de l'association des cellules en série (pour protéger les cellules). Elles seront insérées dans les boîtes de connections des cellules sur chaque module lors de leurs fabrication.
- Par les installateurs lors de l'association de modules en série dans les boîtes de jonction.

Les diodes séries de protection d'association en parallèle :

- Ne sont pas montées par les fabricants lors de l'association des cellules en parallèle (il n'est pas nécessaire de protéger une cellule occultée dans un module compte tenu des faibles courants mis en jeu).
- Sont montées par les installateurs lors de l'association de modules en parallèle dans les boîtes de jonction pour les modules occultés dans un ensemble de modules.

1.3.3. Le module photovoltaïque :

Le module est un ensemble de cellules assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. En effet, une cellule élémentaire ne génère pas suffisamment de tension (entre 0.5 et 1.5V selon les technologies), et de courant. Il faut donc toujours associer plusieurs cellules en série pour générer une tension utilisable et en parallèle pour obtenir un courant important.

De plus, cet assemblage doit être protégé pour rendre le module apte à un usage en extérieur. Ces cellules sont protégées par une enveloppe supérieure et inférieure. Il existe deux types d'encapsulation :

- Verre / verre (ou bi-verre)
- Verre / matériau composite (tedlar / milar)

L'ensemble cellule+encapsulant forme un laminat. Le rajout d'un cadre en aluminium procure au laminat sa rigidité et permet aussi sa fixation sans abîmer les cellules photovoltaïques.

On réalise ainsi des modules de diverses puissances selon la surface mise en œuvre (un à plusieurs dizaines de Wc par module), capables de générer du courant continu en basse tension lorsqu'ils sont exposés à la lumière.

1.3.3.1. Caractéristique $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un module solaire :

Un module solaire est un ensemble de cellules montées en parallèle ou en série pour générer la tension et le courant souhaités. Un module solaire est constitué de NP branches parallèles chacune ayant NS cellules montées en série.

Pour éviter toute confusion entre les paramètres mathématiques de la cellule et du module solaire la notation suivante est utilisée : l'exposant ' m ' réfère aux paramètres du module. Ainsi la tension globale de module est notée par V^m et le courant global est I^m . Le modèle mathématique du module est obtenu en remplaçant chaque cellule par son circuit équivalent privé de la résistance parallèle R_p car son influence sur les caractéristiques de la cellule est très minime. La formule générale du courant d'un module solaire constitué de NP branches, chacune ayant N_s cellules en série, en fonction des paramètres caractéristiques du module est donnée par :

$$I^m = Np \times I_{Sc}^m \left[1 - \exp\left(\frac{V^m - NsV_{oc}^c + R_s^c I^m Ns / Np}{N_s V_t^c} \right) \right] \quad (1.10)$$

Avec :

- Le courant de court-circuit du module : $I_{m_{sc}} = N_p I_{sc}^c$
- La tension de circuit ouvert du module : $V_{oc}^m = N_s V_{oc}^c$
- La résistance série équivalente : $R_s^m = R_s^c N_s$
- La tension thermique de la cellule : $V_t^c = \frac{\alpha K T^c}{e}$

La puissance crête (Wc) d'un module photovoltaïque est la puissance électrique maximale qu'il peut fournir, dans les conditions de mesures normalisées suivantes :

- Lorsqu'il est connecté à une charge optimale.
- Lorsqu'il reçoit du soleil une puissance de 1000 W/m^2 . Ceci correspond approximativement à une exposition perpendiculaire aux rayons du soleil le midi par temps clair.
- Lorsque la température à la jonction des cellules est de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Il s'agit donc de conditions idéales conventionnelles qui sont très rarement remplies dans la pratique.

A partir des courbes $I = f(V)$ et $P = f(V)$ pour différents ensoleillements à température constante (figure 1.11), et pour différentes températures à ensoleillement constant (figure 1.12), on constate bien que les caractéristiques du module solaire dépendent fortement de l'ensoleillement et de la température.

Pour des ensoleillements variables et température constante le courant ISC est très influencé par le changement de l'ensoleillement alors que la tension VOC reste sensiblement constante. Au contraire, la tension VOC est influencée par les changements de la température alors que le courant ISC reste confiné dans un intervalle étroit.

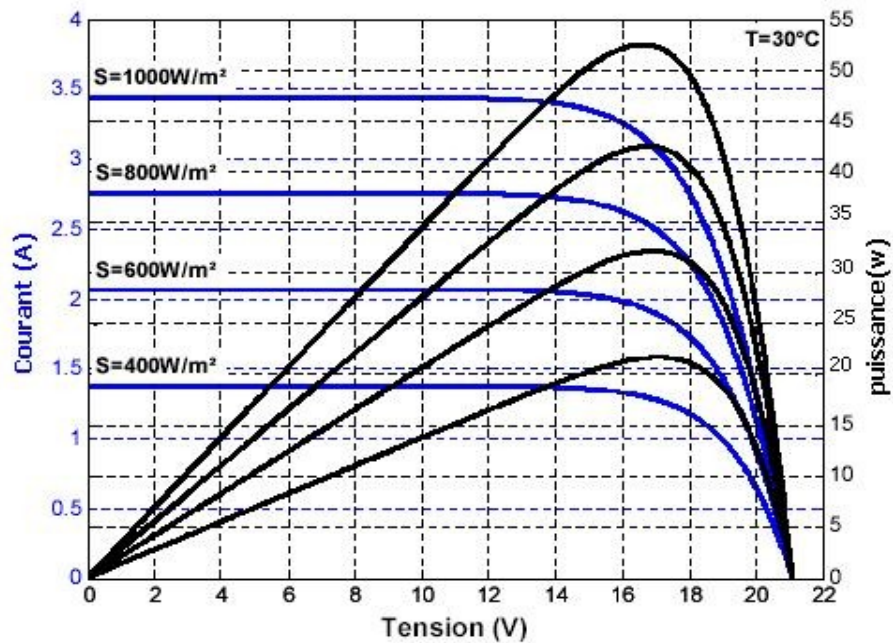


Figure 1.11. Caractéristique $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un module solaire constitué de 36 cellules en série pour différents ensoleillements S avec $T = 30^{\circ}\text{C}$.

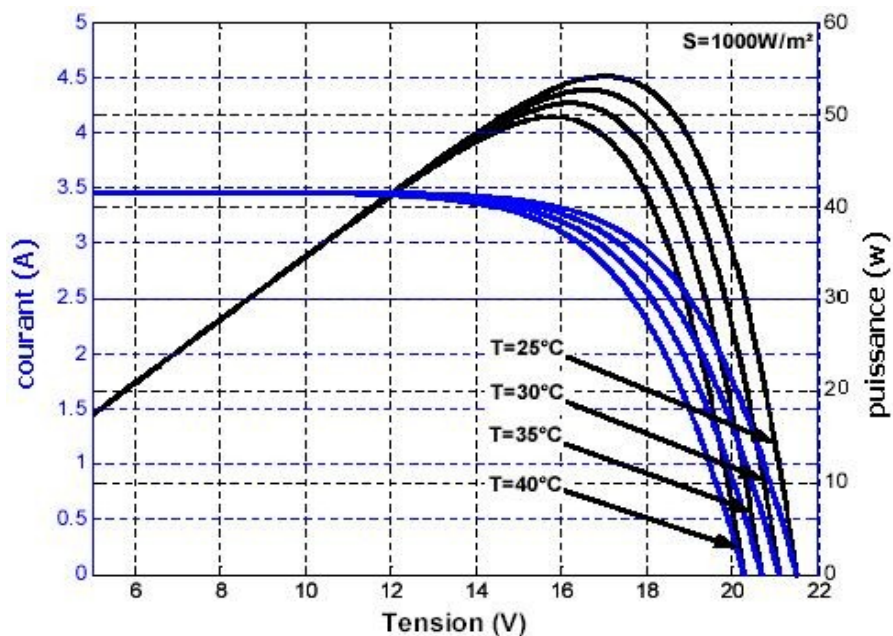


Figure 1.12. Caractéristique $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un module solaire constitué de 36 cellules en série pour différentes températures T avec $S = 1000\text{W/m}^2$.

A partir des caractéristiques $I = f(V)$ on obtient les caractéristiques en puissance du module solaire $P = f(V)$ pour différentes valeurs d'ensoleillement S et de températures T (Figure 1.11 et 1.12).

La figure 1.11 montre que la puissance de sortie ne dépend pas seulement de l'ensoleillement mais aussi de la température de la cellule, cela est expliqué par l'augmentation du courant de saturation de la diode D , qui conduit à un grand taux des recombinaisons dans le semi-conducteur.

Les figures 1.11 et 1.12 montrent aussi que la puissance de sortie ne dépend pas seulement de l'ensoleillement et de la température mais aussi de la tension de fonctionnement V du module. La puissance de sortie est maximale pour une certaine tension V . C'est en ce point de fonctionnement qu'on doit faire fonctionner le module pour qu'il travaille avec un rendement maximal. Ce point est appelé *MPP* (Maximum Power Point).

1.4. Le champ photovoltaïque :

Les modules PV sont les éléments de base de tout système photovoltaïque. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant. Cet ensemble est appelé le champ de modules PV (figure 1.13). L'énergie délivrée par le champ peut être utilisée pour charger des batteries qui fourniront l'électricité au moment voulu. Elle peut aussi être utilisée en reliant directement les modules à la charge sans les batteries, comme par exemple pour une pompe solaire; l'eau est dans ce cas stockée.

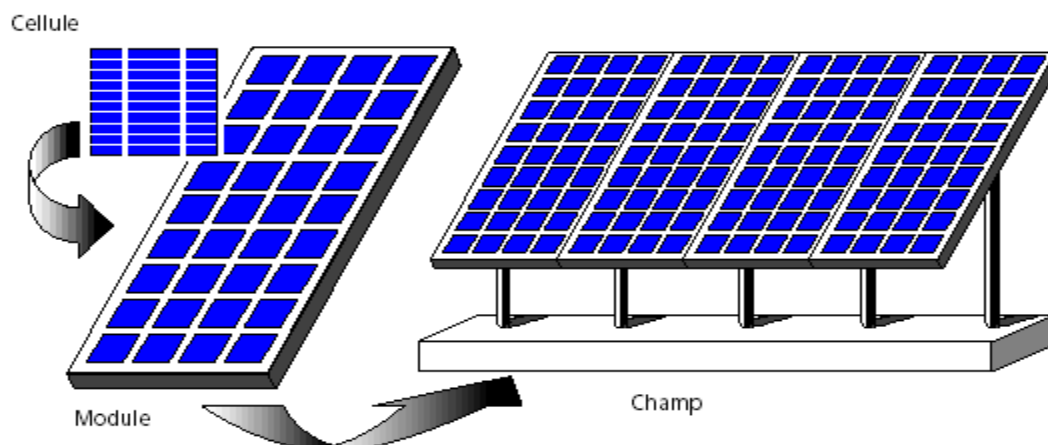


Figure 1.13. Composantes d'un champ de modules photovoltaïques

Le passage d'un module à un champ se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules afin de limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.

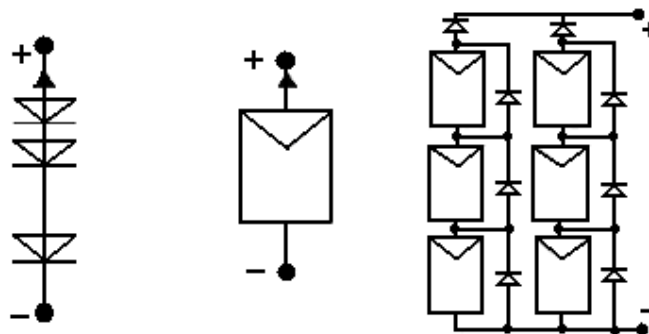


Figure 1.14. Cellules, module et champ photovoltaïques

1.5. Composants d'un système de pompage photovoltaïque :

Le système de pompage photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'il fonctionne avec ou sans batterie. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules, le système de pompage sans batterie, plus communément appelée « pompage au fil du soleil », utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation.

Le système de pompage avec batterie permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe. Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin, ou permettre un pompage régulier durant toute la journée (figure 1.15). Dans ce dernier cas, l'utilisation d'un réservoir de stockage sera nécessaire afin de pouvoir fournir l'eau à la demande.

Toutefois, l'utilisation de batteries comporte davantage de composants qui influent sur la fiabilité et le coût global du système. Les batteries sont fragiles et sont souvent les premiers éléments qui auront besoin d'être changés. Elles nécessitent en outre un entretien constant et un contrôle rigoureux de leur charge et décharge. Les contrôleurs utilisés pour régulariser la charge et la décharge des batteries vieillissent rapidement et peuvent s'avérer non fiables. Les batteries introduisent également un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30 % de la production d'énergie.

Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système avec batterie. Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Le réservoir peut souvent être construit localement et la capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours. Ce réservoir ne requiert pas un entretien complexe et est facile à réparer localement.

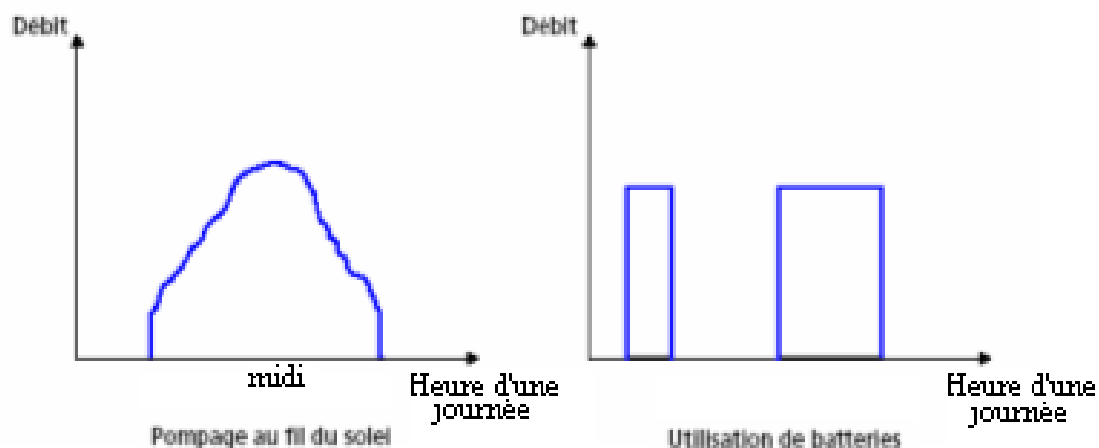


Figure 1.15. Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil et avec batterie

Compte tenu du coût additionnel du système avec batterie, des problèmes de maintenance de la batterie et de l'obligation de la remplacer après 3 à 5 ans d'usage, la solution au fil du soleil est présentement préférée.

Néanmoins, celle-ci présente certains inconvénients qu'il ne faut pas négliger lors de son choix :

- Il est impossible de pomper au-dessous d'un certain niveau d'éclairement, la pompe ne pouvant être amorcée sans une certaine puissance fournie. Il y a donc perte d'énergie au début et à la fin de la journée.
- Parce que le rendement des pompes diminue en dehors de leur puissance nominale de fonctionnement, le système nécessitera l'utilisation d'un adaptateur de charge. Ceci est particulièrement nécessaire pour les pompes volumétriques.
- Le débit de la pompe ne sera pas constant comme il est représenté sur la figure 1.15, et le rabattement du puits ou du forage peut être trop élevé durant certaines périodes de la journée.

1.5.1. Les types de pompes :

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. Outre ces deux classifications que nous décrirons plus loin, on distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée: la pompe à aspiration et la pompe à refoulement.

La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9,8 mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci. Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau.

Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface ; la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur [25].

1.5.1.1. La pompe volumétrique :

La pompe volumétrique transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va-et-vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement.

Les pompes volumétriques incluent les pompes à vis, les pompes à palettes, les pompes à piston et les pompes à diaphragme. Les deux derniers types sont utilisés dans les puits ou les forages profonds (plus de 100 mètres). L'entraînement est habituellement assuré par un arbre de transmission très long, à partir d'un moteur électrique monté en surface.

Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et il est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Le couple de démarrage est donc pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la HMT. La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau. On les utilise parfois comme pompes de surface lorsque le couple est lent et irrégulier et que le débit demandé est faible, par exemple pour les pompes à main et les pompes éoliennes multipales [25].

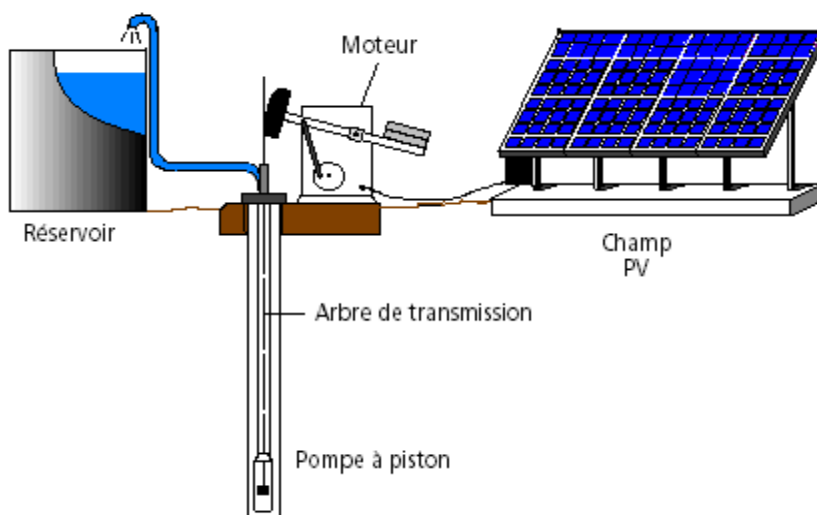


Figure 1.16. Pompe à piston (*Jack pump*) : pour de grandes profondeurs et de petits débits d'eau

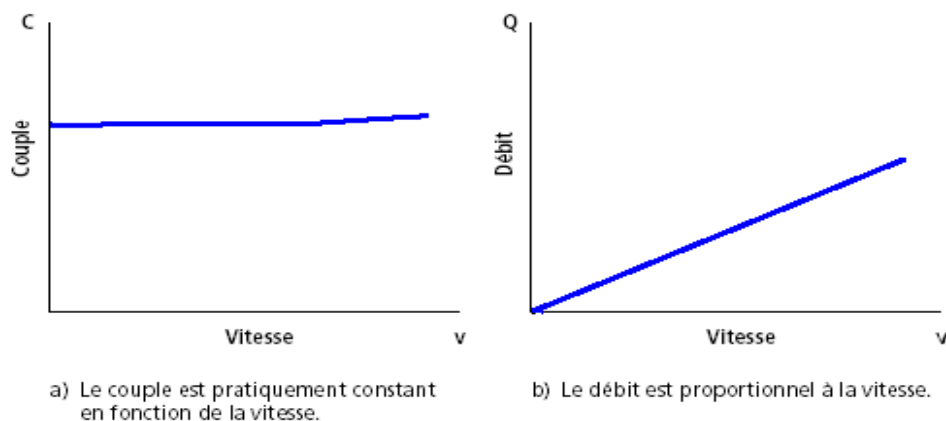


Figure 1.17. Caractéristiques d'une pompe volumétrique

1.5.1.2. La pompe centrifuge :

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe et elle est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Afin d'augmenter la pression, donc la hauteur de refoulement, plusieurs étages d'aubages peuvent être juxtaposés sur le même arbre de transmission. Chaque étage fait passer l'eau à l'étage suivant en relevant la pression jusqu'à l'étage final, délivrant un volume d'eau à pression élevée (voir figure 1.18). Ces pompes incluent les pompes submersibles avec moteur de surface ou submergé, les pompes flottantes et les pompes rotatives à aspiration.

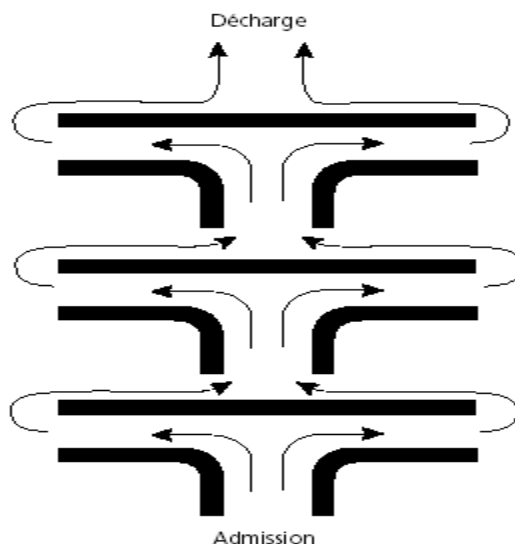


Figure 1.18. Cheminement de l'écoulement dans une pompe centrifuge à étages multiples

La pompe centrifuge est conçue pour une HMT relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être

très rapide pour assurer un bon débit. La puissance consommée, proportionnelle à $Q \cdot HMT$, variera donc dans le rapport du cube de la vitesse. On utilisera habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres). Parce que le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une HMT donnée pour obtenir un débit de départ non nul.

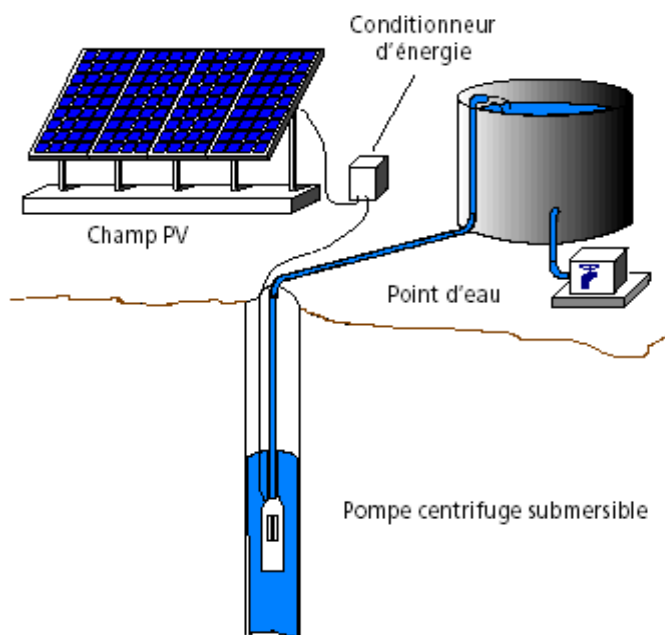


Figure 1.19. Pompe submersible centrifuge à étages multiples

Notes : Cette pompe est utilisée plus couramment pour l'exhaure de l'eau domestique. Le moteur et la pompe s'installent dans le puits ou le forage, à l'abri de coups potentiels.

Le rendement de la pompe centrifuge est fonction du débit ; elle fonctionne de façon plus efficace à une certaine HMT et à une vitesse de rotation prédéterminée. Il est donc important de bien concevoir le dimensionnement de la pompe selon les conditions du terrain.

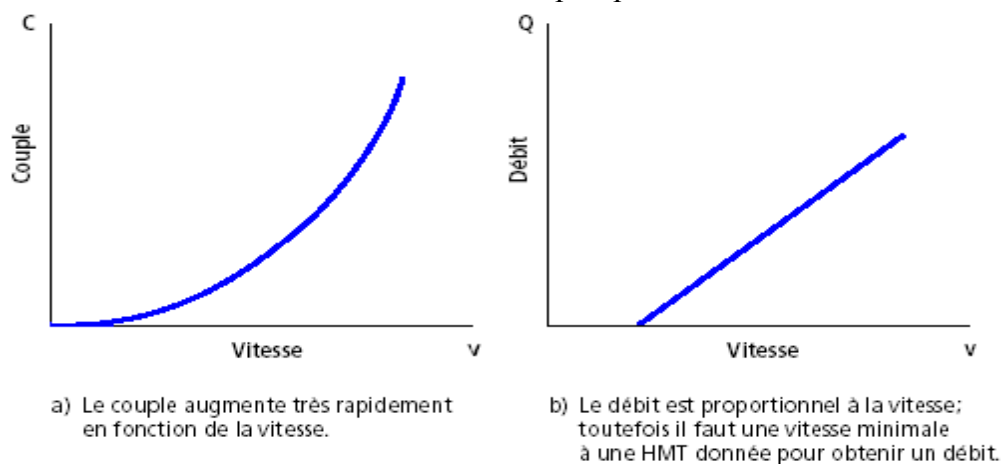


Figure 1.20. Caractéristiques d'une pompe centrifuge

Les pompes centrifuges sont très utilisées pour les applications avec énergie photovoltaïque parce que le moteur peut fournir une vitesse de rotation rapide à peu près constante. De plus l'exhaure de l'eau domestique se fait traditionnellement à partir de puits de profondeurs de 10 à 50 mètres qui conviennent bien aux pompes centrifuges à étages multiples. Ces pompes peuvent également s'adapter à de petits forages, ce qui permet de capter les nappes phréatiques profondes qui ont souvent un niveau d'eau dynamique entre 30 et 100 mètres.

Caractéristiques de la pompe centrifuge immergée :

- Son diamètre est soit de 4" (95 mm), soit de 6" (142 mm). Le corps de pompe est en acier inoxydable, les roues et les diffuseurs étant soit en acier inoxydable, soit en matériau synthétique. Ces matériaux présentent une très bonne résistance à l'abrasion. Le corps d'aspiration est protégé par une crépine contre les grosses impuretés (> à 3mm). Un clapet anti-retour est intégré à la tête de pompe, qui est taraudée pour le raccordement au tuyau de refoulement. La lubrification est assurée par l'eau pompée.
- Le nombre d'étages est lié à la hauteur manométrique totale de refoulement.
- Le type d'aubage de chaque étage est lié à la puissance hydraulique à fournir pour la HMT nominale.
- Les rendements hydrauliques des pompes solaires sont élevés (utilisation de technologies de pointe). Ils sont de l'ordre de 55% à 60 % au point de fonctionnement nominal.
- La durée de vie peut être estimée entre 5 et 7 ans (elle est fortement liée à la qualité de l'eau).
- L'entretien courant consiste au nettoyage des étages (boue, sable, déchets si la pompe est installée dans un puits). La fréquence de celui-ci dépend de la qualité de l'eau pompée.

