

### **III.5.1 Système autonome avec batterie :**

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. Par exemple, ce système est bien adapté pour l'éclairage d'une maison où il faut de l'électricité lorsqu'il ne fait plus jour.

### **III.5.2 Système autonome sans batterie :**

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (ex. : calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex. : pompe à eau).

### **III.5.3 Système hybride PV/génératrice :**

Ce système utilise les avantages de l'énergie photovoltaïque et de la génératrice au diesel, au propane ou à l'essence. Le système photovoltaïque fournit une énergie intermittente mais souvent moins coûteuse en régions isolées ou éloignées. La génératrice sert d'énergie d'appoint, selon la demande. Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport du carburant sont élevés et où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système photovoltaïque seul avec les batteries. Les systèmes hybrides PV/générateurs sont souvent utilisés pour les tours de télécommunications ainsi que pour les refuges et les camps forestiers en régions éloignées. Ils peuvent également être couplés avec d'autres sources d'énergie telles les éoliennes et les microcentrales hydrauliques, lorsqu'il y a une complémentarité des productions électriques.

### **III.5.4 Système PV centralisé :**

Ce système fonctionne comme une centrale électrique normale mais doit tenir compte de la fluctuation de la production d'énergie qui est liée à l'ensoleillement.

### **III.5.5 Système PV sur réseau décentralisé :**

Ce système photovoltaïque est branché directement sur un réseau électrique, mais il est installé près de la demande. Il peut être installé, par exemple, sur une résidence individuelle ou sur un centre commercial, de telle sorte qu'il alimente cette charge et fournit l'excédent de sa production sur le réseau durant le jour. Durant la nuit, la charge puise l'énergie requise sur le réseau. Ce système permet de diminuer les frais de transport d'électricité et la surcharge de ligne, particulièrement en ce qui a trait aux charges adaptées à la production photovoltaïque tels

les systèmes d'air conditionné (gestion de la demande). Ce système permet aussi d'éviter le stockage classique sur batteries (d'où réduction du coût global).

### III.5.6 Système PV sur réseau diesel :

Ce système est utilisé principalement dans les communautés ou les villages éloignés. Le générateur PV est branché en parallèle avec les génératrices au diesel du réseau villageois et fournit l'électricité sur ce réseau lorsque l'ensoleillement le permet. Il permet de réduire la consommation d'un carburant diesel très coûteux en régions éloignées et diminue les temps de fonctionnement des génératrices.

## III.6 Protection des systèmes solaires photovoltaïques

### III.6.1 Protection par diodes

Le choc électrique doit être évité aux cellules, car c'est des éléments fragiles, elles peuvent être détruites par un échauffement excessif par effet Joule si elles deviennent réceptrices de courant. A cet effet, les modules doivent être protégés par des diodes.

Les diodes séries : Un module peut devenir récepteur du courant fourni par les autres séries de modules ayant une tension plus élevée. Pour empêcher la batterie de se décharger la nuit dans les photopiles, ou pour empêcher une série de modules contenant un module défaillant ou masqué, une diode "anti retour" est intégré dans chaque série [16].

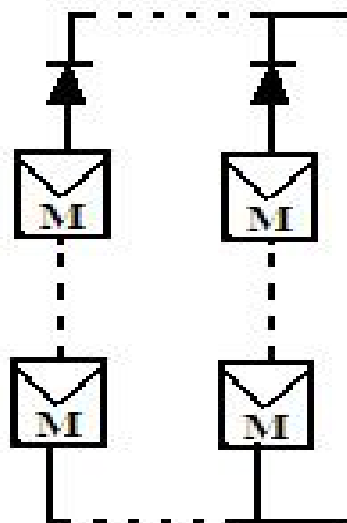


Fig. III-3 Protection par diodes en série.

### III.7 Le câblage

Le câblage a pour but de regrouper électriquement les modules solaires. Généralement, les modules sont câblés tout d'abord en série pour réaliser des branches qui comportent chacune leur diode en série.