Note : Les pompes centrifuges solaires sont aussi utilisées pour l'irrigation de petits maraîchages lorsque la HMT est faible, c'est-à-dire à partir d'un plan d'eau de surface, comme par exemple une rivière.

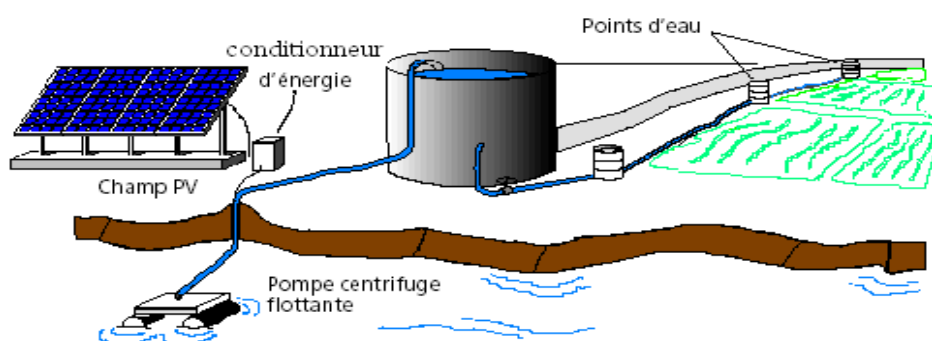


Figure 1.21. Pompe centrifuge flottante

1.5.2. Les types de moteurs :

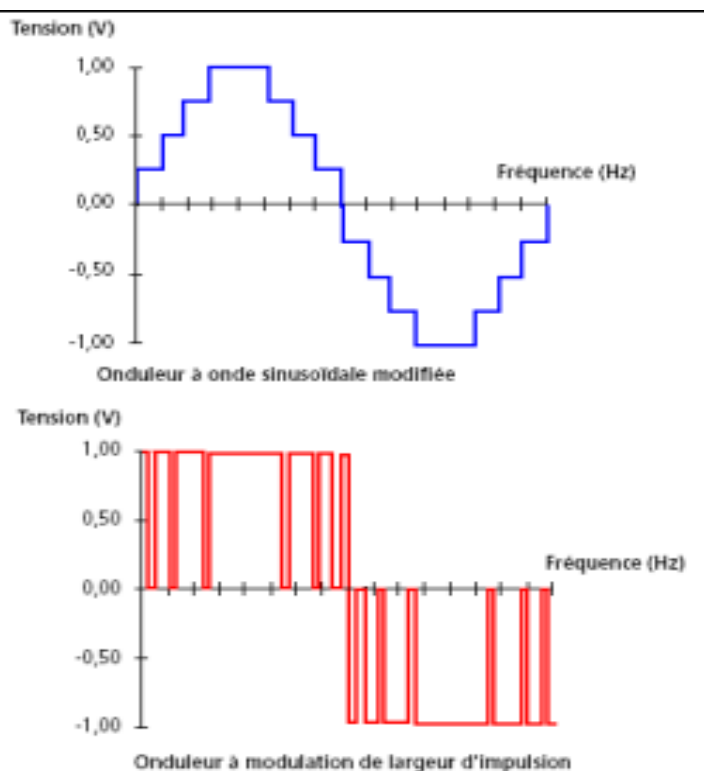
Le moteur d'un groupe motopompe convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans ce dernier cas, un convertisseur électronique ou un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur photovoltaïque en courant alternatif.

1.5.3. L'onduleur :

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Un onduleur est habituellement conçu pour fonctionner sur une plage assez réduite. Il est très efficace pour des caractéristiques d'entrée et de sortie fixe. Son coût assez élevé et la nature variable de l'ensoleillement et du couple résistant des pompes en général ont longtemps exclu l'emploi des moteurs à courant alternatif pour le pompage solaire.

Les onduleurs de pompage sont en général à fréquence (f) variable afin de permettre une variation de la vitesse de rotation de la pompe. Dans ce cas, le rapport de la tension alternative (U) sur la fréquence (U/f) est constant. La fréquence du courant alternatif est directement proportionnelle à l'intensité de l'ensoleillement. La tension nominale du courant alternatif peut être standard (220 ou 380 V) ou adaptée à un moteur spécifique d'une application photovoltaïque (80 V).

On distingue plusieurs types d'onduleurs suivant la qualité du signal de sortie comme illustré sur la figure 1.22 :



- Onduleur à onde sinusoïdale modifiée, en marche d'escalier, générateur d'une onde proche de l'onde sinusoïdale.
- Onduleur à modulation de largeur d'impulsion (PWM, *pulse-width modulation*).

L'onduleur à onde sinusoïdale modifiée peut supporter de fortes surcharges et sa distorsion harmonique est relativement faible, de sorte qu'il n'introduit que peu de pertes par effet Joule susceptibles de causer l'échauffement des moteurs. Il est souvent employé avec de petits systèmes de pompage.

L'onduleur à modification de largeur d'impulsion utilise des commutateurs électroniques rapides pour varier la largeur d'impulsion. En utilisant un filtre à la sortie, l'onde sinusoïdale peut être reconstruite. Ces onduleurs relativement peu coûteux sont très efficaces, fonctionnant à près de 90%-95% de rendement. Ils sont employés par la plupart des systèmes de pompage à courant alternatif.

1.6. Conclusion :

A notre connaissance le pompage solaire constitue actuellement une alternative incontournable au détriment des anciennes méthodes classiques surtout dans les zones éloignées où l'électrification n'est pas une chose aisée. Dans ce contexte nous avons donné dans ce chapitre une vue générale sur les différents éléments constitutifs de ce système.

Chapitre 2:

Mesure et capteurs de débit

2.1. Introduction :

Un fluide peut être considéré comme étant une substance 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.

La mesure du débit revêt d'une importance fondamentale dans les réseaux de transport des fluides et dans toutes installation industrielle où doit être contrôlée la quantité de fluide intervenant dans un processus : réacteur chimique, centrale de production d'énergie (exemple centrale de pompage photovoltaïque) moteur a combustion interne...

Dans ce chapitre nous allons donner quelques notions de base sur les écoulements des fluides. Ensuite nous exposerons les divers procédés de mesure de débits.

2.2. Capteur :

2.2.1. Définition :

C'est un dispositif qui transforme une grandeur physique en une grandeur exploitable, souvent de nature électrique (figure 2.1). Le choix de l'énergie électrique vient du fait qu'un signal électrique se prête facilement à de nombreuses transformations difficiles à réaliser avec d'autres types de signaux [3].

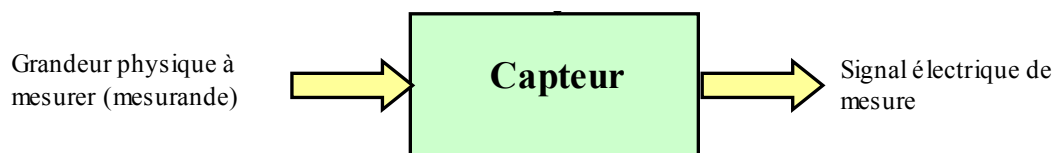


Figure 2.1. Schéma synoptique d'un capteur

Mesurande : C'est la grandeur physique que l'on souhaite connaître.

2.2.2. Chaîne de mesure :

Pour obtenir une image d'une grandeur physique, on fait appel à une chaîne de mesure qui peut faire intervenir plusieurs phénomènes différents.

De manière classique la sortie d'une chaîne de mesure est du type électrique. Si la chaîne de mesure fait intervenir plusieurs transducteurs, on appelle corps d'épreuve celui en contact direct avec le mesurande. Le dernier transducteur est associé à un conditionneur qui fournit la grandeur électrique de sortie de manière exploitable. Le choix de ce conditionneur est une étape importante dans le cadre de la chaîne de mesure car, associé au capteur, il détermine la nature finale du signal électrique et va influencer les performances de la mesure.

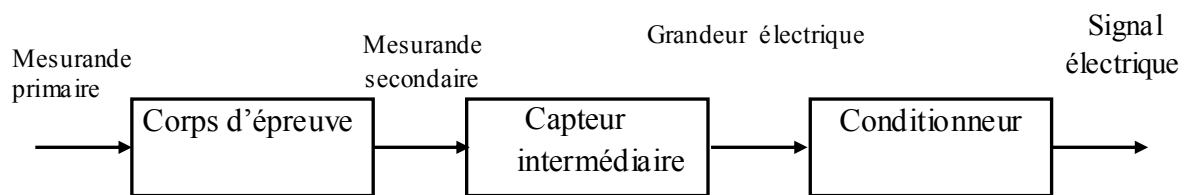


Figure 2.2. Constitution d'une chaîne de mesure classique

2.2.3. Types de grandeur physique :

On peut classer les grandeurs physiques en 6 familles, chaque capteur s'associant à l'une de ces 6 familles :

- Mécanique : déplacement, force, masse, débit etc...
- Thermique : température, capacité thermique, flux thermique etc...
- Electrique : courant, tension, charge, impédance, diélectrique etc...
- Magnétique : champ magnétique, perméabilité, moment magnétique etc...
- Radiatif : lumière visible, rayons X, micro-ondes etc...
- (Bio)Chimique : humidité, gaz, eau, sucre, hormone etc...

2.2.4. Transmission du signal de mesure :

Selon le type de capteur, le signal électrique de mesure peut être de différentes natures : analogique, numérique ou logique.

- **Signal de mesure analogique** : il est lié au mesurande par une loi continue, parfois linéaire, qui caractérise l'évolution des phénomènes physiques mesurés. Il peut être de toute nature :
 - courant 0 – 20 mA, 4 – 20 mA
 - tension 0 – 10 V, 0 – 5 V
- **Signal de mesure numérique** : il se présente sous la forme d'impulsions électriques générées simultanément (mode parallèle, sur plusieurs fils) ou successivement (mode

série, sur un seul fil). Cette transmission est compatible avec les systèmes informatiques de traitement.

- **Signal de mesure logique** : il ne compte que deux valeurs possibles, c'est un signal tout ou rien.

2.2.5. Performances d'un capteur; définition métrologique :

De manière à classer les capteurs en fonction de leurs performances, on est amené à définir des paramètres qui permettent de les sélectionner en fonction de l'application.

- **Les erreurs** : Le capteur et toute la chaîne de traitement de la mesure introduisent des erreurs : bruit, décalage, référence, linéarité...

L'erreur globale de mesure ne peut être qu'estimée. Une conception rigoureuse de la chaîne de mesure permet de réduire les erreurs et donc l'incertitude sur le résultat.

On parle de : fidélité, justesse, précision, incertitude, linéarité.

- **Étalonnage** : L'étalonnage permet d'ajuster et de déterminer, sous forme graphique ou algébrique, la relation entre le mesurande et la grandeur électrique de sortie. Très souvent l'étalonnage n'est valable que pour une seule situation d'utilisation du capteur.
- **Limites d'utilisation** : Les contraintes mécaniques, thermiques ou électriques auxquelles un capteur est soumis entraînent, lorsque leurs niveaux dépassent des seuils définis, une modification des caractéristiques du capteur. Au dessus d'un certain seuil l'étalonnage n'est plus valable, au dessus d'un autre plus grand le capteur risque d'être détruit.
- **Sensibilité** : Plus un capteur est sensible plus la mesure pourra être précise. C'est une caractéristique importante pour l'exploitation et l'interprétation des mesures.
- **Rapidité - Temps de réponse** La rapidité est la spécification d'un capteur qui permet d'apprécier de quelle façon la grandeur de sortie suit dans le temps les variations du mesurande.
- **Finesse** : C'est une spécification qui permet d'estimer l'influence de la présence du capteur et de ses liaisons sur la valeur du mesurande. La finesse doit être la plus grande possible.

2.3. Généralités sur l'écoulement :

2.3.1. Débits :

Le débit est le quotient de la quantité de fluide qui traverse une section droite de la conduite par la durée de cet écoulement.

2.3.1.1. Débit massique :

Si Δm est la masse de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps Δt , par définition le débit massique est :

$$q_m = \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Unité : $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

2.3.1.2. Débit volumique :

Si ΔV est le volume de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps Δt , par définition le débit volumique est :

$$q_v = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.2)$$

Unité : $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

2.3.1.3. Relation entre q_m et q_v :

La masse volumique est donnée par la relation : $\rho = \frac{\Delta m}{\Delta v}$ d'où :

$$q_m = \rho \times q_v \quad (2.3)$$

Pour l'eau douce, la masse volumique $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

2.3.2. Équation de conservation de la masse ou équation de continuité :

2.3.2.1. Définition :

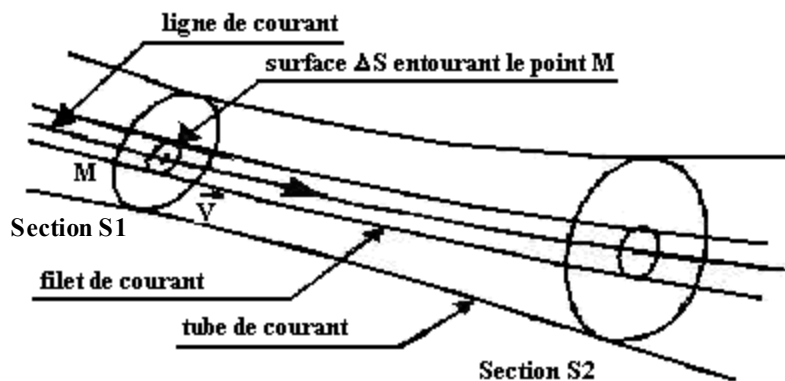


Figure 2.3. Ligne de courant et tube de courant

- **Ligne de courant** : En régime stationnaire, on appelle ligne de courant la courbe suivant laquelle se déplace un élément de fluide. Une ligne de courant est tangente en chacun de ses points au vecteur vitesse du fluide en ce point.
- **Tube de courant** : Ensemble de lignes de courantes s'appuyant sur une courbe fermée.
- **Filet de courant** : Tube de courant s'appuyant sur un petit élément de surface ΔS .

La section de base ΔS du tube ainsi définie est suffisamment petite pour que la vitesse du fluide soit la même en tous ses points (répartition uniforme) [1].

2.3.2.2. Conservation du débit :

Considérons un tube de courant entre deux sections S_1 et S_2 . Pendant l'intervalle de temps Δt , infiniment petit, la masse Δm_1 de fluide ayant traversé la section S_1 est la même que la masse Δm_2 ayant traversé la section S_2 .

En régime stationnaire, le débit massique est le même à travers toutes les sections droites d'un même tube de courant.

$$q_{m1} = q_{m2}$$

Dans le cas d'un écoulement isovolume:

En régime stationnaire, le débit volumique est le même à travers toutes les sections droites d'un même tube de courant

$$q_{V1} = q_{V2}$$

2.3.2.3. Expression du débit en fonction de la vitesse v :

Le débit volumique est aussi la quantité de liquide occupant un volume cylindrique de base S et de longueur correspondant à la longueur du trajet effectué pendant l'unité de temps, par une particule de fluide traversant S .

Il en résulte la relation importante :

$$q_V = v \times S \quad (2.4)$$

2.3.2.4. Vitesse moyenne :

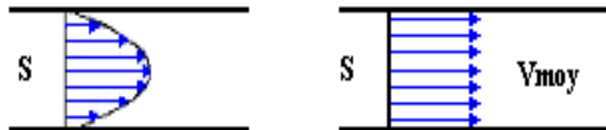


Figure 2.4. Les différents profils de vitesse

En général la vitesse v n'est pas constante sur la section S d'un tube de courant ; on dit qu'il existe un profil de vitesse (à cause des forces de frottement) (Figure 2.4). Le débit massique ou le débit volumique s'obtient en intégrant la relation précédente :

Dans une section droite S de la canalisation, on appelle *vitesse moyenne* v_m la vitesse telle que

$$v_{moy} = \frac{q_V}{S} \quad (2.5)$$

La vitesse moyenne v_{moy} apparaît comme la vitesse uniforme à travers la section S qui assurerait le même débit que la répartition réelle des vitesses.

Si l'écoulement est isovolume, cette vitesse moyenne est inversement proportionnelle à l'aire de la section droite.

$$q_V = v_{1moy} \times S1 = v_{2moy} \times S2 = cte \quad (2.6)$$

C'est l'équation de continuité.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{S_2}{S_1}$$

La vitesse moyenne est d'autant plus grande que la section est faible.

2.3.3. Viscosité :

La viscosité η est due aux frottements ; ces derniers s'opposent au glissement des couches fluides les unes sur les autres. L'unité de viscosité dynamique est le Pascal seconde (Pa s) ou Poiseuille (Pl). La viscosité des liquides diminue si la température augmente.

2.3.4. Pertes de charge :

Un fluide réel, en mouvement, subit des pertes d'énergie dues aux frottements sur les parois de la canalisation (pertes de charge *systématiques*) ou sur les "accidents" de parcours (pertes de charge *singulières*).

Et si dans une canalisation il y a une perte de charge (perte d'énergie), il en résulte une diminution de la vitesse donc du débit.

Pour éviter cela on doit utiliser un tube dans les parois interne sont moins rugueuses.

2.3.5. Facteurs influant sur l'écoulement des fluides dans les conduites :

Les principaux facteurs influant sur l'écoulement des fluides dans une conduite sont les suivants :

- Vitesse du fluide
- Frottement du fluide en contact avec la conduite
- Viscosité du fluide
- Masse volumique du fluide

2.3.5.1. Vitesse du fluide :

Elle dépend de la charge qui force le fluide à traverser la conduite. Plus la charge est élevée, plus le débit de fluide est important (les autres facteurs restants constants) et, par conséquent, plus le volume d'écoulement est important.

2.3.5.2. Frottement de la conduite :

Il réduit le débit du fluide dans les tuyaux et la vitesse du fluide est plus lente près des parois de la conduite qu'au centre. Il est donc considéré comme un facteur négatif. Plus la conduite est lisse, propre et de grand diamètre, et moins le frottement de la conduite a d'effet sur le débit général du fluide.

2.3.5.3. Viscosité dynamique du fluide :

Elle réduit, tout comme le frottement, le débit du fluide près des parois de la conduite. Elle augmente ou diminue en fonction des variations de température.

2.3.5.4. Masse volumique du fluide :

Elle influe également sur le débit, car un fluide plus dense exige une charge supérieure pour maintenir le débit souhaité.

2.3.6. Régimes d'écoulement dans une canalisation :

Les expériences réalisées par *Reynolds* (1883) lors de l'écoulement d'un liquide dans une conduite cylindrique rectiligne dans laquelle arrive également un filet de liquide coloré, ont montré l'existence de deux régimes d'écoulement : laminaire et turbulent.

En utilisant des fluides divers (viscosité différente), en faisant varier le débit et le diamètre de la canalisation, Reynolds a montré que le paramètre qui permettait de déterminer si l'écoulement est laminaire ou turbulent est un nombre sans dimension appelé *nombre de Reynolds* et donné par :

$$R_e = \frac{\rho v D}{\eta} \quad \text{ou} \quad R_e = \frac{v D}{\nu} \quad \text{avec :}$$

ρ : Masse volumique du fluide (kgm^{-3});

v : Vitesse moyenne (ms^{-1}),

D : Diamètre de la conduite (m)

$\nu = \frac{\eta}{\rho}$: Viscosité cinématique

L'expérience montre que :

- Si $Re < 2000$ Le régime est laminaire
- Si $2000 < Re < 3000$ Le régime est intermédiaire
- Si $Re > 3000$ Le régime est turbulent

Ces valeurs doivent être considérées comme des ordres de grandeur, le passage d'un type d'écoulement à un autre se fait progressivement.

2.3.6.1. Écoulement laminaire :

Les lignes de courant demeurent parallèles entre elles, les couches de fluide glissant les unes sur les autres sans se mélanger. Les pertes de charge sont alors proportionnelles à la vitesse, dans la figure 2.5 est représentée la répartition des vitesses d'un fluide dans une conduite circulaire.

2.3.6.2. Écoulement turbulent :

Les lignes de courant ne gardent plus leur individualité, mais s'enchevêtrent. Les pertes de charge sont proportionnelles au carré de la vitesse. Dans la figure 2.5 est représentée la répartition des vitesses d'un fluide dans une conduite circulaire en régime turbulent.

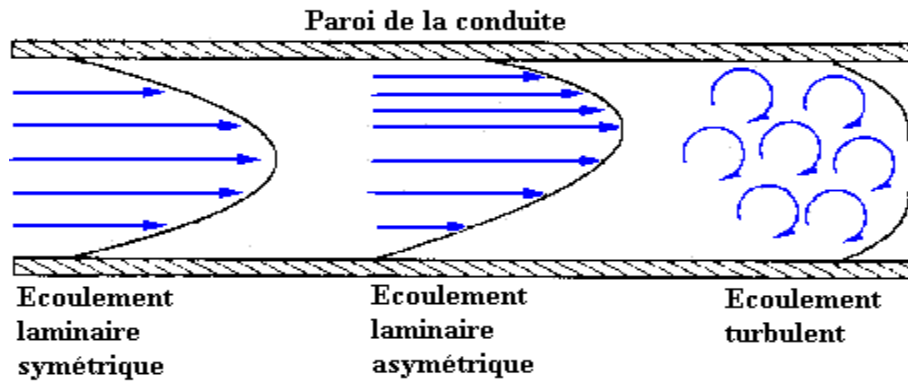


Figure2.5. Répartition des vitesses d'un fluide pour différents régimes d'écoulement

2.3.7. Mesure de débit dans les conduites :

Les techniques utilisées dans la mesure de débit sont principalement :

- Les méthodes directes : le débit est calculé directement et donne par vol/s ou masse/s.
- Les méthodes indirectes : le débit est calculé à partir de la vitesse d'écoulement du milieu dont on veut calculer le débit qui sera le produit de la vitesse mesurée et la section de la conduite (liquide, gaz solide, vapeur...) ; et ceci via la mesure d'une fréquence, différence de pression, temps de propagation...

Les débitmètres peuvent être groupés en quatre types génériques: compteurs volumétriques, débitmètres manométriques, débitmètres tachymétriques et débitmètres massiques. Les compteurs volumétriques et les débitmètres massiques mesurent directement le débit en vol/s et en masse/s respectivement.

Les appareils manométriques engendrent et mesurent une pression différentielle qui sera convertie en débit à l'aide de coefficients de conversion connus. Les débitmètres tachymétriques mesurent le débit volumique ou massique en mesurant la vitesse d'écoulement du fluide et ceci en mesurant un temps, une fréquence ou une tension induite ; ensuite, le débit est calculé à partir du produit (*vitesse* × *section*) de la conduite.

Pour savoir plus sur les techniques de mesure du débit, consulter l'annexe 1

2.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné les équations de base de l'écoulement d'un fluide, bref aperçu sur le principe de fonctionnement de quelques débitmètres, tandis que le débitmètre électromagnétique est exposé en détail dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 :

Débitmètre électromagnétique

3.1. Introduction :

Notre étude qui porte sur un débitmètre électromagnétique est applicable pour la mesure du débit de liquide conducteur. Dans ce chapitre on donnera une vue générale sur ce système de mesure.

Faraday tenta en 1832, de mesurer la vitesse du courant de la Tamise par induction magnétique. Il disposa sur chaque rive deux électrodes qui devraient capter la tension induite par le mouvement de l'eau dans le champ magnétique terrestre. Sa tentative échoua à cause des artefacts causés par les potentiels électrochimiques sur les électrodes et la nature conductrice de la rivière. Ce fut, cependant la première tentative de mesure du débit utilisant les techniques électromagnétiques.

Aujourd'hui, les débitmètres électromagnétiques fonctionnent sur le principe de *Faraday* :

Si un liquide conducteur, animé d'une vitesse v à l'intérieur d'un tube (de diamètre électriquement isolé), traverse perpendiculairement un champ magnétique B , une tension e est induite dans ce liquide. Cette tension est captée par deux électrodes qui mesurent :

$$V=B.l.v$$

Un convertisseur pourra recueillir la tension aux électrodes et calculer le débit- volume en multipliant la vitesse d'écoulement par la section du tube de mesure.

Les débitmètres électromagnétiques sont utilisés pour la mesure de débit de liquide conducteurs et de métaux liquides. Ils ne peuvent pas être utilisés pour des mesures de débit de gaz.

La théorie des débitmètres électromagnétiques commença avec les travaux de *Thurlemann*, qui détermina la réponse d'un débitmètre avec un champ magnétique uniforme pour des profils de vitesse axisymétriques. *Schercliff* introduisit, quelques années plus tard, le concept de fonction de valence dépend à la fois du champ magnétique et de la configuration des électrodes [9].

Les débitmètres électromagnétiques sont utilisés dans l'industrie depuis le début des années 50.

Les bonnes raisons pour utiliser le débitmètre électromagnétique sont les suivantes :

- la mesure ne dépend pas des caractéristiques physiques du liquide (densité, viscosité, conductivité à condition que celle-ci soit supérieure à une valeur minimale de l'ordre de quelques $\mu\text{s cm}^{-1}$).
- la mesure est pratiquement indépendante de la répartition des vitesses dans la canalisation, ce qui permet de placer en cas de besoin le débitmètre au voisinage d'un obstacle (coude, vanne...).
- il n'y a pas de perte de charge puisqu'il n'y a aucune obstruction de la conduite de mesure.
- absence de pièce mobiles, donc d'usure.

3.2. Calcul de la F.E.M. induite dans un liquide en mouvement :

Considérons un tube rectiligne, de section circulaire et rayon interne a . Le liquide étant en mouvement nous supposons que la distribution des vitesses ne dépend que des coordonnées radiales r (figure 3.1).

L'induction magnétique continue est uniforme sur toute la section longitudinale du tube est supposée perpendiculaire à la vitesse d'écoulement (figure 3.2).

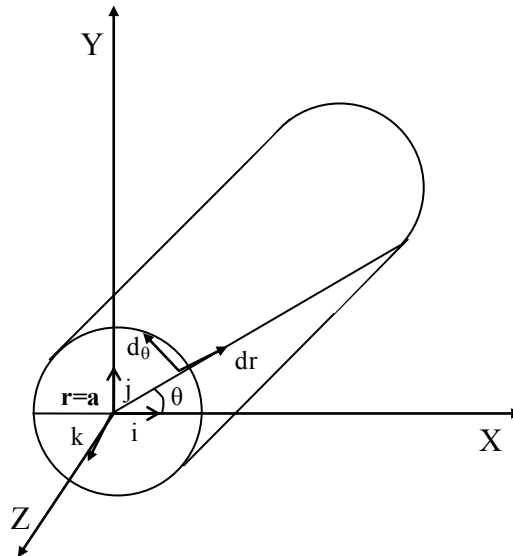


Figure 3.1. Tube cylindrique d'un débitmètre électromagnétique

Le déplacement du liquide dans cette induction magnétique induit des courants de densité J . Une différence de potentiel fonction de la vitesse apparaît en chaque couple de points du liquide. Nous supposons que le liquide non magnétique est conducteur et que sa densité de charge est nulle. Nous admettrons également qu'il se déplace lentement dans une induction magnétique suffisamment faible pour les forces agissant sur les courants induits ne perturbent pas l'écoulement.

3.2.1. Les équations fondamentales de l'électromagnétisme :

Equation de Maxwell Faraday

$$\text{rot} \vec{E} = \text{rot} \vec{E}_m - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.1)$$

Equation de Maxwell Ampère

$$\text{rot} \vec{B} = \mu \vec{j} \quad (3.2)$$

$$\text{div} \vec{E} = 0 \quad (3.3)$$

Equation de conservation du flux

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (3.4)$$

Equation de Maxwell Gauss

$$\text{div} \vec{J} = 0 \quad (3.5)$$

Loi d'ohm

$$\vec{E} = \vec{j} \cdot \frac{1}{\sigma} \quad (3.6)$$

Loi de Faraday

$$\vec{E}_m = \vec{V} \wedge \vec{B} \quad (3.7)$$

L'étude du phénomène d'induction nous a conduit à la relation (3.1). Ces relations permettent d'introduire un potentiel vecteur \vec{A} ($\vec{B} = \text{rot} \vec{A}$).

On obtient

$$\text{rot} (\vec{E} - \vec{E}_m + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}) = 0$$

Si V est le potentiel scalaire

$$\vec{E} - \vec{E}_m + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = - \text{grad} V \quad (3.8)$$

En prenant la divergence de l'équation (3.8) et en remplaçant E_m par sa valeur nous obtenons l'équation de Poisson suivante :

$$\Delta V = \text{div} \vec{v} \wedge \vec{B} - \frac{\partial}{\partial t} \text{div} \vec{A} \quad (3.9)$$

- Intégration de l'équation de Poisson

Avec les hypothèses précédentes on peut écrire

$$\vec{v} = v_k(\vec{r}), \quad \vec{B} = B_J = \text{constante}$$

L'équation de Poisson devient alors :

$$\Delta V = B \frac{dv}{dr} \cos \theta$$

Soit en coordonnées cylindrique en posant $V = y \cos \theta$

On obtient :

$$r^2 \frac{d^2 y}{dr^2} + r \frac{dy}{dr} - y = r^2 f(r) \quad (3.10)$$

Où : $f(r) = -B \frac{dv}{dr}$

Nous obtenons une équation de Cauchy qui peut être réduite à une équation linéaire à coefficient constant par la transformation $r = e^u$

$$\frac{d^2 y}{du^2} - y = e^{2u} f(r)$$

Par l'intégration on trouve finalement :

$$V = \left[c_1 r + \frac{1}{r} c_2 + \frac{1}{2} r \int f \cdot dr - \frac{1}{2} r \int r_2 f \cdot dr \right] \cos \theta$$

Où c_1 et c_2 sont des constantes d'intégration

Comme V ne doit pas présenter de discontinuité dans la région considérée on a $c_2 = 0$ et $c_1 = c$

$$V = \left[c \cdot r + \frac{1}{2} r \int f \cdot dr - \frac{1}{2} r \int r_2 f \cdot dr \right] \cos \theta$$

L'intégration par parties du troisième membre de cette équation donne en tenant compte que :

$$f(r) = -B \frac{dv}{dr}$$

$$V = \left[c \cdot r - \frac{B}{2} \frac{Q(r)}{r} \right] \cos \theta \quad (3.11)$$

Où :

$$Q(r) = 2 \int V(r) \cdot r \cdot dr$$

Est le débit moyen dans un tube de rayon r. Cette relation entre V et Q permet d'énoncer certaines propriétés du potentiel scalaire $V(r, \theta)$

➤ pour un rayon r quelconque

$$V(r, \theta) = -V(r, \theta + \pi)$$

$$V\left(r, \frac{\pi}{2}\right) = V\left(r, -\frac{\pi}{2}\right) = 0$$

➤ pour $r = 0$

$$V(0,0) = 0$$

➤ Le potentiel est indépendant de la loi de distribution des vitesses et de la conductivité.

Il faut maintenant déterminer la constante d'intégration c à partir des conditions aux limites.

3.2.2. Tube isolant :

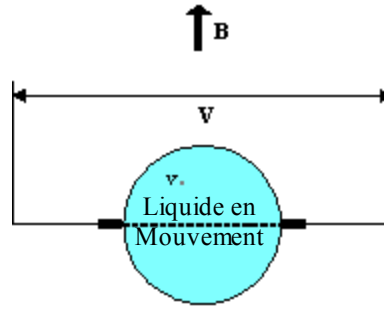


Figure 3.2. Tube isolant

3.2.2.1. Conditions aux limites :

Compte tenu des relations (3.6) et (3.7) et $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$;

L'équation (3.8) s'écrit

$$\frac{1}{\sigma} \vec{J} - \vec{V} \wedge \vec{B} + \text{grad} \vec{V} = 0$$

Ou en coordonnées cylindriques

$$Jr + \sigma VB \cos \theta + \sigma \frac{\partial V}{\partial r} = 0 \quad (3.12)$$

$$J\theta - \sigma VB \sin \theta + \frac{\sigma}{r} \frac{\partial V}{\partial \theta} = 0 \quad (3.13)$$

D'après les conditions aux limites pour $r = a$, nous avons $J(r) = 0$ (tube isolant) et $V = 0$ donc $\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right) = 0$.

En remplaçant dans (3.12) V par sa valeur on obtient

$$c + \frac{BQ(a)}{2\pi a^2} - \frac{B}{2\pi a} \left(\frac{dQ(r)}{dr} \right)_a = 0 \quad (3.14)$$

De l'équation $Q(r) = 2\pi \int V(r).r.dr$ nous obtenons en différentiant $\dot{Q}(r) = 2\pi V(r).r$ puisque $V(a) = 0; Q'(a) = 0$ l'équation (3.14) donne

$$c = - \frac{BQ(a)}{2\pi.a^2} \quad (3.15)$$

3.2.2.2. Equation du débit :

En remplaçant dans (3.11) le coefficient c précédemment trouvé, nous obtenons :

$$V = - \frac{B}{2\pi} \left[\frac{Q(a)r}{a^2} + \frac{Q(r)}{r} \right] \cos \theta$$

La différence de potentiel entre les extrémités 1 et 2 du diamètre perpendiculaire à B est

$$\text{obtenue en faisant } r=a; \theta_1=0; \theta_2=\pi, V=V(a,\pi)=V(a,0)=\frac{B}{\pi} \left[\frac{Q(a)}{a} + \frac{Q(a)}{a} \right]$$

$$Q(a)=\frac{\pi a V}{2B} \quad (3.16)$$

3.2.3. Tube conducteur:

3.2.3.1. Potentiel électrique :

Considérons un tube cylindrique conducteur, immobile de rayon externe ($r = b$) et de rayon interne $r=a$ (figure3.5).

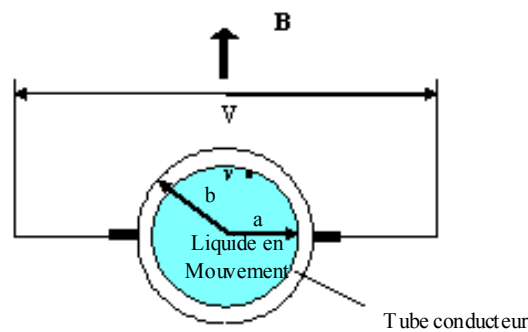


Figure 3.5. Tube conducteur

Pour le domaine compris entre $r=a$ et $r=b$ nous avons, d'après les équations de Maxwell $\Delta V = 0$ et en coordonnées cylindrique :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial^2 r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V}{\partial^2 \theta} = 0$$

Pour intégrer cette équation il est nécessaire de connaître les conditions aux limites.

3.2.3.2. Conditions aux limites liquide-tube :

Nous avons l'absence des charges superficielles $div \vec{j} = 0$ et à la limite de la séparation fluide-tube :

$$\vec{J}_{rF} = \vec{J}_{rT} \quad (3.17)$$

On J_{rF} est la composante radiale de J à la limite dans le fluide et J_{rT} est la composante radiale de J à la limite dans le tube.

Pour $r = a$, $V = 0$ donc :

- Coté fluide $-\text{grad} V_{aF} = \vec{E}_F$
- Coté tube $-\text{grad} V_{aT} = \vec{E}_F$

Ces équations transformées avec la loi d'Ohm donnent :

$$\triangleright - \text{grad} \vec{V}_{aF} = \frac{\vec{J}_f}{\sigma_F}$$

$$\triangleright - \text{grad} \vec{V}_{aT} = \frac{\vec{J}_T}{\sigma_T}$$

Où σ_T est la conductivité du tube et σ_F est la conductivité du fluide.

En coordonnées polaires nous aurons :

$$\left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)_{aT} = -\vec{J}_{rT} / \sigma_T$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)_{aF} = -\vec{J}_{rF} / \sigma_F$$

D'où on déduit d'après (3.17)

$$\left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)_{aT} = \left(\frac{\sigma_F}{\sigma_T} \frac{\partial V}{\partial r} \right)_{aF} \quad (3.18)$$

Cette équation montre que, à la limite de séparation, la composante normale du gradient du potentiel est discontinue alors que le potentiel reste continu.

Dans le liquide $r = a$ nous avons d'après l'équation (3.11)

$$V = \left[ca - \frac{B}{2} \frac{Q(a)}{\pi a} \right] \cos \theta$$

Cette équation est valable aussi pour $r=a$ coté parois et on a

$$\left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)_{aF} = \left[c - \frac{B}{2} \frac{Q(a)}{\pi a^2} \right] \cos \theta$$

Et d'après la relation (3.18)

$$\left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)_{aT} = \frac{\sigma_F}{\sigma_T} \left[c - \frac{B}{2} \frac{Q(a)}{\pi a^2} \right] \cos \theta$$

Pour

$$K_1 = \left[ca - \frac{B}{2} \frac{Q(a)}{\pi a} \right] \quad \text{et} \quad K_2 = \frac{\sigma_F}{\sigma_T} \left[c - \frac{B}{2} \frac{Q(a)}{\pi a^2} \right]$$

Les conditions aux limites pour $r=a$ (coté tube) deviennent

$$\left. \begin{aligned} (V)_a &= K_1 \cos \theta \\ \left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)_{aT} &= K_2 \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

3.2.3.3. Conditions aux limites pour la paroi externe ($r = b$) :

Pour $r=b$ nous supposons que le milieu extérieur est isolant et pour les mêmes raisons que celles considérées au (3.1). (3.2)

$$(J_r)_{r=b} = 0 \quad \text{et} \quad \left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)_{r=b} = 0$$

3.2.3.4. Intégration de l'équation de Laplace dans les parois du tube :

Le potentiel V doit être solution de l'équation $\Delta V = 0$ dans la couronne circulaire définie par $r=a$ et $r=b$. D'autre part les trois équations aux limites (3.19) et (3.20) doivent être satisfaites par le potentiel V .

Utilisons une méthode de séparation des variables et supposons que

$$V = R_{(r)} \cdot T(\theta) \quad (3.21)$$

La solution suivante est obtenue :

$$R = C_1 r + C_2 / r \quad \text{et} \quad T = \cos \theta \quad (3.22)$$

Des équations (3.21) et (3.22) nous tirons :

$$V = \left[C_1 r + \frac{C_2}{r} \right] \cos \theta$$

$$\frac{\partial V}{\partial r} = \left[C_1 - \frac{C_2}{r^2} \right] \cos \theta$$

Pour $r = a$ et $r = b$ compte tenu de (3.19) et (3.20)

$$V(a) = \left[C_1 a + \frac{C_2}{a} \right] \cos \theta = K_1 \cos \theta$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)_a = \left[C_1 - \frac{C_2}{a^2} \right] \cos \theta = K_2 \cos \theta$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)_b = \left[C_1 - \frac{C_2}{b^2} \right] \cos \theta = 0$$

En remplaçant K_1 et K_2 par leurs valeurs trouvées précédemment nous avons un système de 3 équations à trois inconnus C , C_1 , et C_2 .

En posant

$$\alpha = \frac{bQa}{2\pi} \quad (3.23)$$

et $\beta = \frac{\sigma F}{\sigma T}$ $q = \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2}$ On obtient finalement

$$V = \frac{2 q \alpha \beta}{(b^2 + a^2) (1 + \beta q)} \left(r + \frac{b^2}{r} \right) \cdot \cos \theta \quad (3.24)$$

L'équation (3.24) donne le potentiel V à l'intérieur des parois du tube conducteur ($a < r < b$).

3.2.3.5. Relation entre le débit et la différence de potentiel :

En mesurant V c'est à dire $V_1 - V_2$ entre les points 1 et 2 correspondant à $r = b$, $\theta = \pi$ et $\theta = 0$ de l'équation (3.24) il résulte que

$$V = \frac{8bq\alpha\beta}{(b^2 + a^2)(1 + \beta q)}$$

L'introduction de (3.24) permet d'obtenir le débit

$$Q(a) = V \frac{\pi[(b^2 + a^2)\beta + (b^2 - a^2)]}{4Bb\beta}$$

En introduisant le rapport des rayons $n = \frac{a}{b} < 1$

$$Q(a) = V \frac{\pi b[(1 + n^2)\beta + (1 - n^2)]}{4B\beta}$$

Note :

- Dans tous les cas étudiés, le débit moyen est proportionnel à la différence de potentiel et inversement proportionnel à l'induction magnétique B .

$$Q = K \frac{V}{B}$$

K étant une constante qui peut être déterminée expérimentalement.

- Lorsqu'on emploie une induction magnétique alternative la relation entre Q et V conserve la même forme.

3.3. Dimension et forme de la section du conduit de mesure :

Généralement quand on mesure un débit, pour des raisons pratiques, on emploie un tube de mesure de section circulaire. La tension qui prend naissance entre les électrodes est :

$$V = Blv \quad \text{puisque } Q = S.v \text{ donc}$$

$$V = Bl \frac{Q}{S} \quad \text{et comme } S = \pi \left(\frac{l}{2}\right)^2$$

$$\text{Donc } V = Bl \cdot \frac{Q}{\pi l^2} \times 4$$

D'où $V = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{B}{l} Q$. Il en ressort de cette formule que pour un débit constant, la tension détectée d'autant plus forte que le diamètre du tube de mesure est plus réduit. Il y a donc théoriquement intérêt à utiliser des tubes de plus faible diamètre possible, mais on ne peut aller très loin dans cette voie, en raison des perturbations que peut engendrer la pression de l'eau (éjection des électrodes, fuite d'eau).

3.4. Elimination des bruits parasites :

L'impédance inter électrodes étant élevée, on recueille alors des signaux parasites provenant de la pompe et de l'écoulement du liquide.

Une méthode pour atténuer ces bruits consiste à placer à chaque extrémité du tube de mesure isolant deux tubes conducteurs réunis à la terre. Les « effets de main » et les bruits provenant de la pompe seront pratiquement éliminés.

L'influence des parasites extérieurs est également fortement diminuée par le blindage formé par ces deux tubes. Les tubes que nous avons utilisés sont en acier inoxydable non ferromagnétique. Ils sont emmanchés dans le tube de mesure en PVC et une légère couche de colle assure l'étanchéité des raccords. La distance entre les deux tubes ne doit pas être trop faible par rapport à leur diamètre interne. Leur résistivité étant inférieure celle des liquides conducteurs usuels, ils produiraient un effet de « shunt interne » qui réduirait la tension induite par le déplacement du liquide.

Une distance égale au double du diamètre n'amène qu'une diminution négligeable de la sensibilité et assure encore une mise à la terre très efficace.

3.5. Circuit Magnétique :

3.5.1. Influence de la largeur :

Dans la théorie nous avons supposé que le champ magnétique était uniforme sur une grande longueur par rapport au diamètre de la conduite. En fait l'épaisseur t de l'électro-aimant est limitée pour des raisons de fabrication. Le champ maximum dans l'entrefer diminue lorsqu'on s'éloigne du centre. La f.e.m. induit par l'écoulement décroît de façon similaire. Des lignes courantes dans le plan xoz dont l'allure est donnée par la figure 3.6 sont induites. Il en résulte une chute de tension entre les deux électrodes qui réduit la sensibilité de la mesure. Certains ouvrages donnent les variations de la sensibilité relative K en fonction du rapport de l'épaisseur du circuit magnétique t sur la largeur de l'entrefer g . lorsque t/g est grand, la chute de tension est faible et ne dépend que de la résistivité du liquide. Lorsque t/g est faible la distribution du champ magnétique dans l'entrefer dépend principalement des formes (dimension) [13].

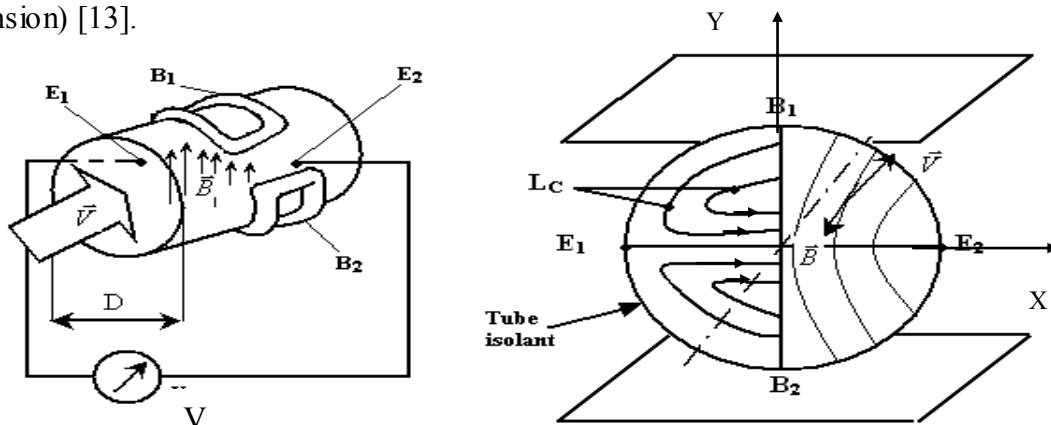


Figure 3.6. Schéma d'un débitmètre électromagnétique

Lc : lignes de courant

Lm : lignes de force magnétiques

3.5.2. Influence de la courbe des lignes de champs :

Nous disposons d'une force magnéto-motrice fixe qui, pour des raisons de réalisation, ne peut être augmentée. Il importe de l'utiliser de façon optimum pour produire la plus forte induction magnétique possible. Le circuit magnétique utilisé de section relativement faible donne une induction non uniforme. Les lignes de champs seront courbées dans les plans xoy et zoy. La perte de sensibilité qui en résulte dépend encore du rapport t/g [13].

3.6. Influence de l'impédance d'entrée de l'amplificateur :

La résistance interne d'un capteur à électrodes au sein d'un fluide déterminé est proportionnelle à la distance interne électrodes. On peut en déduire que l'erreur due à la résistance interne (quand on passe d'une eau à une autre) est plus grande lorsque la distance entre les électrodes est très grande.

$$\text{Comme } R = \rho \cdot \frac{l}{s} \quad \begin{array}{l} R = \text{résistance interne du capteur} \\ l = \text{distance entre les électrodes} \\ s = \text{surface des électrodes.} \end{array}$$

On remarque qu'on a intérêt à prendre des électrodes de grande surface si on veut éloigner les électrodes et de ce fait on peut éliminer la dépendance de la résistance interne du capteur en fonction des dimensions, et une fois qu'on aura gardé le rapport $\frac{l}{s}$ constant (dans le cas de l'interchangeabilité des électrodes) ; on remarque que l'impédance du capteur varie avec la conductivité du fluide. Et si l'impédance d'entrée du circuit d'amplification ne peut être considérée comme infinie par rapport à l'impédance du capteur (électrodes + fluide), il se produit une erreur de mesure qui dépendrait de la conductivité car la composition en minéraux et en sels de l'eau varie d'un endroit à un autre.

Par contre si l'impédance d'entrée du circuit d'amplification est beaucoup plus grande (par exemple mille fois) que l'impédance du capteur, l'erreur est très faible (1/1000). Donc plus grande sera l'impédance d'entrée de l'ampli, plus l'erreur due à la variation de la conductibilité du fluide sera faible.

Dans notre cas on se place dans la situation la plus défavorable (eau pure) ou la résistance interne du capteur est la plus grande possible et à partir de là on essaiera d'avoir un amplificateur dont l'impédance d'entrée est mille fois plus grande par exemple.

Pour résumer cela :

Le système constitué par les 2 électrodes et le fluide en mouvement est équivalent à un générateur de f.e.m. e (qui est l'information proportionnelle au débit) et de résistance interne R . Pour qu'il n'y ait pas de chute de tension aux bornes de R , il faut que l'impédance d'entrée de l'amplificateur soit très grande.

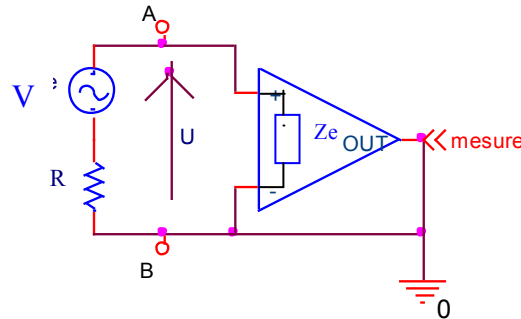


Figure3.7. Le système d'un capteur

Par exemple $Z_e = 1000 R$ $u = V \left(1 - \frac{1}{1000}\right) \approx V$.

Et si on mesure une eau courante dont la conductivité est plus grande (R plus petite), l'erreur commise sera encore plus faible.

3.7. Emploi d'une induction magnétique alternative :

Quand on utilise une induction magnétique continue la polarisation provenant des électrodes, due à de la tension induite par le déplacement du liquide, devient de plus en plus importante lorsque la durée de la mesure augmente.

La tension détectée tend alors à diminuer.

D'autre part, bien que les électrodes soient de même nature, il existe toujours une tension résiduelle de polarisation, lorsque le liquide est immobile.

Cette tension dépend de paramètres difficilement contrôlables tels que : la nature des électrodes et leur état de surface, la température et l'agitation du liquide,... etc. Nous verrons par la suite que cette tension varie avec le débit.

Pour remédier à ces difficultés dans le cas des faibles débits on utilise une induction magnétique alternative. Le signal apparaissant entre les électrodes est également alternatif et les effets de polarisation diminuent.

De plus l'amplification à courant alternatif facilite la détection du signal et les condensateurs de liaison bloquent la tension continue de polarisation des électrodes. Malheureusement l'utilisation d'un champ magnétique alternatif induit des tensions indésirables et indépendantes du débit. Ces tensions sont induites dans les électrodes et les conducteurs par couplages capacitifs et inductifs avec les bobines de l'électro-aimant.

3.7.1. Réduction de la tension induite par couplage capacitif :

Cette tension diminue en utilisant un électro-aimant dont la bobine est alimentée sous faible tension, en blindant électrostatiquement les conducteurs reliés aux électrodes et en mettant le circuit magnétique au potentiel de la terre. Une alimentation de l'électro-aimant en basse fréquence augmente l'impédance de la capacité de couplage bobine – électrode et réduit encore cette tension.

3.7.2. Réduction de la tension induite par couplage inductif :

La f.e.m. induite due à la loi de Lenz $V = - \frac{d\Phi}{dt}$ est la cause des principales difficultés rencontrées dans la réalisation dans ce débitmètre. Considérons le cas d'une induction magnétique de la forme :

$B = B_0 \cos \omega t$. Si $\mathcal{O} = BS$ le flux traversant la boucle constituée par les conducteurs (figure 3.8) la f.e.m. induite dans cette boucle est $V = - S B_0 \omega \sin \omega t$.

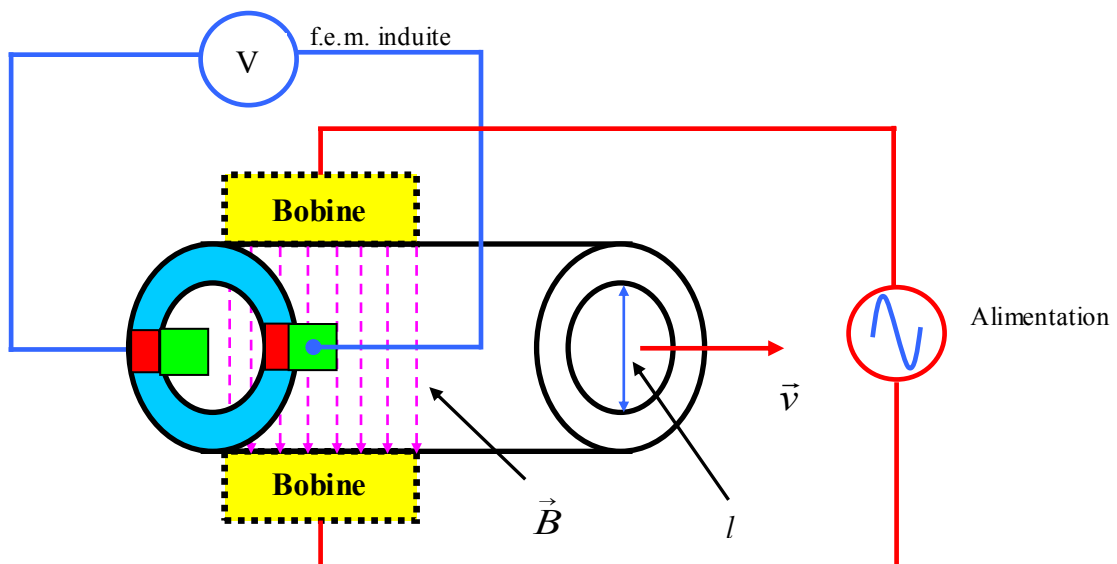


Figure 3.8. La tension induite de débitmètre

Cette f.e.m. est donc :

- Proportionnelle à B
- Proportionnelle à la fréquence f .
- Proportionnelle à la section orthogonale S faite par la boucle par rapport aux lignes de champ.
- Déphasée de 90° par rapport à l'induction donc par rapport à la f.e.m. désirée.