La mise en parallèle de branches est réalisée, pratiquement, à l'aide de boîtes de jonction fixées sur les châssis. Il est indispensable d'apporter un soin particulier au serrage des cosses et au câblage d'une installation. Une chute de tension trop importante dans les connexions et dans les câbles peut réduire considérablement le courant de charge de la batterie. Cette chute de tension est loin d'être négligeable lorsque de forts courants sont fournis sous de faibles tensions. Cette contrainte impose l'utilisation de câbles résistant aux intempéries et dont la section sera fonction de la distance entre panneau solaire et batterie [17].

### III.8 Avantages et Inconvénients de l'énergie Photovoltaïque [18]

#### III.8.1 Principaux avantages de l'énergie photovoltaïque :

- ✓ Energie solaire gratuite.
- ✓ Pas de pollution.
- ✓ Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- ✓ Sa structure fixe.
- ✓ Son coup de maintenance bas.
- ✓ Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- ✓ L'installation ne produit aucun bruit.
- ✓ Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière

#### III.8.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

- ✓ Le coût élevé de l'installation.
- ✓ Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
- ✓ La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- ✓ Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.
- ✓ Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement.

### III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a détaillé de façon relativement brève tous les éléments nécessaires afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes PV ; on a présenté une description générale des systèmes photovoltaïques, parmi les éléments les plus importants, dont on a parlé dans ce chapitre, sont :

- La partie production d'énergie.
- Le stockage de l'énergie avec les accumulateurs et leur principe de fonctionnement ainsi que leurs caractéristiques.
- Enfin, nous avons étudié l'adaptation d'un générateur PV à une charge à l'aide de différents types des convertisseurs.

### III.10 Bibliographie chapitre III

- [1] A. Hamidat, A. Hadj Arab et M. Belhamel, « Etude et réalisation d'une mini centrale photovoltaïque hybride pour l'électrification du refuge Assekrem » *Revue des Energies Renouvelables* ; **10 (2)** : 265 – 272, 2007.
- [2] S. Zaamta, A. Dib, "Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs" *Revue des Energies Renouvelables* ; **12 (1)** : 137 – 147, 2009.
- [3] Y. Azoumah, D. Yamegueu, P. Ginies, Y. Coulibaly, P. Girard, "Sustainable electricity generation for rural and peri-urban populations of sub-Saharan Africa: The flexy-energy concept" *Energy Policy*; **39**: 133-134, 2011.
- [4] D.Linden, T.B. Reddy, "Handbook of Batteries, 3rd Edition". Edition McGraw-Hill, INC New York 2002.
- [5] Julien LABBÉ, "L'hydrogène Electrolytique Comme Moyen De Stockage D'électricité Pour Systèmes Photovoltaïques Isoles" thèse de doctorat ; l'Ecole des Mines de Paris ; 2006.
- [6] Théodore Wildi, *Electrotechnique 2*, édition ESKA, presses de l'Université de Laval, 1991.
- [7] Centrales photovoltaïques – Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets ; 1996, 252 pages.
- [8] D. Berndt, "Valve-regulated lead-acid batteries" *Journal of Power Sources*; **100**: 29-46, 2001.
- [9] Linden D, "Handbook of Batteries and fuel cells", Mc Graw-Hill Inc, Third edition, 2002.
- [10] Jimmy Royer et Eric Schiller, *Pompape photovoltaïque*, édition Multi mondes, IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA, 1998.
- [11] Théodore Wildi, *Electrotechnique 2*, édition ESKA, presses de l'Université de Laval, 1991.
- [12] M. Belarbi "Modélisation et Simulation d'un Système de pompape photovoltaïque" Mémoire de magister en électronique Université des sciences et de la technologie d'Oran, juin 2006.
- [13] B. Mamri, M. Zaidi "contribution de système photovoltaïque avec pompape", Mémoire d'ingénieur en électronique, Université de Constantine, 2006.
- [14] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07
- [15] MEHDAOUI AHMED " Identification par Rauschenbach et par Neuro-Flou du Point de Puissance Maximal du Générateur Photovoltaïque d'un Système Solaire En Milieu Saharien " thèse de magister ; Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique d'ORAN ; 2007.
- [16] Ressources Naturelles Canada, "Technologie et application – Photovoltaïque ; Intégration des panneaux solaires aux immeubles "
- [17] BENCHERIF Mohammed "Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension " thèse de doctorat, Département De Physique, Université Abou-Bekr Belkaid Tlemcen, 2012.
- [18] F. Kininger, "Photovoltaic Systems Technology", University of Kassel, 2003.