Si aucune précaution n'est prise, cette tension peut être beaucoup plus grande que le signal utile et la détection de ce signal devient impossible.

3.7.3. Elimination de la tension parasite :

Quelle que soit la position des conducteurs dans l'entrefer, on ne peut éviter la réalisation d'une boucle qui coupe les lignes d'induction magnétique.

Si la boucle constituée par les fils de sortie est parallèle aux lignes d'induction, la tension induite est nulle. Le réglage du parallélisme du plan de la boucle avec les lignes d'induction est extrêmement important.

Etant donné la sensibilité de ce réglage, le tube de mesure doit être parfaitement immobile par rapport au circuit magnétique. Les conducteurs, dès la sortie de leurs électrodes sont torsadés ensemble afin de minimiser les tensions induites. Nous pouvons expliquer cela de cette manière : on sait que la tension induite est $V_2 = \frac{-d\Phi}{dt}$ et comme $\Phi = \vec{B}\vec{S}$, sachant

que \vec{B} est une fonction sinusoïdale du temps et que $\vec{S} = \vec{n} \cdot S$ avec \vec{n} étant la normale à la boucle (S) et θ l'angle que fait (\vec{n} et \vec{B}) ; pour que Φ soit nulle, θ doit prendre la valeur de $K\pi/2$ d'où on a

$$\Phi = B \sin \omega t \cdot S \cdot \cos \theta = (B \sin \omega t) \cdot (S \cos K\pi/2) = 0$$

Donc forcément $V_2 = 0$ d'où élimination de la tension parasite.

3.7.4. Tension induite dans le liquide :

Considérons la conduite isolante avec le liquide conducteur immobile entre les électrodes placées dans un champ magnétique alternatif.

Ce champ magnétique induit dans le liquide situé entre les deux électrodes est parcouru par deux courants en opposition de phase. La tension entre les deux électrodes est nulle et statiquement l'équilibre n'est jamais perturbé si le liquide est homogène.

3.7.5. Influence des harmoniques du champ :

La tension parasite induite est proportionnelle à la fréquence, toute présence d'harmoniques dans l'induction magnétique augmente l'amplitude de cette tension. C'est pour cela qu'on a intérêt à ce que le taux d'harmoniques soit extrêmement faible d'où l'utilisation de petits électro-aimants dont la saturation est très vite atteinte.

3.8. Influence du débit sur la polarisation des électrodes :

Nous avons vu que lorsque le débit est constant ou nul la polarisation des électrodes varie lentement dans le temps. L'emploi d'un champ magnétique alternatif permet l'utilisation d'un amplificateur dont les condensateurs de liaison bloquent ces variations de polarisation. L'expérience montre que cette tension dépend de la nature des électrodes et de l'état de la structure de ces dernières.

Dans le cas d'un champ alternatif, pour éliminer cette tension parasite deux solutions sont possibles :

- utiliser un amplificateur dont le gain diminue rapidement du côté des basses fréquences.
- choisir convenablement les électrodes.

3.9. Influence de la conductivité du fluide sur la mesure du débit :

• Conduction et conductivité des électrolytes :

La conduction électrolytique est le passage du courant électrique dans les électrolytes effectué par transfert de charges électriques portées par des ions.

La formule donnant la densité de courant due à la dérive des ions s'écrit : $J_i = n_i e v_i$

$J_{j+} = n_+ e v_+$ avec J_+ = densité des ions positifs

n_+ = concentration en ions positifs

e = charge de l'ion

v_+ = vitesse de dérive des ions positifs

de même $j_- = n_- e v_-$ pour les ions négatifs

La densité totale s'écrit : $J = J_+ + J_- = n_+ e v_+ + n_- e v_-$

Comme dans les électrolytes les conductions en ions positifs et négatifs sont égales (la molécule se dissocie en 2 ions) ; ceci entraîne que : $n_+ = n_- = \alpha n$.

avec : n : α : taux de dissociation

et n : nombre de molécules présentés par unité de volume.

Les vitesses des ions peuvent être exprimées par leur mobilité et l'intensité du champ électrique appliqué à l'électrolyte $\left(E = \frac{e}{d} \right)$ (d : distance entre les électrodes).

On a : $v_+ = b_+ E$ et $v_- = b_- E$ b_+ et b_- étant respectivement les mobilités des ions positifs et négatifs.

D'autre part la mobilité varie en sens inverse avec la viscosité du fluide : $b = A \gamma^{-1}$ (γ = viscosité). On remarque que la densité de courant est proportionnelle à l'intensité du champ électrique.

D'après la loi d'Ohm pour les conducteurs électrolytiques (comme pour les conducteurs métalliques), la conductivité a pour expression : $\sigma = ne\alpha (b_+ + b_-)$.

On remarque que la conductibilité σ est d'autant plus élevée que le taux de dissociation α est plus grand (concentration en ions plus grande) et que les mobilités des ions b_+ et b_- sont plus grandes (viscosités très faibles)

On peut conclure que :

Quand la température des électrolytes augmente, la résistance électrique (inverse de conductance) décroît ce qui entraîne que les électrolytes possèdent des coefficients de température négatifs, et cela pour 2 causes essentielles :

- L'augmentation de la température fait croître le taux de dissociation α .
- Quand un liquide est chauffé sa viscosité diminue ; ce qui entraîne une augmentation de la mobilité des ions et par suite une augmentation de la conductibilité électrique σ .

3.10. Description du système :

Le débitmètre électromagnétique réalisé permet de mesurer le débit de l'eau.

- Ce produit liquide doit présenter une conductivité électrique minimale, de l'ordre de quelques $\mu\text{s}/\text{cm}$.
- Le tube de mesure est en PVC de section circulaire $S = 0.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ et rayon interne $l = 0.8 \text{ cm}$
- L'induction magnétique, de l'ordre de 0.01 T, est produite par les deux bobines.
- Le nombre des spires $N = \frac{BL}{\mu_0 I} = 96$ Spires, avec $\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}$. $I = 5 \text{ A}$. et la longueur de solénoïde $L = 3.5 \text{ cm}$
- Etendue de mesure :
 - Elle est fonction du diamètre de la conduite de mesure, la vitesse d'écoulement pouvant généralement varier de 1.27 à 12.7 m/s.
 - Diamètre $l = 0.8 \text{ cm}$, débit min = $0.23 \text{ m}^3 / \text{h}$, débit max = $2.3 \text{ m}^3 / \text{h}$.
 - Constante de temps : de l'ordre de 1s.



Figure 3.9. Une vue de la réalisation

3.11. Débitmètre à induction magnétique sinusoïdal ; enregistrement du débit :

Soit $B = B_0 \sin \omega t$ l'induction magnétique dans le tuyau. Lorsque le liquide est en mouvement une tension $V_1 = B l v$ proportionnelle à la vitesse du fluide apparaît entre les électrodes. On peut l'écrire :

$$V_1 = B_0 l v \sin \omega t \quad (3.25)$$

Comme on sait que la f.e.m. de self induction est $V_2 = -\frac{d\phi}{dt}$ on peut écrire que

$$V_2 = -S B_0 \omega \cos \omega t \quad (3.26)$$

Où S est la section normale présentée par la boucle de fils aux lignes d'induction. Ces deux f.e.m sont en quadrature. La f.e.m. totale détectée est :

$$V = V_1 + V_2 = B_0 l \sin \omega t - S B_0 \omega \cos \omega t \quad (3.27)$$

Sachant que V_1 désigne la composante utile du signal mesuré, tandis que V_2 est une composante parasite, la mesure du signal composé conduit à une valeur erronée. Pour remédier à cette erreur, nous proposons la méthode suivante pour éliminer la composante parasite V_2 .

Comme il est très difficile de réaliser une boucle parallèle aux lignes d'induction pour éliminer cette f.e.m., nous avons réalisé le montage suivant (figure 3.10) :

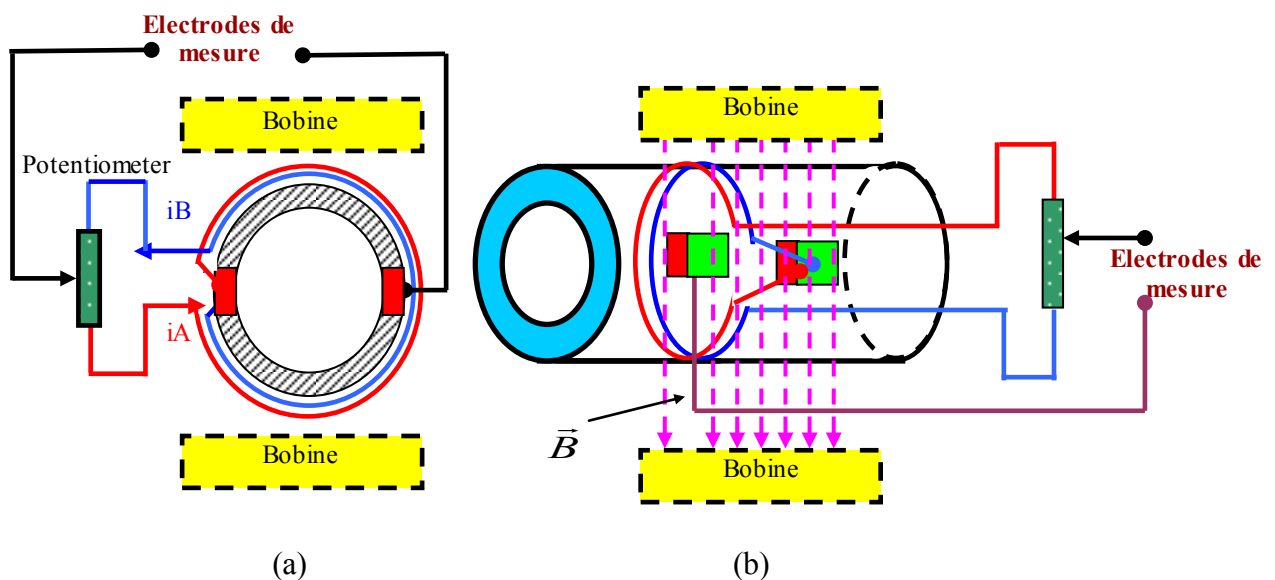


Figure 3.10. Schéma du montage qui permet l'élimination de la f.e.m parasite.

Deux fils connectés à une des électrodes de mesure forment deux boucles perpendiculaires placées dans le champ magnétique alternatif. Dans ces boucles, pour des raisons uniquement géométrique, les courants induits vont être en opposition de phase. Les figures a et b expliquent cette disposition.

Chacune des sorties de la boucle est connectée à un potentiomètre dont le point milieu sera relié à la deuxième électrode de mesure. En réglant l'amplitude des courants i_A et i_B induits dans chaque boucle à l'aide du potentiomètre P, on obtient entre A et B une tension nulle en l'absence de débit.

Pendant l'écoulement, le zéro de l'appareil n'est pas détruit car la variation d'impédance entre les électrodes se produit de façon identique dans les deux boucles et l'on recueille alors seulement, entre A et B la tension proportionnelle au débit.

Contrairement au dispositif qui consiste à additionner une tension en opposition de phase avec le signal parasite on remarque que le réglage est indépendant de l'amplitude et de la fréquence de l'induction car les tensions induites dans chaque boucle varient dans le même rapport.

L'induction magnétique dans le tuyau n'étant pas uniforme, la position du tuyau devra être parfaitement fixée.

3.11. Conclusion :

Comme l'impédance inter-électrodes est élevée la sensibilité dépend de la résistivité du liquide et de la valeur de l'impédance d'entrée de l'amplificateur.

Comme $V = Blv$ et $v = Q/S$ dont on tire $V = \frac{Bl}{S}Q$, on constate que la tension détectée est fonction du débit Q. on pourra tracer une courbe d'étalonnage donnant la tension détectée en fonction de la quantité de liquide écoulée dans un fût gradué pendant un temps donné.

Donc pour une tension donnée on pourra lui faire correspondre son débit et cela par extrapolation sur la courbe.

On a proposé une méthode simple qui permet d'éliminer la f.e.m parasite et de mesurer le débit de liquides conducteurs

Chapitre 4 :

Description de la réalisation

4.1. Introduction :

Le but de ce chapitre est de décrire le fonctionnement du dispositif électronique réalisé pour la mesure de débit de l'eau. Le schéma synoptique du système comporte les différents blocs suivants (figure 4-1) :

- le générateur du signal d'émission
- L'amplificateur de puissance
- L'étage amplificateur
- Le détecteur de crête
- Le circuit de traitement : le microcontrôleur 16F876
- Le circuit d'affichage.
- Le circuit de stockage : mémoire externe 24C64
- L'interface PC : MAX232

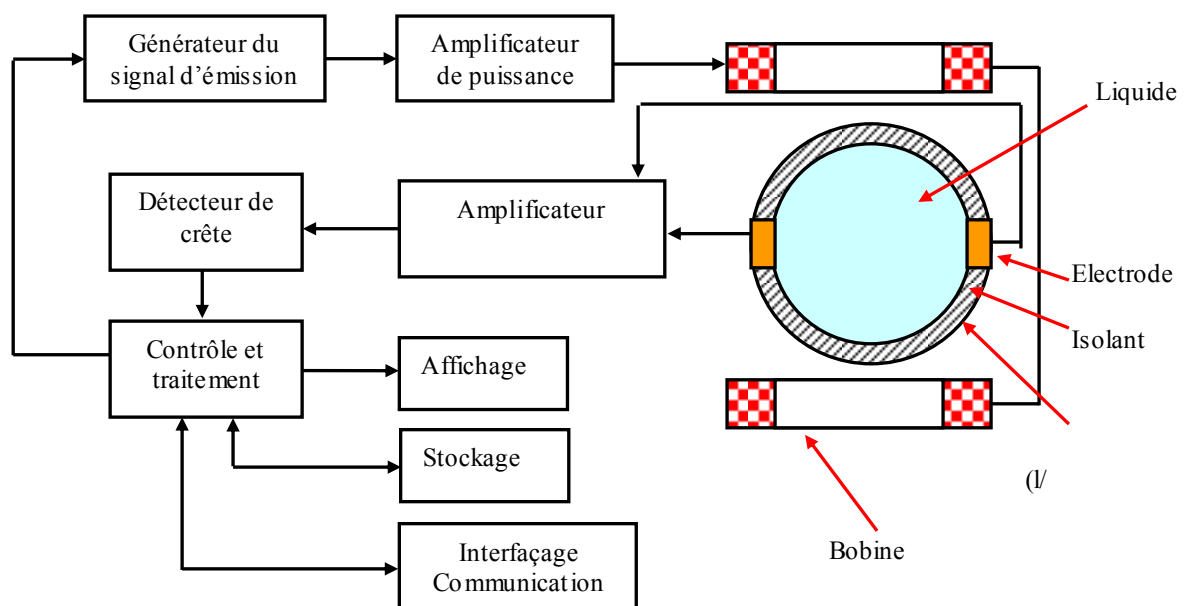


Figure 4.1. Schéma synoptique général du système

Le principe que nous avons retenu consiste à générer un champ magnétique à l'aide d'un bobinage alimenté par une tension sinusoïdale (figure 4-2).

La f.e.m induite, qui est l'image du débit, sera amplifiée puis convertie en donnée numérique pour être traitée par la suite (affichage, stockage...).

La tension sinusoïdale d'attaque est obtenue à partir de signal carré de fréquence 1KHz générés par un microprocesseur. Ce signal sera filtré par un filtre passe bande de façon à ce qu'il permette de ne faire passer que le premier harmonique.

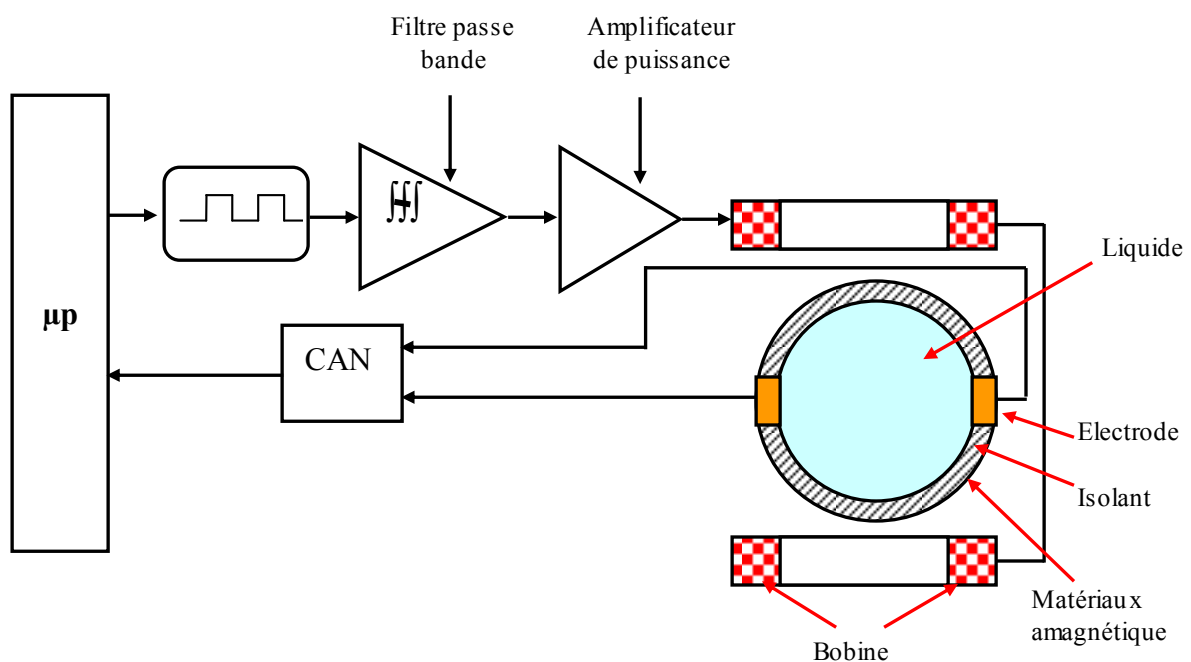


Figure 4.2. Principe de fonctionnement du débitmètre électromagnétique

Le microprocesseur choisi est le PIC16F876 de Microchip qui a l'avantage d'intégrer un CAN de 10bits. Le microcontrôleur sera utilisé de la manière suivante (figure 4.3).

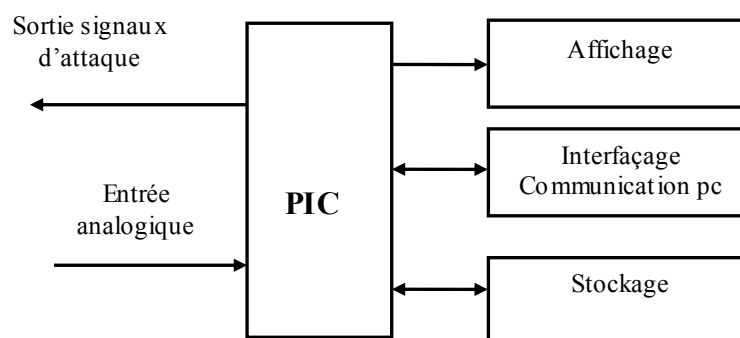


Figure 4.3. Circuit de traitement général du système

L'électro-aimant est alimenté par un signal issu du microprocesseur (le PIC16F876) préalablement filtré et amplifié par un amplificateur de puissance. Ce dernier provoque dans son entrefer une induction magnétique sinusoïdale de même nature que le signal d'alimentation de l'ordre de 0.01 T à 1 KHz de fréquence.

Le signal recueilli entre les électrodes sera amplifié par un bloc d'amplification suivi par un détecteur de crête. Cette valeur est convertie par le convertisseur analogique numérique intégré dans le microcontrôleur puis ce dernier envoie la valeur mesurée vers l'afficheur.

On peut effectuer aussi une sauvegarde des échantillons mesurés dans une mémoire externe cadencée sur un intervalle de temps régulier en ajoutant pour chaque échantillon sauvegardé la date et l'heure de l'acquisition de la mesure.

Ces données peuvent être aussi envoyées sur PC pour d'autres traitements éventuels. Le schéma de principe de la mesure est illustré sur la figure 4.4.

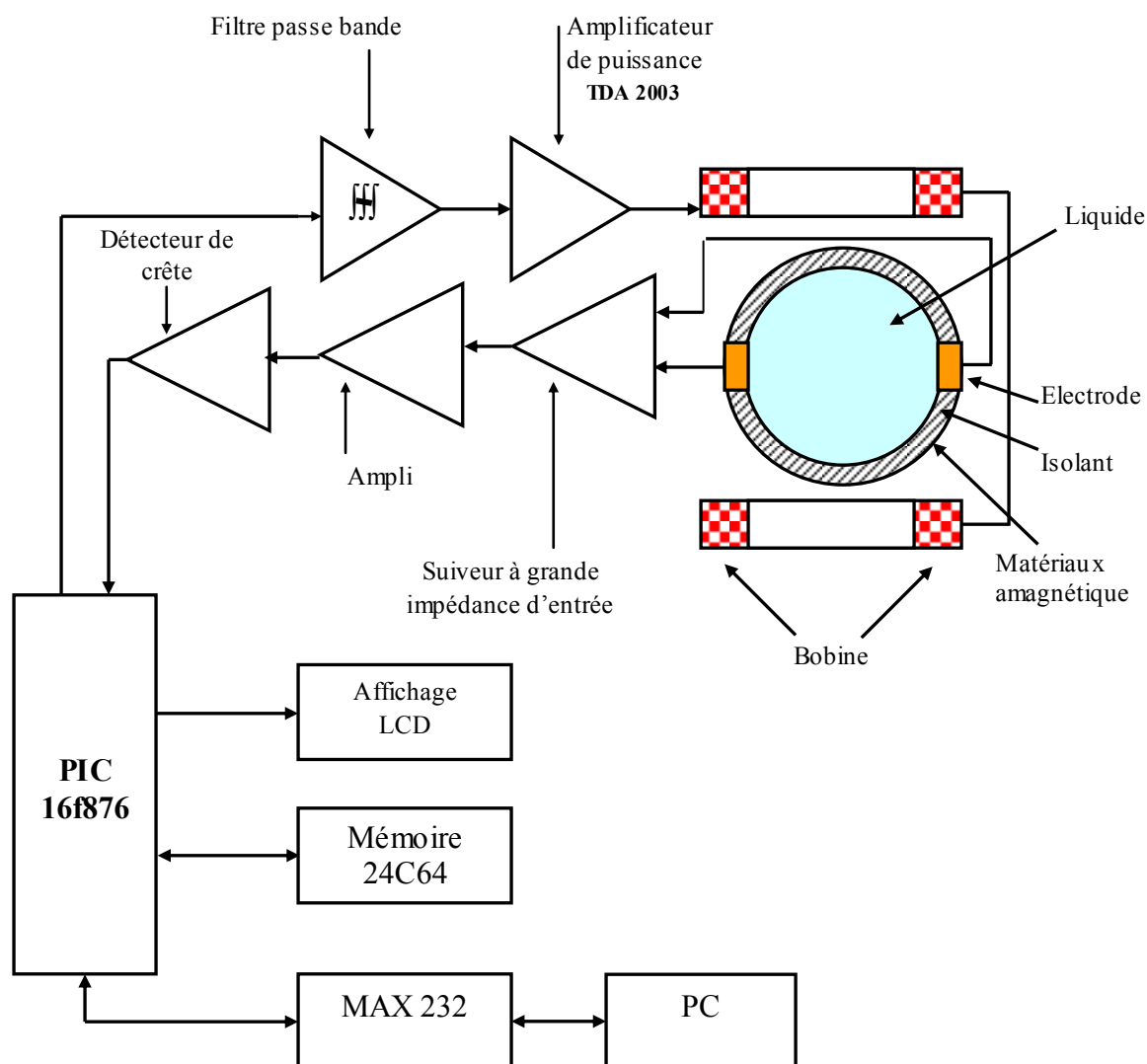


Figure 4.4. Schéma de principe du débitmètre électromagnétique

4.2. Système électronique :

On a divisé notre système en 3 grands blocs fondamentaux, qui sont respectivement :

- Le bloc émetteur
- Le bloc récepteur
- Le bloc de traitement

4.2.1. L'émetteur :

La fonction de l'émetteur est double ; d'une part, il élabore un signal qui présentera les caractéristiques voulues en fréquence et d'autre part il réalise l'adaptation entre ce signal pilote et les bobines grâce à un amplificateur de puissance.

4.2.1.1. Générateur du signal sinusoïdal d'émission :

Le signal issu du microprocesseur (le PIC16F876) est de nature carrée. L'extraction de la composante sinusoïdale contenue dans ce signal qui est utile pour le fonctionnement du montage nécessite un filtrage soigneux autour de 1KHz qui ne peut se faire qu'à travers un filtre passe bande, la sortie de ce dernier donne un signal des millivolts qui n'a pas la puissance suffisante pour attaquer les bobines. La mise en place d'un amplificateur de puissance à base de TDA2003 permet d'obtenir une puissance suffisante à cet effet.