# CHAPITRE IV

## IV.1 Introduction

Pour étudier la gestion d'une mini-station solaire photovoltaïque ; on doit d'abord connaître les différents dispositifs de base, leur conception et leur principe de fonctionnement.

On doit établir par la suite une étude théorique des différents dispositifs dont nous avons besoin afin de surveiller et d'évaluer le rendement de la centrale solaire.

Enfin on va déterminer les composants électroniques constituant ces appareils en expliquant leur mode de fonctionnement, en tenant compte du prix, la durée de vie et leur consommation en électricité.

## IV.2 Pyranomètre :

Le pyranomètre est un appareil qui nous permet de mesurer la puissance du rayonnement solaire globale sur une surface horizontale figure (III-4). Il comprend une double coupelle de verre, une thermophile qui se compose par une série de thermocouples et un système d'enregistrement de la force électromotrice produite par la thermophile sous l'action d'un rayonnement. L'exposition à la radiation solaire produit une différence de température entre les secteurs noirs et les secteurs blancs.

La différence de température est détectée par la thermophile qui convertie l'énergie thermique en énergie électrique. Ce courant peut être mesuré et amplifié et le signal de quelques millivolts est converti par un facteur de calibrage en un flux en watt par mètre carré. Les coupelles de verre filtrent la bande de longueurs d'onde à mesurer (en général de 0,3 à 3mm) et limitent la condensation de vapeur d'eau.

Afin de mesurer uniquement le rayonnement diffus, on ajoute un pare-soleil (bande métallique circulaire) qui va protéger le pyranomètre du rayonnement solaire direct.

Le pyranomètre, appelé également " solarimètre " dans le passé, fait partie de l'instrumentation classique des parcs météorologiques ; il est placé sur une surface horizontale [1].

### **IV.3 DATALOGGER (enregistreur de données) :**

C'est un dispositif électronique qui nous permet d'enregistrer des valeurs de mesure de paramètres physiques individuelles, et des séries de mesure sur une longue période.

Les grandeurs sont mesurées de façon complètement automatique, numérisées et enregistrées sur un support généralement numérique.

Les données peuvent être affichées sur un afficheur et peuvent être transmises à un ordinateur, doté d'un logiciel qui permet de visualiser ces données afin de les analyser.

Les grandeurs mesurées dépendent du type d'enregistrement des données ; elles peuvent être : température, humidité, tension, intensité, vitesse, pression, position GPS ...etc.

Ces enregistreurs de données sont utilisés souvent dans les milieux industriels pour pouvoir contrôler les systèmes et pouvoir les diagnostiquer. Selon l'application, l'enregistreur de données peut être autonome ou alimenté par batterie ou par panneaux solaires (exemple : système de mesure en milieu externe).

Le plus souvent, ces enregistreurs sont munis d'un système d'affichage de type LCD qui permet d'accéder à un menu de configuration, et d'afficher les valeurs mesurées.

Un tel système doit être muni d'un dispositif de stockage afin de permettre l'enregistrement des mesures effectuées, le dispositif peut être une mémoire interne ou une mémoire externe (carte mémoire, flashdisk, disquette ...). La connexion de l'enregistreur au PC se fait par interface série (RS 232), USB, LAN, Wifi ou Bluetooth [2].

### **IV.4 Suiveur de Soleil :**

Au niveau des pays qui se caractérisent par un climat tempéré, l'augmentation de performance entre les panneaux fixes correctement orientés (plein sud) et les trackers varie de 30 % à 45 % selon le tracker.

Le système de poursuite (suiveur) solaire est un dispositif qui permet d'orienter de manière optimale un panneau solaire ou un héliostat vers le soleil. Son principe de fonctionnement est de s'orienter vers le Soleil au cours de la journée, ce qui a pour effet d'augmenter la production d'énergie de manière substantielle.



La puissance électrique produite par un système solaire photovoltaïque dépend de l'intensité du flux lumineux selon la position du soleil qui varie le long de la journée.

La position du soleil varie constamment, à la fois pendant la journée, mais également durant les différentes périodes de l'année. Le suiveur solaire permet de placer au mieux le panneau par rapport au positionnement du Soleil (perpendiculaire au rayonnement si possible) [3].

En effet, il y a plusieurs techniques pour le suivi du soleil par le panneau solaire pour augmenter le rendement énergétique ; ces techniques sont divisées en deux catégories : la technique de poursuite sensible (ou bien optique), et la technique de poursuite aveugle (ou bien astronomique).

#### IV.4.1 Type de suiveur solaire :

##### a) Poursuite sensible

Dans ce type, la sensibilité est assurée par la détection du flux lumineux sur la surface des cellules photosensibles. Les cellules utilisées sont de dimensions égales et elles sont disposées de tel sort qu'elles délivrent un courant maximum au sens de flux lumineux plus intense. Pour ce type d'automatisme, il existe plusieurs schémas dont les plus simples se composent des circuits construits à partir des photo résistances (LDR) qui commande deux relais à travers un circuit comparateurs [4].

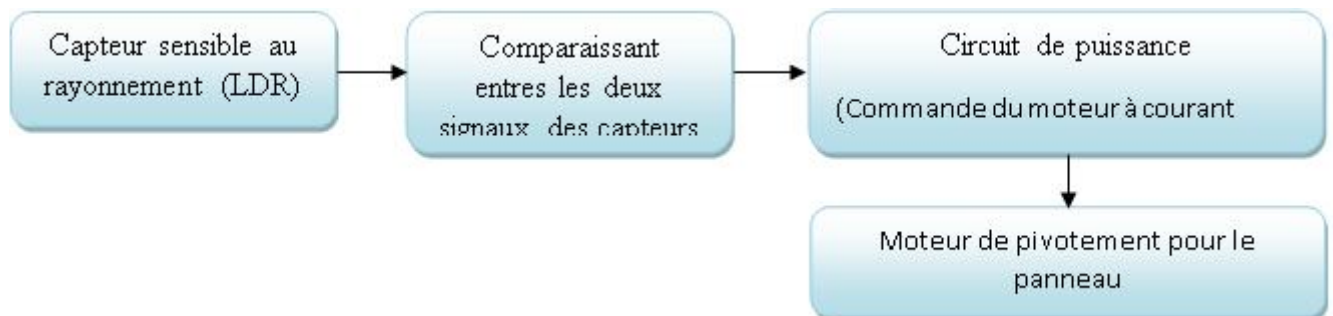


Fig. IV-1 Schéma synoptique d'un traqueur solaire sensible

##### b) Poursuite aveugle

Cette poursuite, Permet d'une manière automatique un suivi continu du soleil sans prendre en compte sa visibilité effective. Le principe de la poursuite aveugle consiste à utiliser les coordonnées du soleil par calcul mathématique en connaissant la latitude et la longitude du

site correspondant [4], et sachant que la trajectoire du soleil est la même (périodique) pour le même jour de chaque année. (Exemple : les coordonnées du soleil pour le 15 juin 2015 sont les mêmes que celles du 15 juin 2001).