4.2.1.1.1. Filtre passe bande :

Le schéma de ce filtre est donné par la figure 4.5. L'expression générale de la fonction de transfert dans l'hypothèse d'un amplificateur opérationnel idéal est donnée par :

$$G(p) = \frac{V_s}{V_e}(p) = \frac{\frac{1}{R_1} \cdot C \cdot p}{C^2 \cdot p^2 + \frac{1}{R_3} \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + C \cdot p + C \cdot p \right]} \quad (4.1)$$

Posons : $R_2' = R_1 // R_2$. L'équation (4.1) devient :

$$G(p) = \frac{V_s}{V_e}(p) = \frac{R_2' \frac{R_3}{R_1} C \cdot p}{1 + 2R_2' \cdot C \cdot p + R_2' \cdot R_3 C^2 p^2} \quad (4.2)$$

$$G(p) = G_0 \frac{\frac{2\alpha}{\omega_0} \cdot p}{1 + \frac{2\alpha}{\omega_0} p + \frac{p^2}{\omega_0^2}} \quad (4.3)$$

$$\text{Avec } G_0 = -\frac{R_3}{2R_1}, \quad \omega_0 = \frac{1}{C \sqrt{R_2' R_3}} \quad \text{et} \quad \alpha = \omega_0 \cdot R_2' \cdot C = \sqrt{\frac{R_2'}{R_3}}$$

Si l'on imposé à ce circuit d'être sélectif, c'est à dire d'être à bande étroite, les fréquences f_{c1} et f_{c2} , situées de part et d'autre de f_0 sont proches de cette fréquence. Dans ce cas, le rapport $\frac{f_{c1} + f_{c2}}{f_0} \cong 2$, par suite :

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{Q_0} = 2\alpha\sqrt{1+\alpha^2} \quad (4.4)$$

Ce dernier rapport porte le nom de bande passante relative et Q_0 désigne le coefficient de qualité du circuit.

• Calcul des éléments du filtre :

Calculons les éléments d'un filtre de ce type afin d'obtenir un gain de plateau $G_0=1$, une fréquence propre $f_0=1\text{KHz}$ et une bande passante $\Delta f=50\text{Hz}$.

$$\text{Donc :} \quad R_3=2R_1 \quad (4.5)$$

D'autre part la valeur de la bande passante relative exigée impose celle du facteur d'amortissement puisque, selon (4.4) :

$$\Delta f/f_0=50/1000=2\alpha\sqrt{1+\alpha^2} \quad \text{d'où :} \quad \alpha=2.5.10^{-2}$$

Ce résultat impose une relation entre les résistances R_1 et R_2 .

$$\alpha^2 = \frac{R_2'}{R_3} = \frac{R_2}{2(R_1 + R_2)}$$

On obtient par suite :

$$R_1=800.R_2 \quad (4.6)$$

L'impédance d'entrée du filtre est pratiquement égale à la résistance d'entrée R_1 , il suffit d'imposer à la résistance R_1 la valeur normalisée de $100\text{K}\Omega$ par exemple .ainsi, l'impédance d'entrée $Z_e(p)$ est indépendante de la fonction de transfert composite ne diffère pas ,dans sa forme de celle de $G(p)$.

Les deux autres résistances ont alors les valeurs de $200\text{K}\Omega$ pour R_3 et 125Ω pour R_2 .
Ces dernières relations entre les résistances permettent de donner à la fréquence f_0 la forme :

$$f_0 \cong \frac{1}{2\pi\sqrt{R_3 R_2}} \quad (4.7)$$

Ce qui permet de calculer la valeur de la capacité du condensateur $C1$ c-à-d $C1 = 31.8\text{nf}$

La valeur normalisée proche de celle donnée par le calcul est 33nf . Pour retrouver la fréquence f_0 souhaitée, il faudra rendre la résistance R_2 ajustable, afin d'obtenir l'accord exact du filtre à la fréquence de 1Khz .

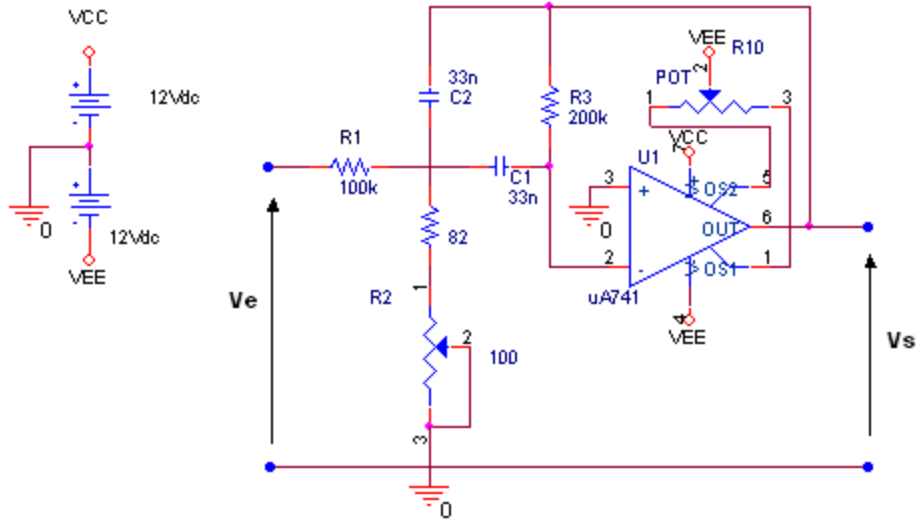


Figure 4.5. Filtre passe bande accordé à la fréquence $f_0=1KHz$

Le filtre passe bande est suivi par un diviseur de tension, parce que le signal présent à l'entrée de l'amplificateur de puissance est de quelques dizaines de mV.

4.2.1.1.2. Amplificateur de puissance :

Cette fonction sera réalisée par le TDA2003 qui est un amplificateur de puissance comme illustré sur la figure 4.6. Le TDA 2003 est compatible broche à broche avec le TDA2002 en améliorant les performances. Il ne nécessite que peu de composants extérieurs, il est facile à mettre en œuvre, d'un faible encombrement et d'un faible coût. Il fournit un signal sans distorsion excessive à une puissance raisonnable (6W). On peut demander plus de puissance, mais il faudra alors dimensionner le radiateur de manière adéquate [14].

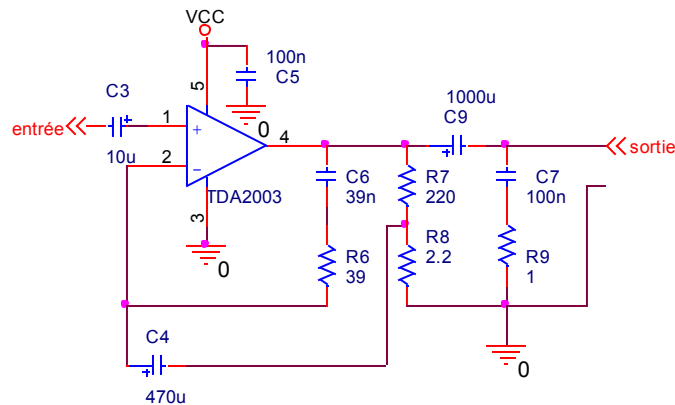


Figure 4.6. Amplificateur de puissance

La tension d'entrée du TDA2003 ne doit pas dépasser 300 mV, et pour exciter la bobine de l'inducteur, il faut une tension de quelques volts, d'où la nécessité d'amplifier en tension pour avoir une puissance de sortie suffisante pour attaquer la bobine dont la résistance est de l'ordre de 25Ω.

Donc : $|G_v|_{db} = 40dB$ si $V_e = 50\text{ mv}$

$$20 \log \frac{V_s}{V_e} = 40 \Rightarrow \log \frac{V_s}{V_e} = 2$$

$$\Rightarrow \frac{V_s}{V_e} = 10^2 = 100 \quad , \quad \Rightarrow V_s = 100 \times 50\text{ mv} \quad \Rightarrow V_s = 5\text{ V}$$

Et la puissance de sortie sera :

$$P_s = \frac{V_s^2}{R_{bobine}} \quad (4.8)$$

avec : $P_s = 1W$

4.2.2. Récepteur :

Le récepteur doit accomplir les fonctions suivantes :

- Amplification à grande impédance d'entrée du signal recueilli.
- Détection de ce signal.

4.2.2.1. Amplification à grande impédance d'entrée :

4.2.2.1.1. Etage suiveur à grande impédance d'entrée :

Le LM324 peut être utilisé comme un suiveur de tension. A cet effet il suffit de le faire fonctionner comme amplificateur non inverseur de gain unité. En régime alternatif et dans de tels montages, la borne négative de l'amplificateur opérationnel est reliée directement à la sortie.

Ce qui produit une contre réaction de 100 %.

La résistance R_1 qui est branchée entre la borne positive et la masse a pour but de décharger la capacité C_1 et d'assurer la stabilité de l'amplificateur en régime continu.

En raison de la présence de cette résistance le circuit présente une résistance d'entrée égale à R_1 seulement. Le schéma est donné dans la figure 4.7.

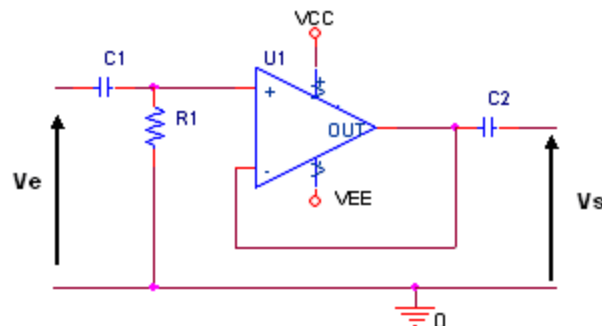


Figure 4.7. Amplificateur non inverseur de gain unité

La figure 4.8 montre comment on peut modifier le circuit précédent pour obtenir une résistance d'entrée de quelques centaines de mégohms.

Dans ce cas l'extrémité inférieure de la résistance R_1 reliée à la masse par R_2 , tandis que le point de liaison $R_1 - R_2$ est reliée à l'ampli opérationnel par C_3 .

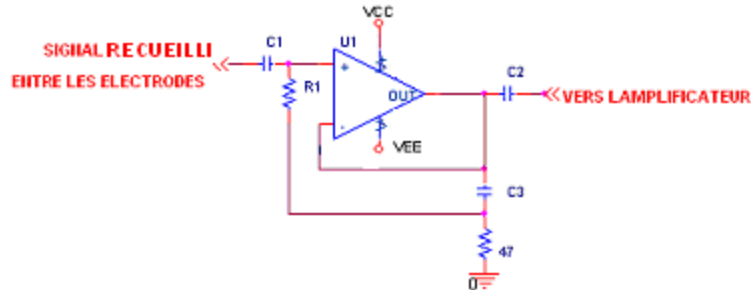


Figure 4.8. Etage suiveur à grande impédance d'entrée

A la fréquence de travail C_3 doit apparaître comme un court-circuit de telle sorte que la totalité du signal de sortie soit appliquée au point de liaison $R_1 - R_2$.

Comme les signaux d'entrée et de sortie sont identiques le courant qui traverse la résistance R_1 est nul ; celle-ci se comporte vis-à-vis du courant alternatif comme une impédance voisine de l'infini.

Cette technique d'augmentation de la valeur apparente d'une résistance porte le nom de « Bootstrapping ». C'est cette technique qui permet de réaliser des circuits à grande impédance d'entrée.

L'intérêt de la technique bootstrap réside non seulement dans l'obtention de grande résistance d'entrée, mais aussi dans l'utilisation des faibles valeurs pour les résistances $R_1 + R_2$ dans le but d'obtenir une bonne stabilité du point de vue continu (polarisation).

• **Calcul des éléments de cet étage :**

Pour cela on doit utiliser le schéma équivalent de l'ampli opérationnel en alternatif.

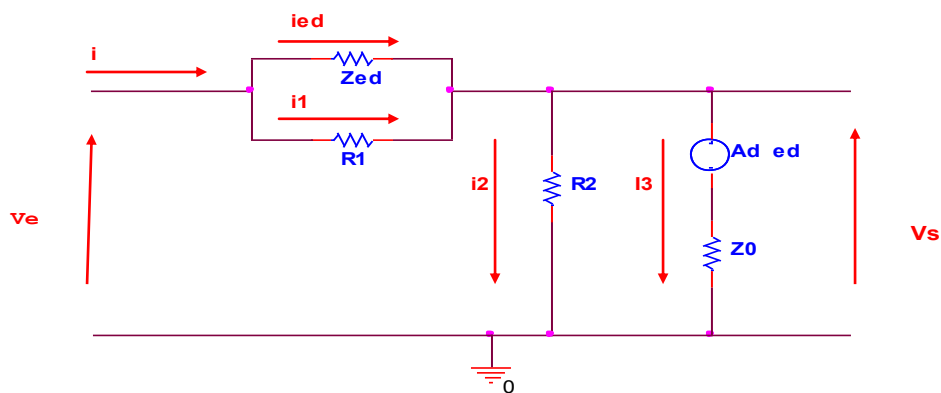


Figure 4.9. Schéma équivalent de l'ampli opérationnel

On a :
$$V_e = Z_e i \tag{4.9}$$

Z_e étant l'impédance d'entrée du montage

$$i = i_1 + i_{ed} = i_2 + i_3 \quad (4.10)$$

$$V_e = Z_e i = (Z_{ed} // R_1) i + R_2 i_2 \quad (4.11)$$

Z_{ed} = impédance d'entrée différentielle du LM324 et $R_2 i_2 = Ad \cdot ed + Z_0 i_3$ avec $ed = Z_{ed} i_{ed}$

Ad = gain en B.O du LM324 Z_0 = impédance du sortie du LM324

$$Z_{ed} i_{ed} = R_1 i_1 = (Z_{ed} // R_1) i \Rightarrow i_1 = \left(\frac{Z_{ed} // R_1}{R_1} \right) i \quad \text{et} \quad i_{ed} = \left(\frac{Z_{ed} // R_1}{Z_{ed}} \right) i$$

$$\text{Donc : } R_2 i_2 = Ad \cdot ed + Z_0 i_3 = Ad \cdot Z_{ed} i_{ed} + Z_0 i_3 = Ad \cdot Z_{ed} \left(\frac{Z_{ed} // R_1}{Z_{ed}} \right) i = Z_0 i_3$$

$$i = i_2 + i_3 = R_2 i_2 = Ad (Z_{ed} // R_1) i + Z_0 (i - i_2) \Rightarrow (R_2 + Z_0) i_2 = [Ad (Z_{ed} // R_1) + Z_0] i$$

$$i_2 = \left[\frac{Ad (Z_{ed} // R_1) + Z_0}{R_2 + Z_0} \right] i$$

$$V_e = (Z_{ed} // R_1) i + R_2 i_2 = (Z_{ed} // R_1) i + R_2 \left[Ad \frac{(Z_{ed} // R_1)}{R_2 + z_0} + Z_0 \right] i$$

$$V_e = \left\{ (Z_{ed} // R_1) + R_2 \frac{Ad (Z_{ed} // R_1) + Z_0}{R_2 + Z_0} \right\} i$$

Donc :

$$Z_e = (Z_{ed} // R_1) + R_2 \frac{Ad (Z_{ed} // R_1) + Z_0}{R_2 + Z_0} \quad (4.12)$$

Application numérique :

Dans le cas du LM324 :

$$\begin{aligned} Z_{ed} &= 1 \text{ M}\Omega \\ Ad &= 100.000 \\ Z_0 &= 300 \Omega \end{aligned}$$

Pour une bonne stabilité en continu (bonne polarisation) on choisit $R_1 = 100 \text{ K}\Omega$

Et si on veut avoir $Z_e = 1300 \text{ M}\Omega$ par exemple on tirera $R_2 = 47 \Omega$

• Calcul des capacités de liaison :

Une capacité C_1 de l'ordre de $0,1 \mu\text{F}$ et largement suffisante pour une bonne liaison (suite à la grande impédance d'entrée du montage).

C_2 dépend de l'impédance d'entrée du montage amplificateur et comme pour cet étage

$$Z_e' = 1 \text{ K}\Omega \quad \text{On prendra } C_2 = 10 \mu\text{F}$$

On prendra $C_3 = 2.2 \mu\text{F}$ pour avoir une grande réaction négative en alternatif.

4.2.2.1.2. Etage amplificateur :

Cet amplificateur doit présenter un produit (gain x bande passante) important, sachant que le signal reçu est de quelques mV d'amplitude.

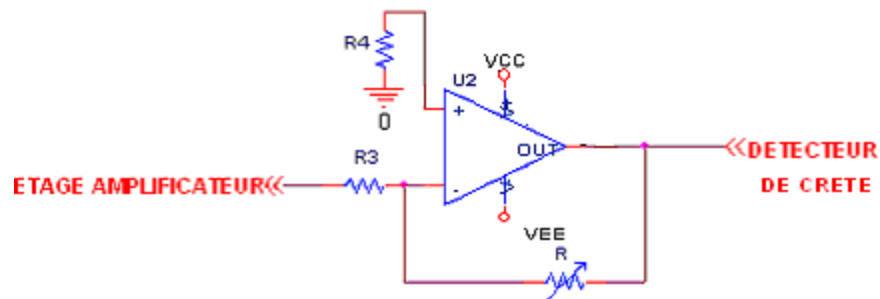


Figure 4.10. Schéma de l'amplificateur utilisé

$$C_2 = 10\mu\text{F} \quad Z_e' = R_3 = 1\text{K}\Omega$$

On a choisit $R = R_4$ pour éliminer ou diminuer l'effet du courant d'entrée qui est à l'origine d'une tension de décalage à l'entrée.

$R =$ potentiomètre $500\text{K}\Omega$

De ce fait on obtiendra une amplification théorique variable entre 0 et 500

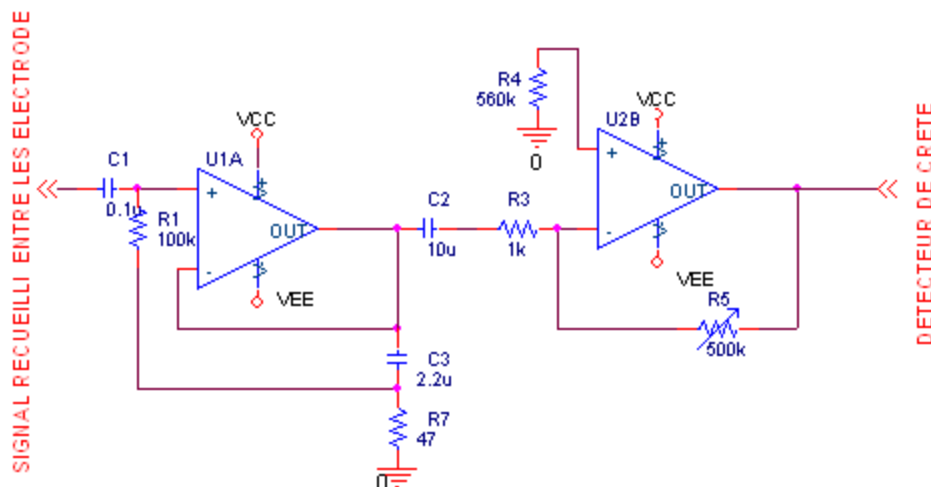


Figure 4.11. Circuit de l'amplification à grande impédance d'entrée

4.2.2.2. Détecteur de crête :

Pour les écoulements lents, ou en présence d'un faible signal, la détection sera délicate du fait du seuil de la diode (qui est de l'ordre de 700 mV). D'où la nécessité d'utiliser un détecteur de crête très sensible.

Le schéma électronique du détecteur de crête utilisé est donné par la figure 4.12

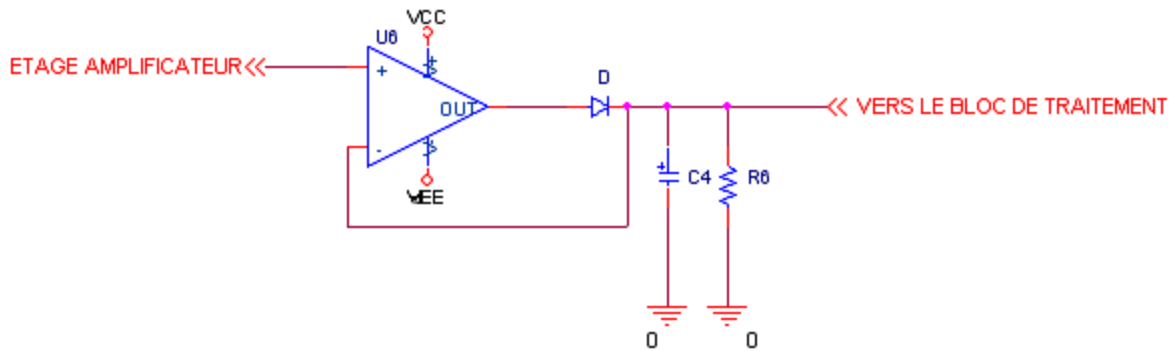


Figure 4.12. Schéma d'un détecteur de crête

En effet :

L'amplificateur opérationnel élimine l'effet de la tension de seuil de la diode ce qui permet de redresser, de détecter et d'écrêter les signaux dont l'amplitude est plus faible que la tension de seuil de la diode.

Etant donné que les amplificateurs opérationnels jouent le rôle d'adaptateurs d'impédance, ils éliminent les effets de sources et de charge.

4.2.2.2.1. Fonctionnement du détecteur :

- **Réduction du seuil (augmentation de la sensibilité) :**

Lorsque le signal d'entrée est positif, la sortie devient positive et fait conduire la diode, le circuit se comporte alors comme un suiveur de tension (pour le demi cycle positif).

Lorsque l'entrée devient négative, la sortie de l'ampli devient négative et bloque la diode. Le gain élevé de l'amplificateur opérationnel élimine l'effet de la tension de seuil de la diode si $v_s = 700 \text{ mV}$ et $A = 100.000$

Le signal d'entrée il est juste suffisant pour faire conduire la diode et

$$v'_s = \frac{v_s}{A} = \frac{700 \text{ mV}}{100.000} = 7 \mu\text{V}$$

Donc lorsque l'entrée est plus grande que $7 \mu\text{V}$, la diode conduit et le circuit se comporte comme un suiveur de tension.

L'effet est le même que si on réduisait le seuil d'un facteur A $\left(v'_s = \frac{v_s}{A} \right)$

- **Fonctionnement du circuit :**

Lorsque la diode conduit une forte contre réaction série parallèle produit une impédance de Thévenin tendant vers zéro : (c'est pour cela que la constante de temps de charge ($R_{th} . C$) se réduit à une valeur négligeable et élimine les effets de décharge ($R_L . C$) peut être allongée pour être beaucoup plus grande que la période du signal d'entrée; on aura ainsi une détection de crête presque parfaite.

Si on veut que la tension de sortie soit égale à moins de 1 % de la tension de crête d'entrée, il faut que la constante de temps ($R_L.C$) soit au moins 100 fois plus grande que la période du signal d'entrée.

Dans notre cas : $f = 1 \text{ KHz} = 1000 \text{ Hz}$

$$T = \frac{1}{f} = 10^{-3} = 1 \text{ ms}$$

On doit avoir $R_L.C = 100 T = 100 \text{ ms} = 10^{-1} \text{ s}$

Si on choisit $R_L = 10 \text{ K}\Omega = 10^4 \Omega$

Tel que C doit être supérieure à $\frac{10^{-1}}{10^4} = 10^{-5} = 10 \mu\text{F}$ Pour bien filtrer et réduire d'avantage la tension d'ondulation on prendra $C = 100 \mu\text{F}$.

4.2.3. Bloc de traitement :

C'est le cœur de notre circuit, il comporte les éléments suivants :

- Un circuit de traitement : le microcontrôleur 16F876
- Un circuit d'affichage : le LCD
- Un circuit de stockage : mémoire externe 24C64
- Une interface PC : MAX232

Ce bloc doit accomplir les fonctions suivantes :

- La lecture de données
- L'affichage de la valeur mesurée
- Le stockage des données avec leur date
- La possibilité de transférer les données vers un PC

4.2.3.1. La lecture de donnée :

• L'initialisation :

Le PORTA sera configuré en entrée analogique pour l'acquisition de la mesure.

• Principe :

Cette opération est réalisée par le PIC 16F876, qui est l'unité principale de traitement. Son choix est convenable dans notre cas, car il comprend un convertisseur A/D, ce qui simplifiera la circuiterie du système à réaliser. La séquence de lecture est la suivante : On met le PORTA (PA0) en entrée analogique pour recevoir les données qui seront converties en binaire, puis placées dans deux registres. Ces registres sont nommés ADRESL et ADRESH.

Comme 2 registres contiennent 16 bits, et que nous n'en utilisons que 10, nous pouvons sauvegarder le résultat soit à gauche, soit à droite, en mettant des 0 dans les 6 bits restants.

Mais il faut convertir cette valeur à son état initial, c'est à dire en réel. Cette opération est effectuée par le pic, ce processus de lecture étant détaillé dans le programme de gestion de la carte.

4.2.3.2. L'affichage :

Dans cette partie, nous allons voir comment interfacer le PIC16F876 avec un afficheur LCD (2 lignes de 16 caractères).

Le microcontrôleur s'interface au LCD par le port B configuré en sortie. La figure 4.13 montre le schéma utilisé.

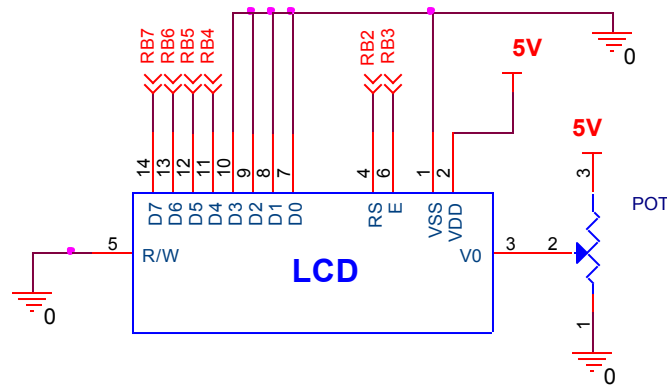


Figure 4.13. Brochage du LCD

4.2.3.3. Stockage dans la mémoire externe :

Ici on utilise une mémoire externe la 24C64, qui est une EEPROM avec une capacité mémoire de 64KO. Le brochage de cette mémoire est donné dans la figure 4.14. L'opération de stockage est effectuée après chaque minute. Si une minute passe le pic lance le processus de stockage qui est une opération d'écriture de données dans des emplacements mémoires.