#### IV.4.2 L'utilité des suiveurs solaire

Quand un panneau photovoltaïque est placé fixe par rapport au sol et orienté vers le sud (implantation en hémisphère nord), son rendement énergétique n'est pas constant au cours de la journée : en début et en fin de journée, le mauvais angle d'éclairement du panneau diminue le rendement de la production électrique.

Lorsqu'un système suiveur oriente le panneau solaire en le faisant pivoter en direction du soleil et en maintenant en permanence un angle d'incidence des rayons idéal, voisin de  $90^\circ$ , la production électrique par  $m^2$  de panneau atteint alors son maximum.

La **fig IV-2** est un diagramme comparatif de production électrique qui nous montre pour une journée ensoleillée d'été, le gain de production électrique obtenu en passant d'une installation fixe à une installation munie d'un suiveur de trajectoire solaire.

Toutefois, à titre énergétique, la technologie avec suiveur ne se justifie qu'à la condition où la commande des mouvements de suivi ne gaspille pas une partie importante du surplus de l'énergie photovoltaïque produite [5].

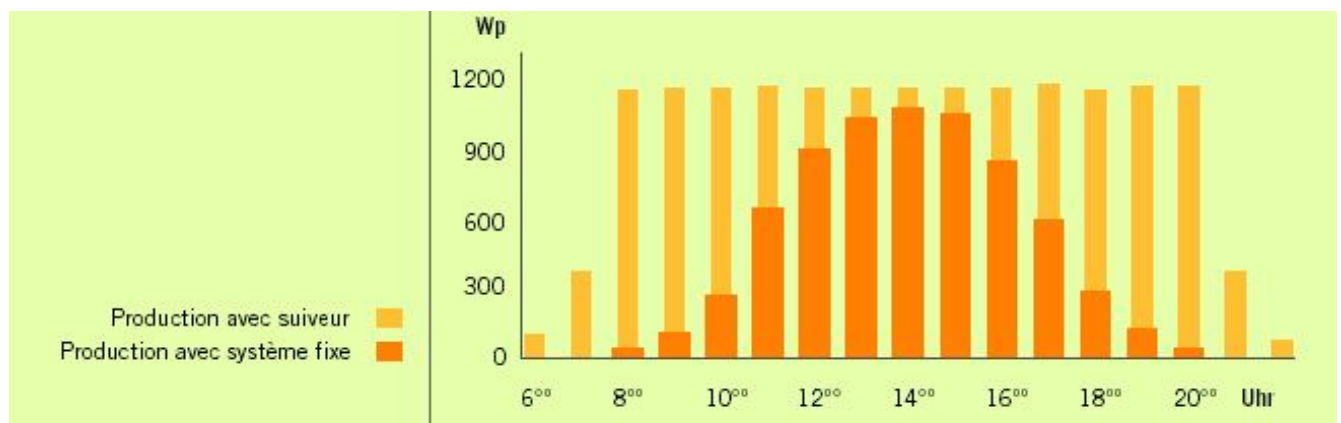


Fig. IV-2 Diagramme de comparaison entre la production avec suiveur et la production avec système fixe

### IV.4.3 Les Capteurs :

Un capteur est un dispositif qui a un rôle de capter et de transformer une grandeur physique d'entrée en une grandeur de nature électrique.



Fig. IV-3 Schéma principal d'un capteur.

Parmi les différents capteurs utilisés dans le cadre de cette étude, on cite :

#### a) Capteur de courant :

La méthode la plus simple pour mesurer le courant traversant un module PV est de mettre une résistance d'une valeur relativement faible, généralement de  $1\Omega$  ; ainsi, la loi Ohm se simplifie et donne  $V=I$  ; donc, notre carte d'acquisition mesure une tension, que l'on peut lire en Ampère.