L'emplacement mémoire pour chaque échantillon de mesure à stocker est fourni automatiquement par une adresse générée par le pic 16f876. Seulement il faut configurer les broches SDA et SCL de 24C64 selon notre cas. Tel qu'il est effectué dans ce présent travail où nous avons branché le SDA avec la pin RC4 et le SCL avec le pin RC3.

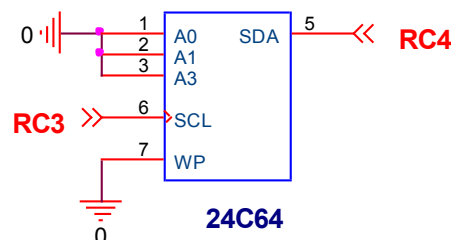


Figure 4.14. Brochage du 24C64

La donnée à stocker, d'une taille de 7 octets, est obtenue en concaténant à la donnée de mesure de débit d'autres données qui sont respectivement, le mois, le jour, l'heure et la minute de la mesure. Et suite à l'utilisation d'une mémoire externe à accès série, le mode d'écriture et de lecture est effectué en mode série bit à bit.

4.2.3.4. L'interface PC :

C'est la dernière tâche dans la séquence de notre carte, elle sert à envoyer les données stockées sur la mémoire EEPROM externe (24C64) vers l'ordinateur. Cela se fait par une interruption de communication générée par le PC vers le PIC, elle porte une requête codée sur la nature de la tâche à effectuer (transfert, mise à jours de la date sur PIC, effacer la mémoire de stockage, ...etc.). Les étapes de cette opération sont les suivantes :

Dans le cas où il s'agit d'un transfert des données stockés de la mémoire externe vers le PC, après avoir décodé la nature de la requête, le PIC récupère les données de la mémoire octet par octet et il effectue un transfert vers le PC via le circuit MAX232 qui utilise une communication série.

Généralement les communications séries sont utilisées pour raccorder des éléments qui peuvent être distants d'une centaine de mètres sans perdre l'information. Pour cela on utilise des tensions positives et négatives avec une logique négative. Par exemple sur un PC, lorsque on émettra un 1 on aura $-12V$ et un 0 sera de $+12V$, l'émission et la réception de données avec ces niveaux de tension reste compatible avec la norme RS232, et donc dans la mesure de pouvoir utiliser ce protocole de communication en toute efficacité le circuit leader MAX232 trouve sa place.

Ce dernier reçoit les données envoyées par le PIC à partir des pins RC6 et RC7, par la ligne R1IN et la ligne T1OUT du MAX 232.

Le principe de transmission est détaillé dans le sous programme de RS232. La figure 4.15 montre le schéma utilisé.

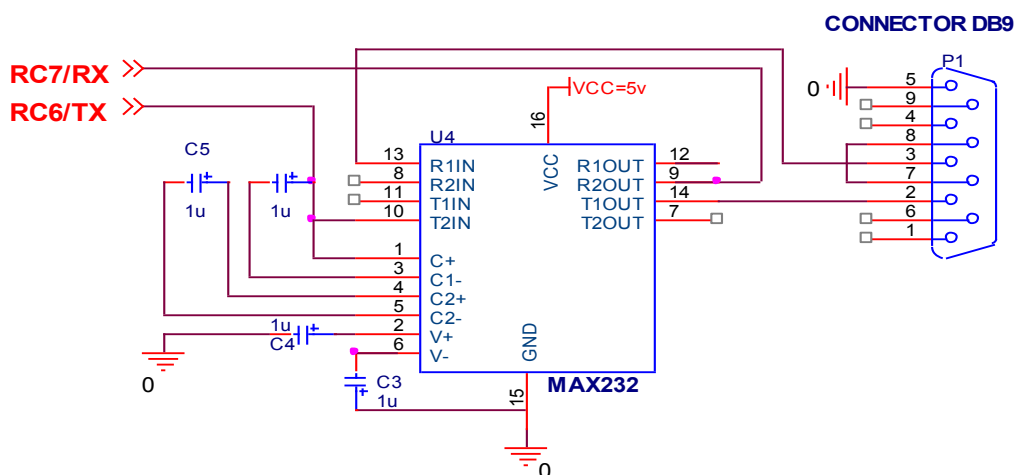


Figure 4.15. Brochage de la RS232

4.3. Circuits électroniques réalisés :

Les trois blocs de notre circuit sont réalisés à l'aide d'un circuit de routage, après avoir créé le schéma électrique. Comme on l'a déjà précisé précédemment, notre circuit est partagé en trois blocs: bloc émetteur (analogique), bloc récepteur (analogique), et bloc de traitement (affichage, stockage, et communication PC).

Les schémas globaux de ces blocs sont donnés dans les figures suivantes (figure 4.16, 4.17 et 4.18).

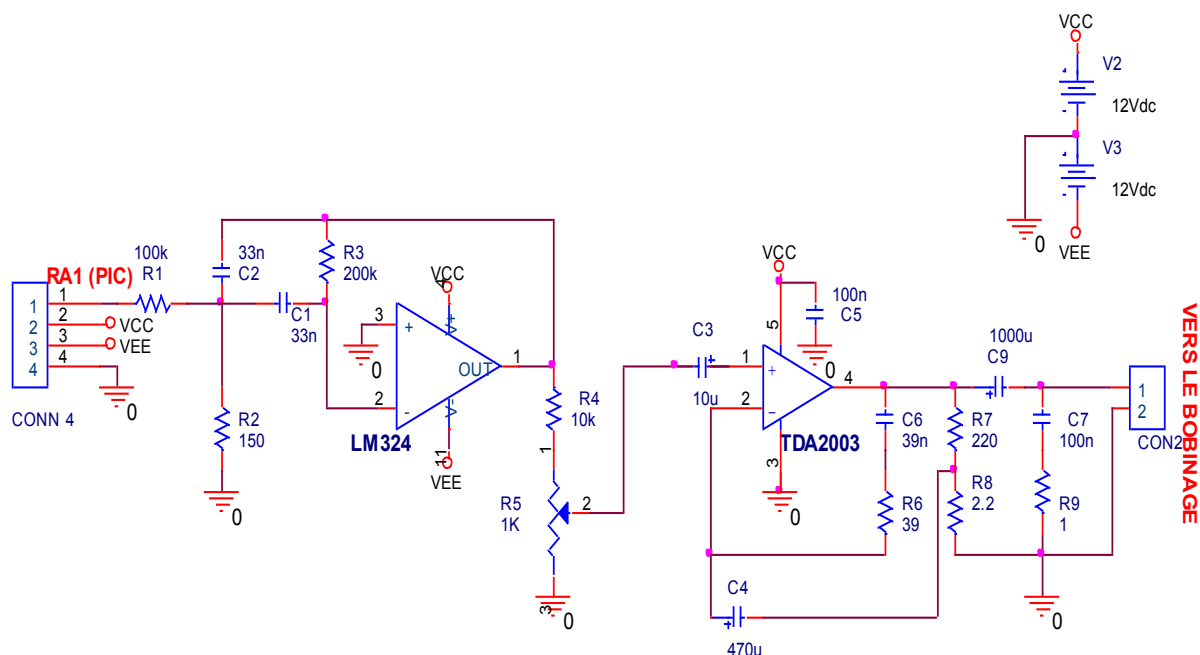


Figure 4.16. Bloc émetteur

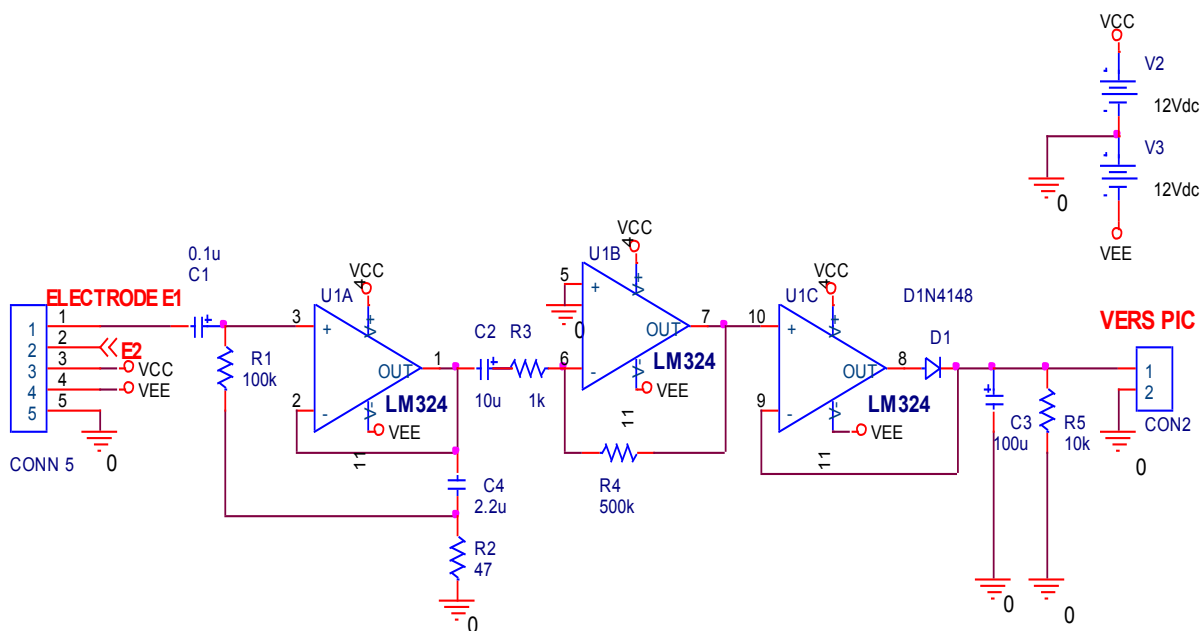


Figure 4.17. Bloc récepteur

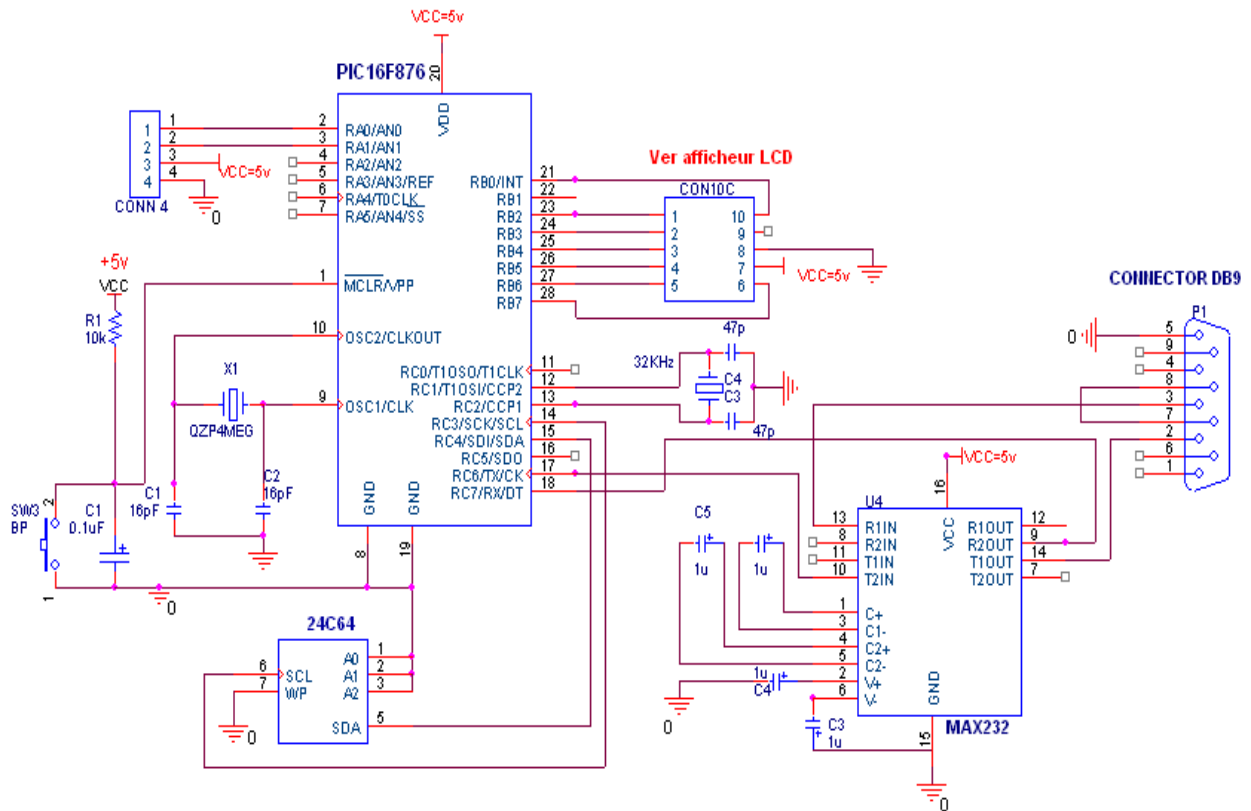


Figure 4.18. Bloc de traitement

4.4. Circuit imprimé :

Les figures suivantes montrent les circuits imprimés. Le circuit imprimé présente deux faces, 'top' et 'bottom'.

Figure 4.19. Circuit imprimé du bloc émetteur

Figure 4.20. Circuit imprimé du bloc récepteur

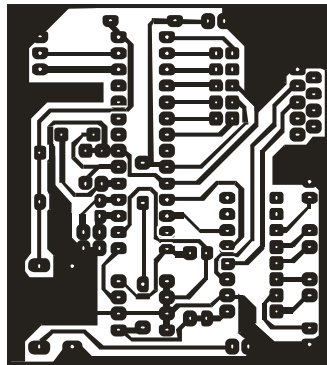


Figure 4.21. Circuit imprimé du bloc de traitement

4.5. Simulation :

Nous allons simuler sous *SPICE* les différentes parties de la carte. Certains circuits ne peuvent être simulés, notamment le microcontrôleur PIC16F876. En effet, la simulation requiert que chaque circuit dispose d'un modèle SPICE propre décrivant ses caractéristiques électriques et fonctionnelles.

4.5.1. Simulation de la chaîne de mise en forme de la tension des bobines (émetteur) :

Pour remplacer le PIC16F876 dans la simulation, nous avons utilisé un signal carré d'amplitude 5V et de fréquence 1KHz. Tandis que les deux potentiomètres ont été substitués par des résistances fixes, Les amplificateurs opérationnels sont alimentés par une tension de $\pm 12V$ comme est représenté sur la figure 4.22.

La grandeur physique du signal issu du filtre passe bande appliqué à l'entrée de l'amplificateur de puissance à base de TDA2003 n'excède pas quelques centaines de mV. La mise en place d'un diviseur de tension permet de piloter le niveau du signal d'entrée, qui ne devra pas dépasser 300mV, l'amplitude maximale admissible par le TDA2003.

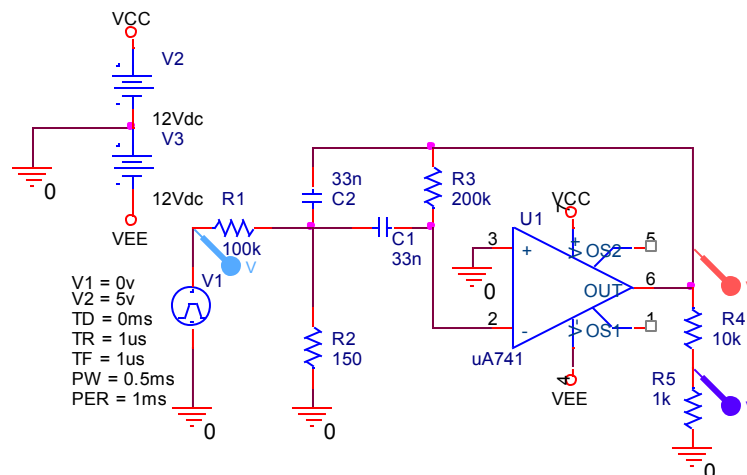


Figure 4.22. Montage électronique de simulation de la 1^{ère} partie de l'émetteur

Le résultat de la simulation du montage émetteur est donné à la figure 4.23. Le graphe illustre les différents niveaux de tensions d'entrée/sortie du montage. On y voit que l'amplitude de la tension de sortie est de l'ordre de 50mv.

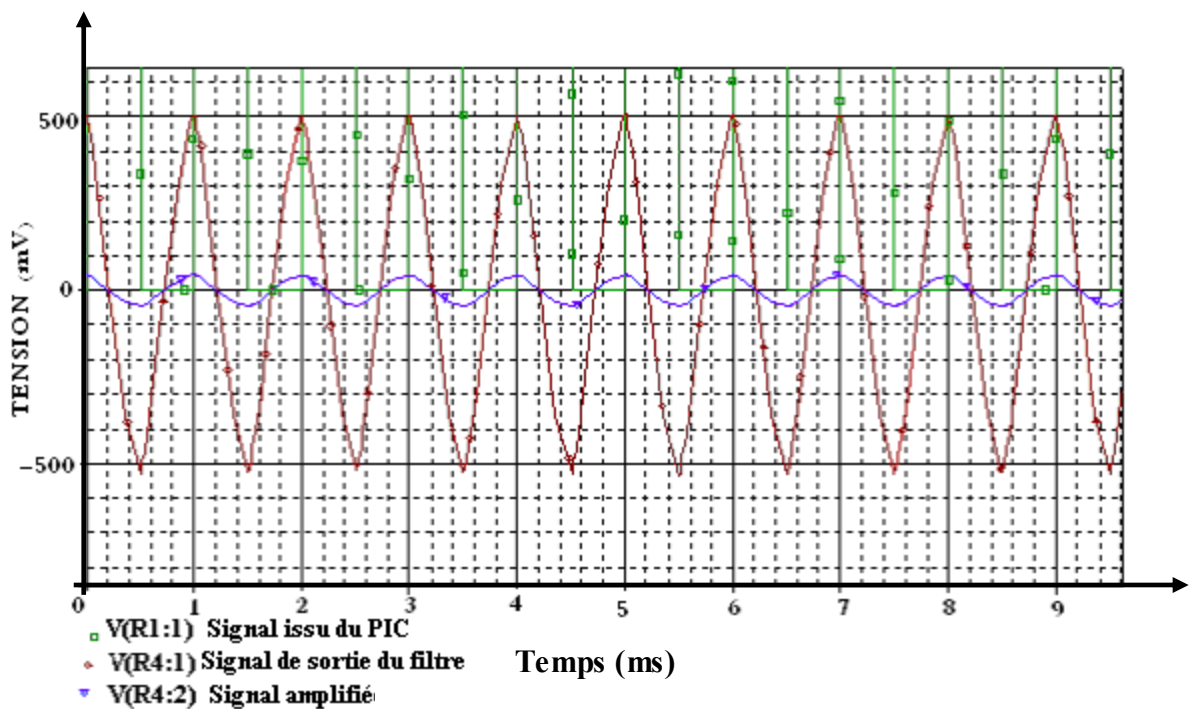


Figure 4.23. Représentation graphique d'entrée/sortie de l'étage de filtre

Etant donné que SPICE ne dispose pas d'un modèle du circuit intégré TDA2003, de ce fait, nous nous pouvons pas simuler cette partie de puissance qui représente le bloc de sortie de l'étage émetteur.

4.5.2. Simulation de la chaîne de réception :

La f.e.m induite au niveau des électrodes du capteur est représentée dans le schéma de simulation par un générateur de tension sinusoïdale de 1mV comme indiqué dans la figure 4.24.

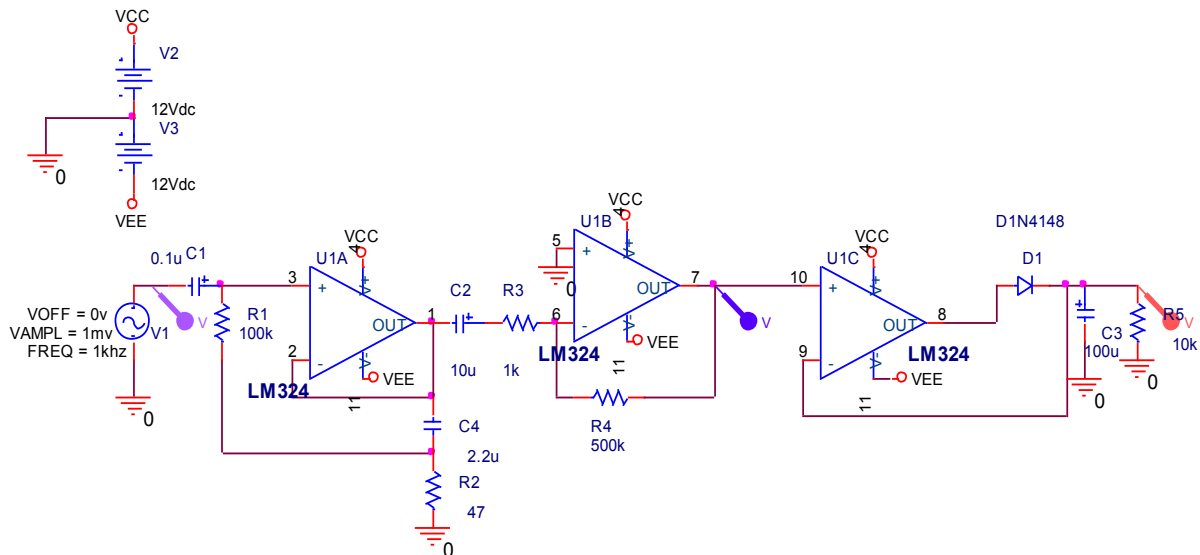


Figure 4. 24. Montage global de simulation de la chaîne de réception

La figure 4.25 ci-dessous montre les allures des différentes tensions, respectivement aux bornes de l'amplificateur à grande impédance d'entrée, et à la sortie du détecteur de crête.

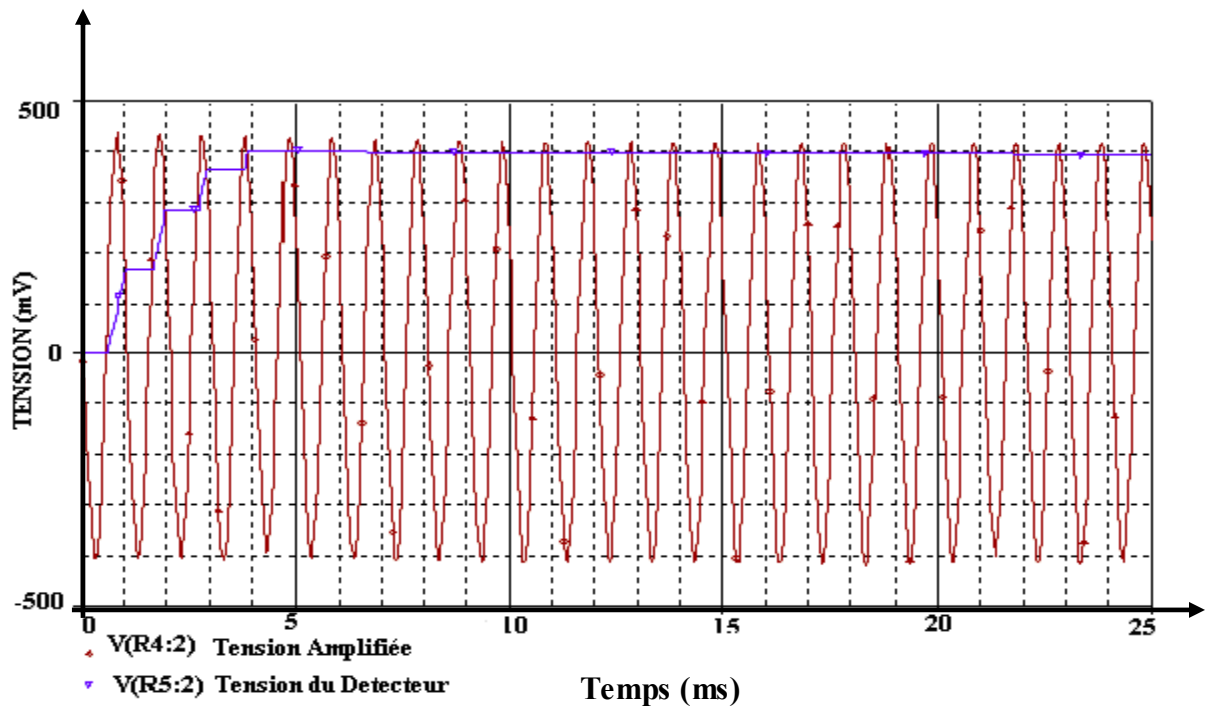


Figure 4. 25. Graphes des tensions amplifiées et sortie du détecteur

4.6. Organigramme du programme :

L'environnement matériel du PIC étant réalisé, il restera à programmer le microcontrôleur. Pour programmer le PIC 16F876, on utilise soit l'assembleur du constructeur, soit des langages évolués spécifiques.

Dans le cas de notre travail, on a opté pour le *langage C* comme outil de programmation des PICs, pour les raisons suivantes :

- La disponibilité du compilateur C.
- Une facilité de manier le programme avec une grande souplesse, malgré sa complexité.
- Une simplicité remarquable de traiter les données par rapport à l'assembleur.
- Sa richesse en instructions ciblées, et destinées pour des fonctions spéciales concernant entre autres le convertisseur A/N.

4.6. 1. Organigramme principal :

L'organigramme ci dessous présente le fonctionnement général. Comme on le voit sur la figure 4.26, le programme ne fait qu'afficher la valeur du débit dans l'attente des interruptions qui contiendront les séquences de fonctionnement.

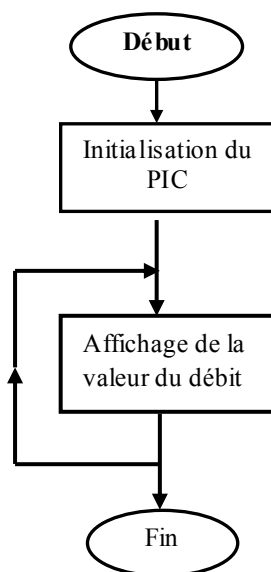


Figure 4.26. Organigramme principal

4.6.2. Organigramme des programmes d'interruption :

4.6.2.1. Organigramme du programme de commande:

L'organigramme suivant (figure 4.27) illustre la manière d'obtention du signal de commande à une fréquence de sortie de 1Khz. On utilise l'interruption du Timer2, convenablement configuré.

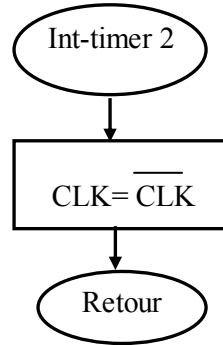


Figure 4.27. Obtention du signal carré

4.6.2.2. Organigramme du programme de calendrier :

L’organigramme ci dessous présente la technique d’évaluation de la date durant la période de mesure du débit. L’organigramme montre le déroulement des différentes étapes, en commençant par la seconde. Cette dernière est mise en test pour une valeur de 30 secondes au lieu de 60 pour incrémenter la minute. Cela est dû à la configuration du Timer1 qui nous permet d’avoir une fréquence de sortie de 2 secondes par cycle ; en conséquence 30 cycles du Timer1 nous donnent 60 secondes. Après chaque minute, une séquence de tâches sera exécutée qui sont respectivement la mesure de débit, le stockage des données dans la mémoire externe et l’affichage. Le programme de calendrier continue à incrémenter le reste des variables (l’heure, le mois et l’année).

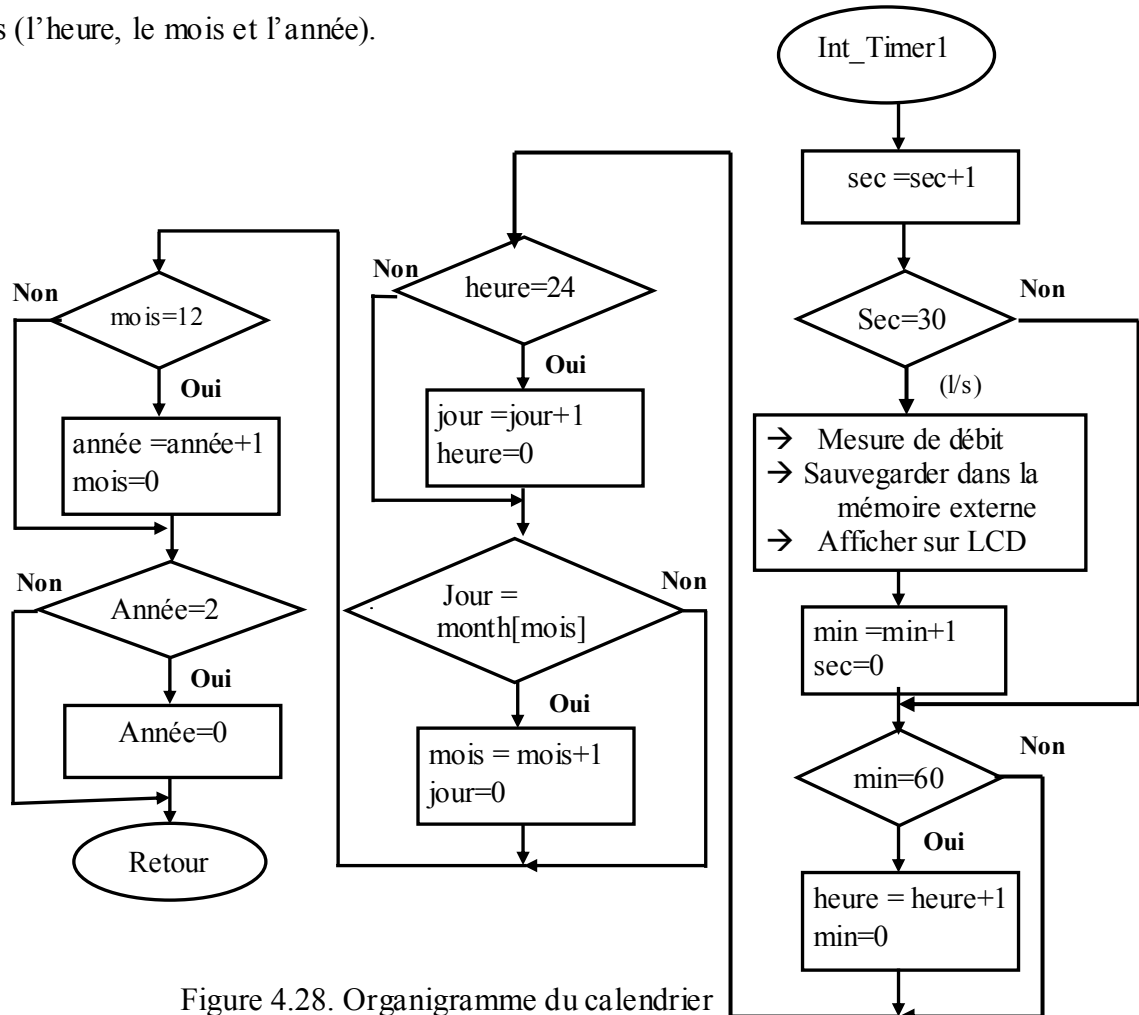


Figure 4.28. Organigramme du calendrier

4.6.2.3. Organigramme du programme de transmission :

Chaque fois qu'une demande de transmission est sollicitée par le PC, le journal des consommations pendant les 10 minutes écoulées est envoyé par le PIC.

La figure 18 suivante montre l'organigramme de la transmission.

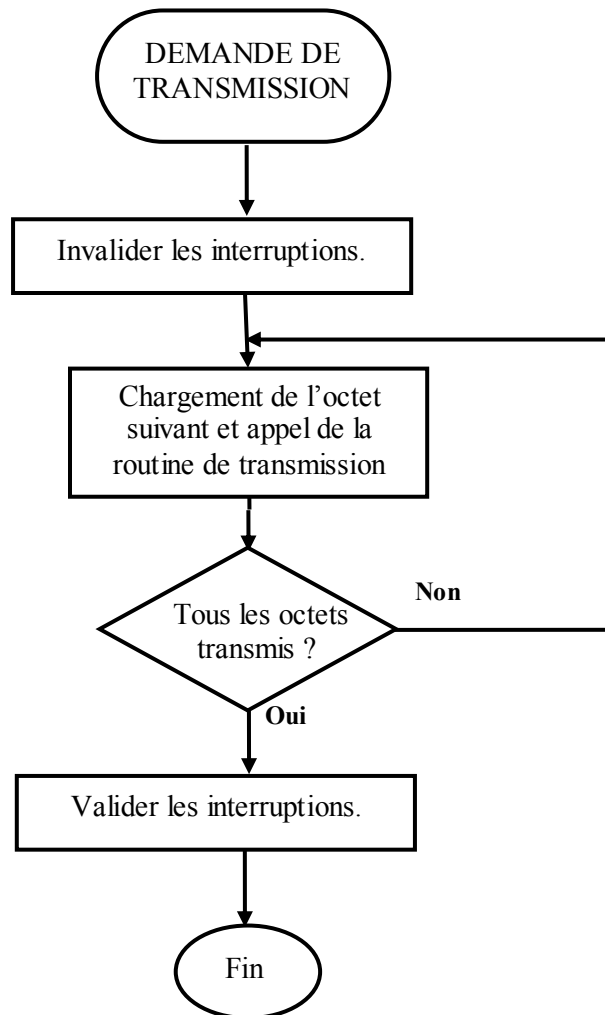


Figure 4.29. Organigramme de la transmission.

Un programme en Visual Basic a été élaboré et il permet d'obtenir sur l'écran d'un PC un affichage comportant la date, heure et la valeur de débit (figure4.30), ce fichier pourra être archivé pour des traitements éventuels.

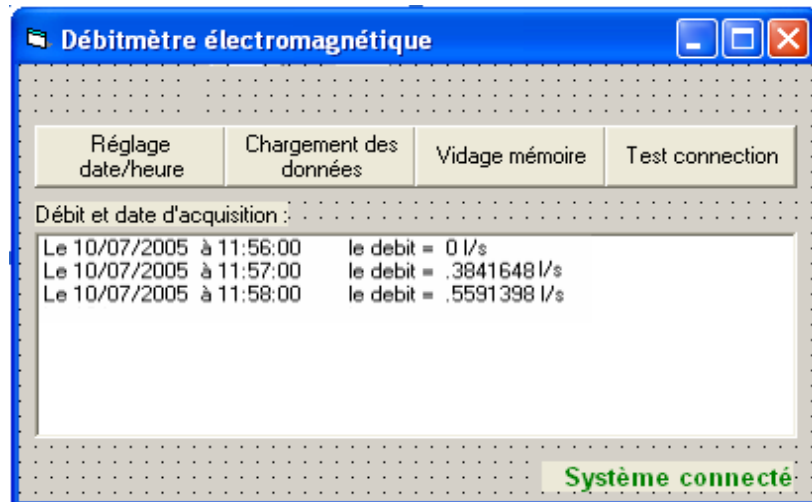


Figure 4.30. Ecran illustrant le débit de l'eau avec date et heure

4.7. Tests et résultats des mesures :

Les différentes parties réalisées ont été testées indépendamment. Les différentes courbes visualisées sur oscilloscope pour (la sensibilité horizontal 0.2ms/Div, la sensibilité vertical 1V/Div) sont représentées par les figures suivantes:

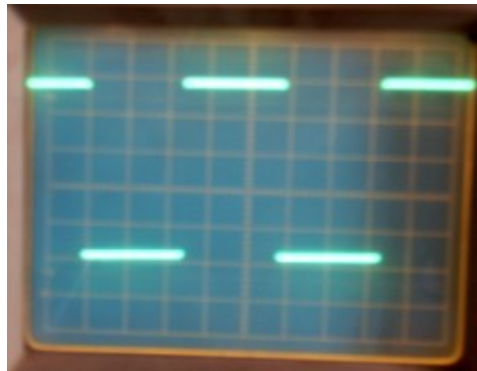


Figure 4.31. . Signal carré (5V, 1Khz) issu du PIC



Figure 4.32. Signal de la tension de sortie du bloc émetteur (5V, 1Khz) vers le bobinage

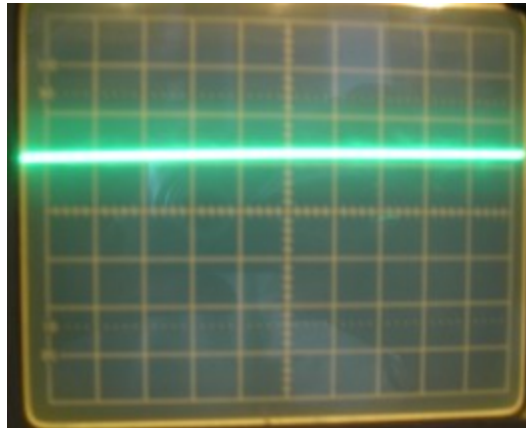


Figure 4.33. Signal de la tension du détecteur

L'étalonnage :

L'étalonnage consiste à comparer la valeur du débit donnée par le débitmètre et le débit déterminé par la quantité de l'eau récoltée en un temps donné dans un récipient gradué. Les résultats de cette opération sont représentés par le tableau suivant.

Les valeurs des débits (l/s)	Les valeurs enregistrées (l/s)
0	0
0.048	0
0.042	0
0.16	0.18
0.09	0.16
0.14	0.16
0.15	0.17
0.10	0.15
0.12	0.12
0.24	0.26
0.25	0.25
0.29	0.32
0.31	0.37
0.38	0.40
0.40	0.42

Figure 4.35. Tableau illustrant les valeurs des débits de l'eau obtenue et les valeurs enregistrées par le débitmètre réalisé.

Pour chaque valeur de débit, 3 mesures ont été réalisées, chaque mesure étant la valeur moyenne estimée toutes les 10s. La précision de l'appareil est bonne (erreur de 1%) pour la gamme des débits de 0 à 0.40 l/s.

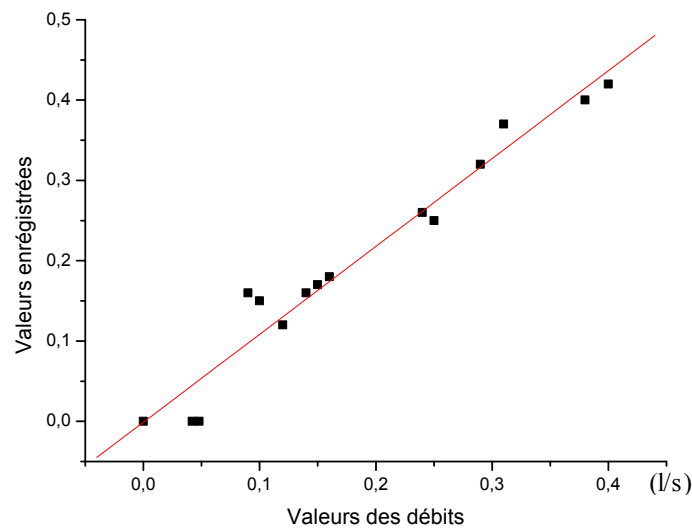


Figure 4.35. Courbe d'étalonnage du débitmètre (diamètre mesuré du tuyau = 8 mm).

$$Y = A + B \cdot X \quad Y = -0.00116 + 1.094661 \cdot X$$

Les paramètres statistiques :

A = -0.00116 erreur : 0.01457

B = 1.094661 erreur : 0.06702

Coeff de corrélation $r = 0.97649$

SD= 0.03113

N=15

P < 0.0001.

4.8. Conclusion :

Après la réalisation des trois cartes (carte émetteur, carte récepteur, et la carte traitement), ses différentes parties ont été testées indépendamment.

L'utilisation d'un PIC doté de convertisseur contribue largement à réduire les composants utilisés pour la réalisation de la carte ci présente.

La carte de traitement possède aussi une option de communication avec un PC pour un éventuel échange de données de la carte vers le PC ou l'inverse, et cela grâce à un logiciel approprié conçu sous l'environnement Windows et à base du protocole RS232, ce dernier permet un accès direct aux différentes configurations du PIC 16f876, y compris l'acquisition des données de mesures qui se trouvent stockées sur une mémoire externe. Le programme implanté dans la mémoire du microcontrôleur a été présenté. Enfin, à titre indicatif, nous avons exposé quelques photographies des signaux obtenus.

Conclusion générale :

Notre travail a consisté en l'étude et la réalisation d'un débitmètre électromagnétique autour d'un microcontrôleur qui est le noyau de tous les signaux traités en entrée/sortie. Le microcontrôleur utilisé, de type PIC 16F876 de Micochip, effectue les tâches suivantes :

- Emission d'un signal de commande destiné à l'amplificateur de puissance.
- Réception de l'information du débit mesuré sur un canal de conversion A/N, issu de la carte de conditionnement du signal du capteur.
- Affichage sur LCD d'une série d'informations, contenant à la fois la grandeur physique du débit mesuré, l'heure et la date de mesure.
- Mémorisation des données de mesures datées sur une mémoire externe de type 24C64.
- Echange d'informations avec un PC en utilisant le port série, à base du protocole RS232.

Le débitmètre réalisé sera certainement un instrument utile pour les concepteurs des systèmes de pompage photovoltaïque. Il complète avantageusement leurs appareils de mesure et permet la recherche d'une optimisation de la chaîne panneaux, moteur, pompe.

Le débitmètre est donc un appareil de mesure utile car il permet, en comparant les volumes pompés, d'avoir une idée sur le prix du m³ d'eau obtenu.

C'est ce paramètre qui estime la compétitivité d'un mode de pompage par rapport à un autre, le pompage photovoltaïque par rapport au pompage diesel dans notre cas. Ceci est très important et nous sommes convaincus que nos résultats vont contribuer au développement du pompage photovoltaïque car sa rentabilité sera prouvée.

Il restera à tester notre appareil sur le terrain pour apprécier son comportement après plusieurs heures de service (précision ...etc). Si sa fiabilité n'est pas bonne, il conviendrait peut être d'utiliser des composants à tolérances plus rigoureuses.

Le fonctionnement de notre carte se rapproche de la solution existante dans le domaine industriel, mais notre travail avait pour but d'adapter ce genre de débitmètres à notre application particulière qui est le pompage photovoltaïque. Les problèmes qui peuvent surgir seront peut être dus à la nature de l'eau pompée qui pourrait présenter une faible conductivité. Ceci fausserait évidemment nos mesures et obligerait à se tourner vers d'autres types de débitmètres cette situation est à notre avis peu probable.

Comme perspectives à ce travail, nous pensons, si la fiabilité et la précision de notre appareil sont bonnes, de songer à intégrer ces circuits dans un ensemble du type FPGA destiné à la commande générale d'un système de pompage photovoltaïque.

Références bibliographiques :

- [1] Ranald-V-Giles. *Mécaniques des fluides et hydraulique*, Série Shaume, New York, 1962.
- [2] C. Gailldreau. *Choix d'un débitmètre*, Techniques de l'ingénieur, R2200.
- [3] G. Asch. *Capteur et instrumentation industrielle*, Paris, DUNOD, 1998, pp.547-585.
- [4] F. Rosemount. *Principe fondamentaux de mesure du débit*, Révision du 28 Novembre 1997.
- [5] François de Dieuleveult, Hervé Fanet. *Principes et pratique de l'électronique*, Paris, DUNOD, 1997.
- [6] A. Dziadowiec, M. Lescure. *Fonctions à amplificateurs opérationnels*, Paris, EYROLLES, 1996, pp.175-215.
- [7] M. Bougeant, T. Royant. *Analyse et conception de circuits électroniques avec Pspice/Designlab*, Paris, EYROLLES, 1998, pp.198-202.
- [8] J. Gomez Rodriguez. *Contribution à la conception et réalisation d'un microsystème à capteurs inductifs à courants de Foucault*, CNRS LAAS, thèse 1999.
- [9] J.N. Staub, L. Bergougnoux. *Débitmètres électromagnétiques*, Techniques de l'ingénieur, R2275, pp.1-5.
- [10] W.Palz. *L'électricité solaire*, Paris, DUNOD, 1979.
- [11] A. Ricaud. *Photopile solaire*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes 1997.
- [12] M.Belarbi . *Conception et réalisation d'un débitmètre à ultrason en vue de son application dans le comptage des hydrocarbures*, PFE département électronique, ENP2002.
- [13] K.Achour, M.Benyahia. *Etude et réalisation d'un débitmètre électromagnétique*, PFE Département Electronique, USTHB 1983.
- [14] G. Chevalier, J.C. Chauveau. *Mérotech électronique*, Paris, CASTEILLA, 1989, pp.392-393.
- [15] P. Mayeux. *Apprendre la programmation des PIC*, Paris, DUNOD, 2002.
- [16] C. Tavernier. *Applications Industrielles des PIC*, Paris, DUNOD, 2001.
- [17] Bigonoff. *La programmation des PICS Seconde partie*, site Web : www.abcelectronique.com/bigonoff.
- [18] PIC16F8X Data Sheet, *Microchip*, 1999.
- [19] A. Hoque, K.A. Wahid. *New mathematical model of a photovoltaic generator (pvg)*. Journal of Electrical Engineering Vol. EE 28, No. 1, June 2000.
- [20] M. HADDADI. *L'énergie solaire*, séminaire, laboratoire d'énergie solaire ENP, 1999.

-
- [21] O. Hashimoto, T. Shimizu, G. Kimura. *A novel high performance utility interactive Photovoltaic inverter system*. IEEE IAS Conf. Rec., pp. 2255-2260, 2000.
- [22] Anca D. Hansen, Poul Sorensen, Lars H. Hansen, Henrik Blinder. *Models for standalone PV system 2000*, Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, ISBN 87-550-2774-1.
- [23] P. Wolfs, S. Senini, D. Butler. *A Low Cost High Efficiency Inverter for Photovoltaic Applications*. AUPEC2000 Innovation for Secure Power, 24-27 September 2000 Brisbane, Australia, Queensland University of Technology, pp 150-156.
- [24] T. Ikegami, T. Maezono, F. Nakanishi. *Estimation of Equivalent Circuit Parameters of PV Module and Its Application to Optimal Operation of PV System.*, Solar Energy Materials and Solar Cells Journal, ISSN 0927-0248 Vol 67 Issue 1-4, Mar-2001, pp 389-395.
- [25] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, Bocar Dada Sy. *Le Pompage photovoltaïque*, IEPF, Université d'Ottawa, EIER, CREPA., TJ912, pp.65, 1998.
- [26] A. Labouret, M. Villos. *Energie solaire photovoltaïque*, Paris, DUNOD, 2003, pp.21-144.
- [27] WWW.PVSYST.COM.
- [28] WWW.PHOTOWATT.COM.
- [29] WWW.SOLARIX.COM.
- [30] WWW.FIRT SOLAIR.COM.
- [31] WWW.MICROCHIP .COM.
- [32] WWW.UNIV-PAU.FR.

1. Les appareils de mesure de débit :

1.1. Compteurs volumétriques :

Ils mesurent le volume écoulé Q_v directement, en emprisonnant de façon répétée un volume élémentaire de fluide. Le volume total de liquide traversant le débitmètre pendant un laps de temps donné est le produit du volume élémentaire par le nombre d'emprisonnements. Ces appareils totalisent souvent le volume directement sur un compteur intégré, mais ils peuvent également délivrer une sortie impulsions qui peut être transmis sur un afficheur. Ils en existent plusieurs types selon le corps d'épreuve utilisé, à piston, à palettes (ou rotors), à roues ovales, à disque oscillant.

- Domaine d'utilisation : eau, acides, lubrifiants (surtout pas les boues...)
- Diamètre de canalisation : 10 à 300 mm
- Précision : 1 %
- Dynamique : 1-15

1.2. Débitmètres manométriques :

Par mesure de pression différentielle à l'aide d'organes déprimogènes. Ces débitmètres de type manométrique sont les plus utilisés pour la mesure des débits de fluide. Ils exploitent la loi de BERNOUILLI qui indique la relation existant entre le débit et la perte de charge résultant d'un changement de section de la conduite. Ces dispositifs sont utilisables que lorsque l'écoulement est turbulent. En partant de la relation $Q_v = S \times V$ et en supposant une masse volumique constante (fluide incompressible), on peut écrire l'équation de continuité :

$$Q_v = S_1 \times V_1 = S_2 \times V_2$$

Celle ci montre qu'avec un écoulement régulier et uniforme, une réduction de diamètre de la canalisation entraîne une augmentation de la vitesse du fluide, donc de l'énergie potentielle ou de la pression de la canalisation.

La pression différentielle est convertie en débit volumique, à l'aide de coefficients de conversion, selon le type de débitmètre manométrique utilisé et le diamètre de la conduite.

1.2.1. Diaphragme :

Il s'agit d'un disque percé en son centre, réalisé dans le matériau compatible avec le liquide utilisé. Le diaphragme concentrique comprime l'écoulement du fluide, ce qui engendre une pression différentielle de part et d'autre de celui-ci. Il en résulte une haute pression en amont et une basse pression en aval, proportionnelle au carré de la vitesse d'écoulement. C'est le dispositif le plus simple, le moins encombrant et le moins coûteux.

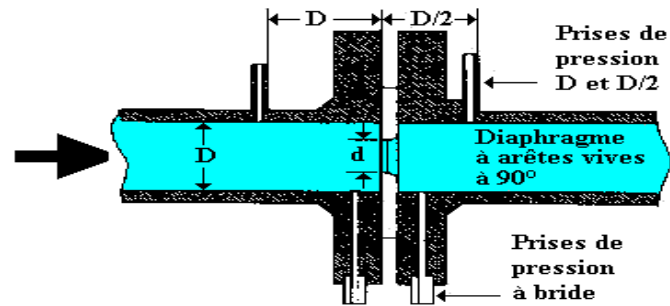


Figure A.1 Le diaphragme

- Domaine d'utilisation : ne convient pas aux liquides contenant des impuretés solides car celles-ci peuvent s'accumuler à la base du diaphragme. Il introduit une perte de charge importante.
- Diamètre de canalisation : tous diamètres disponibles
- Précision : 2 à 5 %
- Dynamique : 1-4

1.2.2. Tube de Venturi :

Il est constitué d'un tronc de cône convergent, d'un col cylindrique et d'un tronc de cône divergent. Le dispositif offre une bonne précision, mais reste coûteux et encombrant. Il dispose d'un bon comportement du point de vue perte de charge, usure et encrassement. Comme avec le diaphragme, les mesures de pression différentielle sont converties en débit volumique.

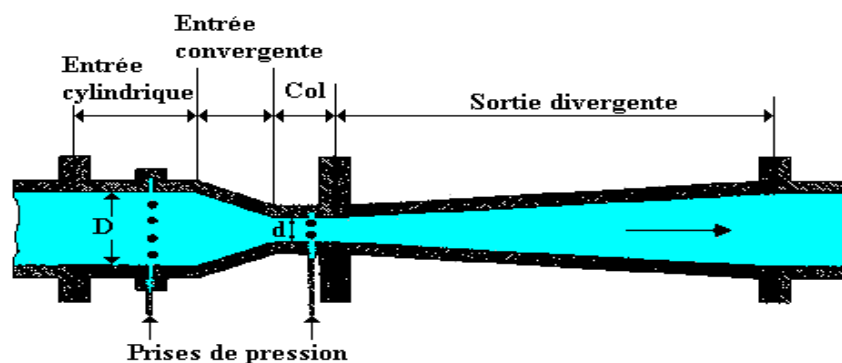


Figure A.2 Tube de Venturi

- Domaine d'emploi : liquide propre, gaz et vapeur
- Précision : 0,5 à 3 % selon les cas

1.2.3. Tuyère :

Elle est considérée comme une variante du tube de VENTURI.

L'orifice de la tuyère constitue un étranglement elliptique de l'écoulement, sans section de sortie rétablissant la pression d'origine.

Les prises de pression sont situées environ $\frac{1}{2}$ diamètre de la conduite en aval et 1 diamètre la conduite en amont.

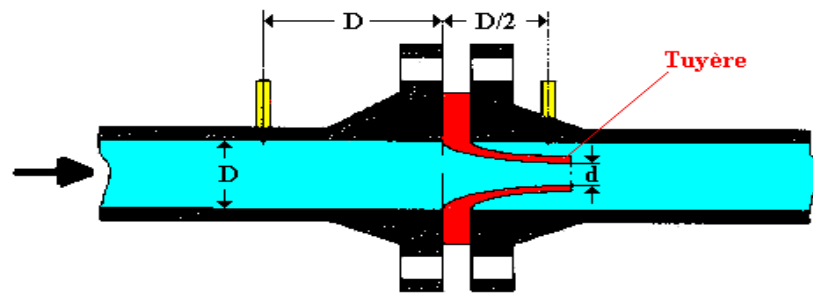


Figure A.3 Tuyère

La perte de charge se situe entre celle d'un tube de VENTURI et celle d'un diaphragme.

- Domaine d'utilisation : pour les turbulences importantes ($Re > 50000$), notamment dans les écoulements de vapeur à haute température. Ce dispositif est inutilisable pour les boues
- Précision : 1 à 3 %
- Dynamique : 1-4

1.2.4. Tube de PITOT :

La méthode consiste à utiliser deux tubes qui mesurent la pression en des endroits différents à l'intérieur de la canalisation. Ces tubes peuvent être montés séparément dans la conduite ou ensemble dans un seul boîtier. L'un des tubes mesure la pression d'arrêt (ou pression dynamique) en un point de l'écoulement. Le second tube mesure uniquement la pression statique, généralement sur la paroi de la conduite. La pression différentielle mesurée de part et d'autre du tube de PITOT est proportionnelle au carré de la vitesse.

- Domaine d'utilisation : pour les liquides propres ou visqueux, la mesure de débit de gaz, la variation de la vitesse d'écoulement entre la moyenne et le centre n'étant pas aussi importante qu'avec les autres fluides. Ils sont facilement bouchés par des corps étrangers présents dans le fluide
- Diamètre de canalisation : à partir de 300 mm et jusqu'à 3,8 m en France (9,6 m au USA)
- Précision : 1 à 2 % de la valeur réelle
- Dynamique : 1-4

La mesure de débit, réduite à la mesure des différences de pression Δp du fluide qui apparaît entre deux points situés en amont et en aval de l'étranglement de la conduite est donc réalisée par un capteur de pression différentielle. Un calculateur est alors nécessaire pour l'obtention d'un signal proportionnel au débit.

1.2.5. Débitmètre à cible :

Il comprend un disque (cible), centré dans une conduite. La surface de la cible est placée à 90° par rapport à l'écoulement du fluide. La force exercée par le fluide sur la cible permet une mesure directe du débit de fluide.

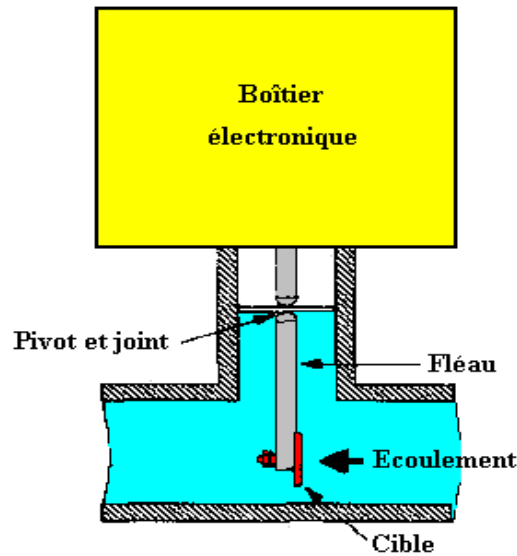


Figure A.4 Débitmètre à cible

Comme précédemment, le signal de sortie est une pression différentielle, un calculateur est nécessaire pour l'obtention d'un signal proportionnel au débit.

- Domaine d'utilisation : fluides chargés ou corrosifs
- Diamètre de canalisation : 15 à 1800 mm
- Précision : 1 à 2 % de la valeur réelle
- Dynamique : 1-3

1.2.6. Rotamètre :

Il est constitué d'un petit flotteur placé dans un tube conique vertical.

Le flotteur est en équilibre sous triple action de :

- Son poids ($M \cdot g$)
- De la force de poussée d'Archimède ($\rho \times g \times \text{volume du flotteur}$)
- De la poussée du liquide: $\rho \frac{scv^2}{2}$

M : masse du flotteur en kg

g : accélération de la pesanteur $9,81 \text{ m/s}^2$

ρ : masse volumique du liquide en kg/m^3

V : vitesse du fluide en m/s

S : surface du flotteur en m^2

C : coefficient de traînée du flotteur (sans unité)

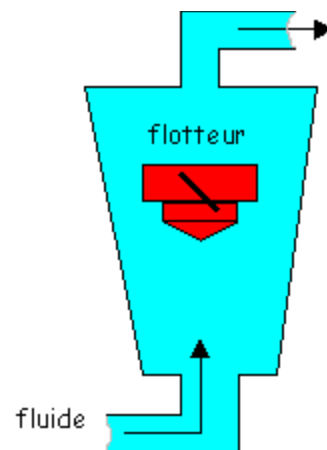


Figure A.5. Rotamètre

Le diamètre du tube en verre étant plus grand en haut qu'en bas, le flotteur reste en suspension au point où la différence de pression entre les surfaces supérieure et inférieure équilibre le poids. Une encoche dans le flotteur le fait tourner sur lui-même et stabilise sa position. Le repérage de la position du flotteur se fait par lecture directe sur le tube en verre qui est muni de graduations ou par l'intermédiaire d'un couplage optique ou magnétique entre le flotteur et l'extrémité du tube. Il introduit une perte de charge qui est fonction du débit et doit être étalonné dans ses conditions d'emploi.

- Domaine d'utilisation : Il ne tolère pas de haute pression (20 bars au maximum pour les modèles en verre). Souvent utilisés pour les débits de purge
- Diamètre de canalisation : 4 à 125 mm
- Précision : 2 à 10 % de l'étendue de mesure
- Dynamique : 1-10

1.3. Débitmètres de masse :

1.3.1. Débitmètre à effet CORIOLIS :

La force de CORIOLIS (Mathématicien français) explique notamment pourquoi les cyclones tournent dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère sud et dans le sens inverse dans l'hémisphère Nord. Il est question, dans un système en rotation, de la force qui agit perpendiculairement sur la masse en mouvement dans le système, selon le vecteur vitesse relative et sur l'axe de rotation du système. Pour une masse m se déplaçant à une vitesse v , dans un système en rotation ayant lui-même une vitesse angulaire a , la force de CORIOLIS vaut $F = 2 \times m \times a \times v$. Le débitmètre de CORIOLIS utilise comme détecteur un tube en U sans obstacle.

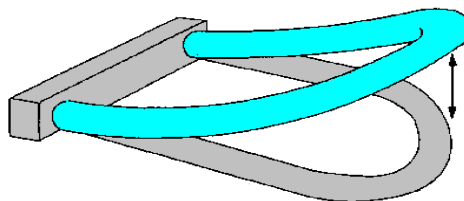


Figure A.6.

Le tube de mesure vibre à sa fréquence naturelle à l'intérieur du boîtier du capteur. Le tube de mesure est actionné par un bobinage électromagnétique situé au centre de la courbure du tube et vibre comme un diapason. Le fluide s'écoule dans le tube de mesure et est contraint de suivre le mouvement vertical du tube vibrant. Lorsque le tube monte pendant une moitié de sa période vibratoire, le fluide traversant le détecteur résiste à son entraînement vers le haut en repoussant le tube vers le bas.

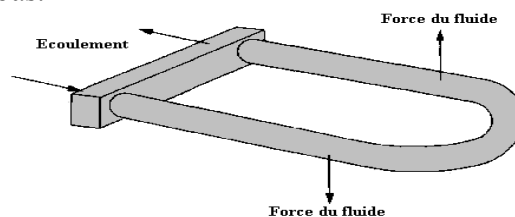


Figure A.7.

A la sortie du détecteur, le fluide a un mouvement ascendant, induit par le mouvement du tube. Lorsqu'il franchit le coude du tube, le fluide résiste aux modifications de son mouvement vertical en repoussant le tube vers le haut. La différence de forces entraîne une torsion du tube de mesure. Lorsque le tube descend pendant la seconde moitié de sa période vibratoire, il se tord dans le sens opposé. C'est cette caractéristique de torsion qui est appelé effet CORIOLIS. Du fait de la seconde loi de mouvement de NEWTON, l'amplitude de la torsion du tube de mesure est directement proportionnelle au débit massique du fluide traversant le tube. Les détecteurs électromagnétiques situés de part et d'autre du tube de mesure enregistrent la vitesse du tube vibrant. Le débit massique se détermine en mesurant la différence de temps entre les signaux de détecteurs de vitesse. En effet la torsion du tube de mesure, pendant l'écoulement du fluide, entraîne une différence de temps entre les deux signaux de vitesse. C'est cette différence de temps qui est directement proportionnelle au débit massique traversant le tube et demeure indépendante des propriétés de ce fluide.

- Domaine d'utilisation : liquide propre et visqueux (pâtes, boues). Ce dispositif exige l'absence de toute bulle de vapeur formée momentanément dans le liquide et susceptible de perturber la mesure
- Diamètre de canalisation : < 13 mm
- Précision : 1 %
- Dynamique : 1-50

1.3.2. Débitmètre massique thermique :

Le principe est basé sur la mesure des transferts calorifiques par le fluide lui-même. Ces dispositifs sont constitués d'un tube métallique à paroi mince, des résistances chauffantes sont bobinées à l'extérieur du tube, la circulation du fluide provoque un déséquilibre thermique entre l'amont et l'aval du tube, le déséquilibre est proportionnel au débit massique.

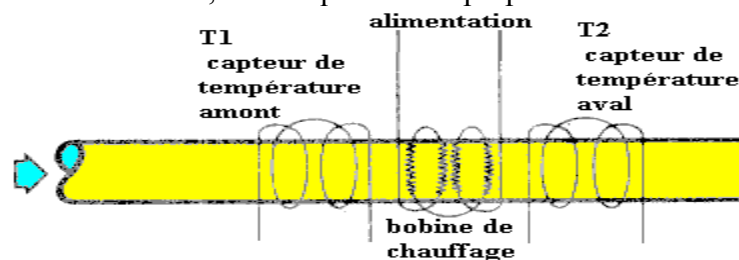


Figure A.8 Débitmètre massique thermique

- Domaine d'utilisation : liquide propre, gaz, vapeur
- Diamètre de canalisation : tous diamètres
- Précision : de l'ordre de 1 %
- Dynamique : 1-10

1.4. Débitmètres tachymétriques :

Les Débitmètres tachymétriques mesurent la vitesse d'écoulement pour la détermination du débit. Ils sont de différents types et leurs principes de mesures sont très différents

1.4.1. Débitmètre à turbine :

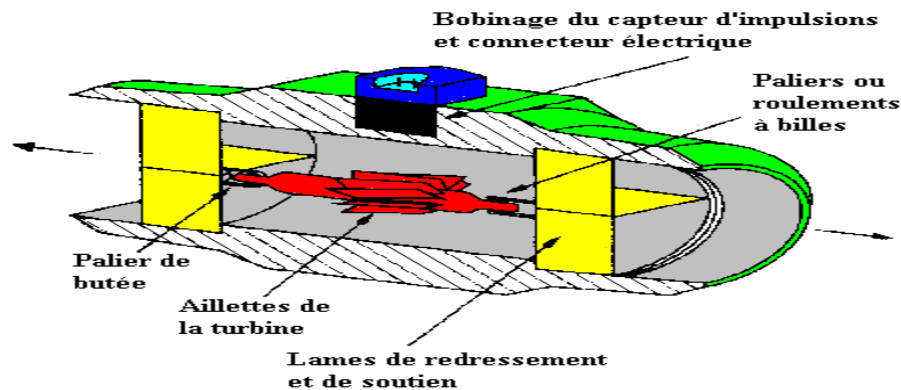


Figure A.9 Débitmètre à turbine

L'écoulement du fluide entraîne la rotation d'une turbine (rotor à plusieurs ailettes, reposant sur des paliers) placée dans la chambre de mesure, la vitesse de rotation du rotor est proportionnelle à celle du fluide, donc au débit volumique total.

La vitesse de rotation est mesurée en comptant la fréquence de passage des ailettes détectée à l'aide d'un bobinage (un aimant permanent est parfois solidaire de l'hélice). Chaque impulsion représente un volume de liquide distinct.

- Domaine d'utilisation : compatible avec de nombreux liquides (rotor en acier inoxydable). Toutefois la propreté du liquide est essentielle, afin de ne pas encombrer les paliers de butée du rotor qui peut tourner à haute vitesse. De par leur principe ils sont réservés aux fluides peu visqueux, exempt de bulles ou de matières granuleuses. Ils sont destinés aux applications industrielles générales (eau, alcools, carburants, acides, gaz liquéfiés, liquides cryogéniques...)
- Diamètre de canalisations : 10 mm à 30 cm environ
- Précision : 0,2 à 2 % de l'étendue de mesure, selon les appareils
- Temps de réponse : plusieurs millisecondes

1.4.2. Débitmètre à effet Vortex :

Le principe est basé sur le phénomène de génération de tourbillons, appelé effet Karman. Lorsque le fluide rencontre un corps non profilé, il se divise et engendre des tourbillons, de part et d'autre et en aval du corps non profilé. Le nombre de tourbillons formés en aval par unité de temps est proportionnel au débit moyen. Une vitesse précise d'écoulement du fluide est déterminée par le comptage des tourbillons. Cette vitesse est mesurée à l'aide d'un capteur sensible aux variations oscillatoires de pression.

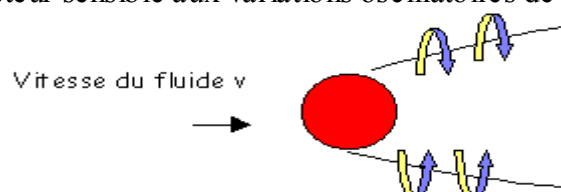


Figure A.10. Débitmètre à effet Vortex

Vitesse du fluide = fréquence des tourbillons / facteur K.

Le facteur K dépend du nombre de REYNOLDS, mais est pratiquement constant sur une vaste plage de débit.

- Domaine d'utilisation : Il est destiné aux liquides propres, gaz ou vapeur et non recommandé pour la mesure de faibles débits. Il entraîne une perte de charge, supporte des vitesses de fluide importantes
- Diamètre de canalisations : 12 à 500 mm
- Précision : 1 %
- Bonne dynamique : 1-20

1.4.3. Débitmètre à ultrasons :

Un émetteur et un récepteur sont montés en opposition de manière à ce que les ondes acoustiques allant de l'un à l'autre soient à 45 ° par rapport au sens d'écoulement dans la conduite. La vitesse du son allant de l'émetteur au récepteur constitue la vitesse intrinsèque du son, plus un apport dû à la vitesse du fluide. La mesure du temps t mis par le signal pour parcourir la distance L permet de connaître la vitesse du fluide et d'en déduire le débit.

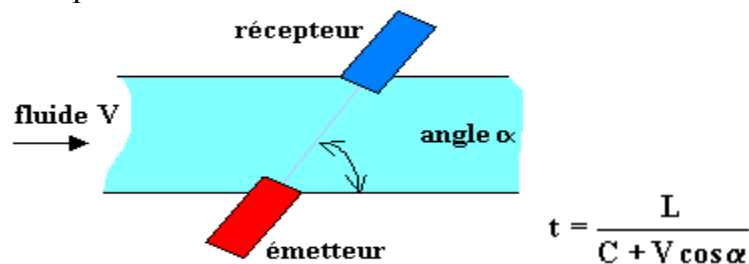


Figure A.11. Débitmètre à ultrasons

C : vitesse de propagation du son dans le fluide.

V : vitesse du fluide.

L : distance entre émetteur et récepteur.

Il est primordial que le fluide ne véhicule pas de gaz ou de solides, pour éviter la dispersion des ondes acoustiques entre les deux transducteurs. L'ensemble du dispositif, à l'extérieur de la conduite, est insensible à l'agressivité du fluide et n'entraîne aucune perte de charge.

- Domaine d'utilisation : fréquemment utilisé pour les écoulements turbulents, pour les fluides non conducteurs (notamment hydrocarbures), là où les débitmètres électromagnétiques ne conviennent pas
- Diamètre de canalisations : généralement important (6000 mm)
- Précision : peut atteindre 0,5 %
- Temps de réponse très rapide, jusqu'à 1 ms

1. Circuits électroniques réalisés :



Figure B.1. Circuit de l'émetteur

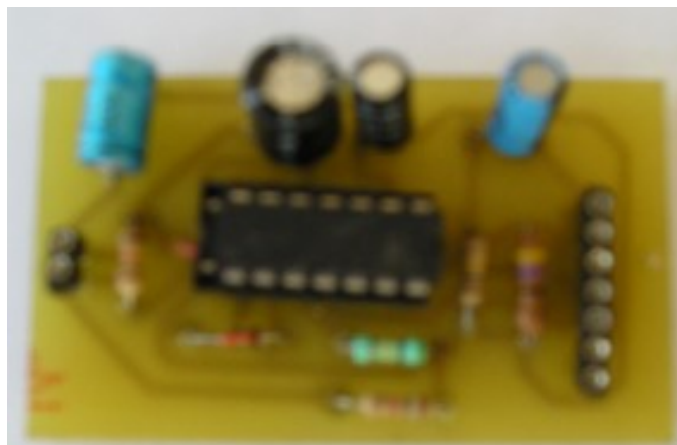


Figure B.2. Circuit de récepteur



Figure B.3. Circuit de traitement

2. Nomenclature :

- ✚ Résistances
 - 1 x 1 Ω .
 - 1 x 2.2 Ω .
 - 1 x 39 Ω .
 - 1 x 47 Ω .
 - 1 x 80 Ω .
 - 1 x 100 Ω . (variable)
 - 1 x 200 Ω .
 - 1 x 1 k Ω .
 - 1 x 1 k Ω . (variable)
 - 3 x 10 k Ω .
 - 2 x 100 k Ω .
 - 1 x 200 k Ω .
 - 1 x 500 k Ω .

- ✚ Condensateurs
 - 5 x 1 μF .
 - 1 x 0.1 μF .
 - 1 x 2.2 μF .
 - 1 x 10 μF .
 - 1 x 100 μF .
 - 1 x 470 μF .
 - 1 x 1000 μF .
 - 1 x 10 nF.
 - 2 x 33 nF.
 - 1 x 39 nF.
 - 1 x 100 nF.
 - 2 x 16 pF.
 - 2 x 47 pF.

- ✚ Circuit intègres
 - 2 x LM3246
 - PIC 16F876
 - TDA2003.
 - 24C64.
 - MAX232.

- ✚ Divers
 - Afficheur LCD.
 - Quartz 32KHz.
 - Quartz QZP4MEG.
 - 2 x Connecteur CON 2.
 - 2 x Connecteur CON 4.
 - Connecteur CON 5
 - Connecteur CON 10
 - Connecteur DB9

3. Programme :

```

//configuration du preprocesseur de la PIC 16F876//
#include <16F876.h>
#define adc=10
#include <delay(clock=4000000)>
#include <fuses XT,NOWDT,NOLVP>
//d, finition d'une variable programme
#define EEPROM_SCL PIN_c3
#define EEPROM_SDA 60
#define Clk=5.1
//configuration de la liaison RS232//
#include <rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7)>
//configuration du bus i2C//
#include <i2c(master,sda=PIN_C4,scl=PIN_C3)>
#include <LCD.C>
#include <2465.C>
#define zero_ram
#define rom 0x2100={0,0}
char sec,min,heure,jour,mois,annee;
char month[12]={31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31};
unsigned long p_memoire;
unsigned long int_debit;
float f_debit;
short Active;
void save_p()
{
    write_eeprom(0,p_memoire);
    write_eeprom(1,&p_memoire+1);
}
void load_p()
{
    p_memoire = read_eeprom(0);
    &p_memoire+1 = read_eeprom(1);
}
void save_inf_rom()
{
    load_p();
    write_ext_eeprom(p_memoire,int_debit);
    write_ext_eeprom(p_memoire+1,&int_debit+1);
    write_ext_eeprom(p_memoire+2,min);
    write_ext_eeprom(p_memoire+3,heure);
    write_ext_eeprom(p_memoire+4,jour);
    write_ext_eeprom(p_memoire+5,mois);
    write_ext_eeprom(p_memoire+6,annee);
    p_memoire+=7;
    save_p();
}
float calc_debit(long a)

```

```

{
float b;
b=a;
return(b/255.75);
}
void send(long a)
{
putc(read_ext_eeprom(a));
}

void send_to_pc(long a)
{
char b;
for(b=0;b<7;b++) send(a+b);
}

void affichage()
{
printf(lcd_putc, "\f%2u:%02u %02u/%02u/20%02u\n Debit=%2.2f
l/s", heure, min, jour+1, mois+1, annee, f_debit);
}
//sous programme d'interuption //

#int_RDA
RDA_isr()
{
char a;
long b;
a=getc();
switch(a)
{
case 200:
load_p();
for(b=0;b<p_memoire;b+=7)
{
send_to_pc(b);
putc(200);
}
putc(203); // Fin de transmission
break;

case 201:
min = getc();
heure = getc();
jour = getc();
mois = getc();
annee = getc();
break;
}
}

```

```

case 202:
    p_memoire=0;
    save_p();
    break;

case 204:
    putc(204);
    break;
}
}
#endif
TIMER_amina()
{
    Clk=!Clk;
}

#endif
rtc_isr()
{
    static char loop=0;
    loop++;
    if(loop==30)
    {
        int_debit=read_adc();
        f_debit=calc_debit(int_debit);
        affichage();
        loop=0;
    }
}

#endif
TIMER1_isr()
{
    disable_interrups(int_timer2);
    sec++;
    if(sec==30)
    {
        min++;
        sec=0;
        int_debit=read_adc();
        f_debit=calc_debit(int_debit);
        save_inf_rom();
        if(active) affichage();
    }
    if(min==60) {heure++;min=0;}
    if(heure==24) {heure=0;jour++;}
    if(jour==month[mois]) {jour=0;mois++;}
    if(mois==12) {mois=0;annee++;}
    if(annee==99) annee=0;
}

```

```

        enable_interrupts(int_timer2);
    }

//programme principal//
void main()
{
    if(restart_cause()==MCLR_FROM_SLEEP)
    {
        lcd_init();
        lcd_putc("\f Activation du\n systeme !");
        delay_ms(1000);
        set_tris_a(1);
        setup_adc_ports(RA0_ANALOG);
        setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_8);
        set_adc_channel(0);
        delay_us(10);
        setup_spi(FALSE);
        setup_counters(RTCC_INTERNAL,RTCC_DIV_256);
        setup_timer_1(T1_EXTERNAL|T1_DIV_BY_1|T1_CLK_OUT);
        setup_timer_2(T2_DIV_BY_4,125,1);
        setup_ccp1(CCP_PWM);
        setup_ccp2(CCP_OFF);
        init_ext_eeprom();
        Active=1;
        f_debit=0;
        int_debit=0;
        enable_interrupts(INT_RDA);
        enable_interrupts(INT_TIMER2);
        enable_interrupts(INT_TIMER1);
        enable_interrupts(INT_RTCC);
        enable_interrupts(global);
        while(1);
    }
    else
    {
        lcd_init();
        lcd_putc("\f Appuyer sur\n le bouton !");
        disable_interrupts(global);
        Active=0;
    }
}

```

ملخص

في مجال الطاقات المتجددة، التي تشكل بديلا حقيقيا للطاقات الباطنية، الطاقة الشمسية سيلتزم شأنها لا محالة في المستقبل القريب. من خصوصيات الطاقة الشمسية أنها نشطة، من بين ميادين استعمال هذه الأخيرة نجد الضخ الكهروضوئي. ولاستغلال أمثل لجهاز الضخ الكهروضوئي، مراقبة تدفق الماء يعدّ جدّ مهم. في هذه المذكرة اهتمامنا منصبّ على دراسة وإنجاز جهاز كهرومغناطيسي لقياس التدفق. مختلف مراحل إنجاز الرّاصد الكهرومغناطيسي للتدفق و جهاز التحكم الإلكتروني المرافق له المبني أساسا على المعالج 16f876 قد تمّ توضيحهم. الاختبارات و النتائج التجريبية المتحصل عليها عن طريق الجهاز الإلكتروني و كذلك التطلعات المستقبلية نهي من خلالها هذه المذكرة.

الكلمات المفتاحية

الضخ الكهروضوئي - تدفق الماء - جهاز كهرومغناطيسي لقياس التدفق - إنجاز

Résumé

Dans le domaine des énergies renouvelables, qui sont une alternative réelle aux énergies fossiles, l'énergie solaire sera sans doute appelée à jouer un rôle très important dans le futur. L'énergie solaire photovoltaïque est particulièrement attractive. L'une de ses applications les plus importantes est le pompage photovoltaïque.

Dans cette utilisation, le contrôle du débit de l'eau s'avère très important. Dans ce mémoire nous nous intéressons à l'étude et à la réalisation d'un débitmètre électromagnétique. Les différentes étapes de la conception et de la réalisation du capteur électromagnétique et de son dispositif de commande à base du PIC 16F876 sont présentées. Les tests et les résultats expérimentaux obtenus ainsi que les perspectives à ce travail terminent ce mémoire.

Mots clés

Pompage photovoltaïque - Débit de l'eau - Débitmètre électromagnétique - Conception.

Abstract

Among renewable energies, which are a real alternative to fossil energy, solar energy is being the most prominent energy for the future. The Photovoltaic energy is particularly attractive. One known application of this latter is the photovoltaic pumping of water.

For an optimal exploitation of a photovoltaic pumping system the control of the water flow is very important. In this thesis, we present the study and the design of an electromagnetic flow meter. The different steps of the design of the electromagnetic flow sensor and the microcontroller PIC 16F876 based electronic control circuit are presented. Tests and measurements obtained with this flow meter together with the perspectives of this work terminate this thesis.

Keywords

Photovoltaic pumping - Water flow - Electromagnetic flow meter - Design