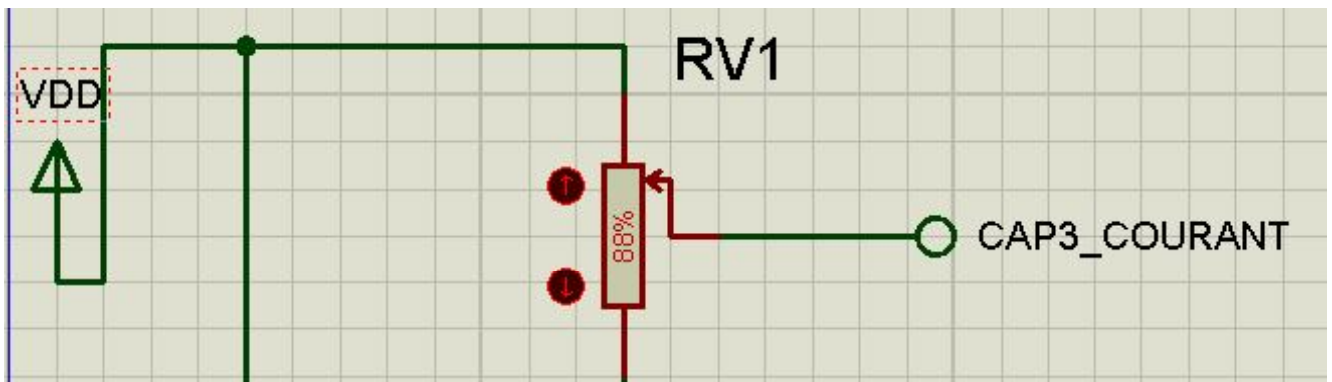


Fig. IV-4 Schéma partiel du capteur de courant [6]

**b) Capteurs de température :**

Afin d'effectuer une mesure de température, il est nécessaire dans un premier temps de convertir la température en tension analogique (ce qui est assuré par l'électronique interne du capteur) et ensuite dans un second temps, convertir cette tension en valeur numérique (par programmation du module ADC interne du microcontrôleur PIC16F716). Le synoptique ci-dessous représente ces deux étapes de conversion ; dans ce montage, nous avons utilisé le capteur LM35DZ.

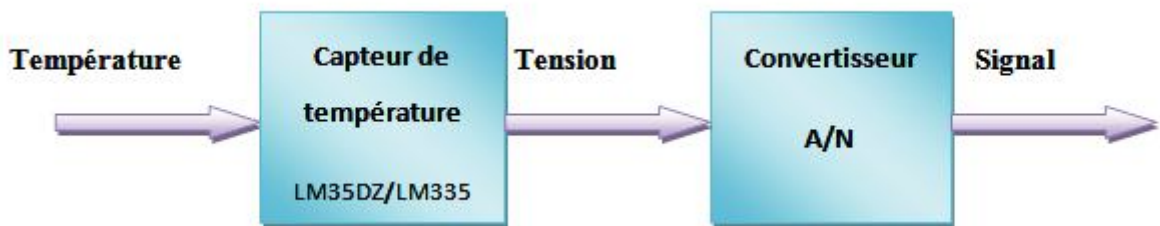


Fig. IV-5 Schéma synoptique de la mesure de température.

**c) Capteur de température LM35DZ :**

Le capteur de température est un LM35DZ qui peut mesurer une température entre 0 et +100°C, il fournit une tension proportionnelle à la température dont la résolution est de 10 mV/°C. Cette tension est lue périodiquement par la carte de contrôle puis convertie en numérique et envoyée vers l'afficheur LCD. Nous avons opté pour un affichage en degré Celsius [7].

**d) La photodiode (BPW21)**

Une photodiode est considérée comme la photo détectrice de base de la majorité des capteurs optoélectroniques. C'est l'élément d'extrémité chargé de convertir l'énergie lumineuse en une énergie électrique. La photodiode, sous éclairage, produit un courant qui dépend de sa sensibilité spectrale et du flux lumineux incident [8]. La photodiode BPW21 est utilisée dans le spectre du visible.

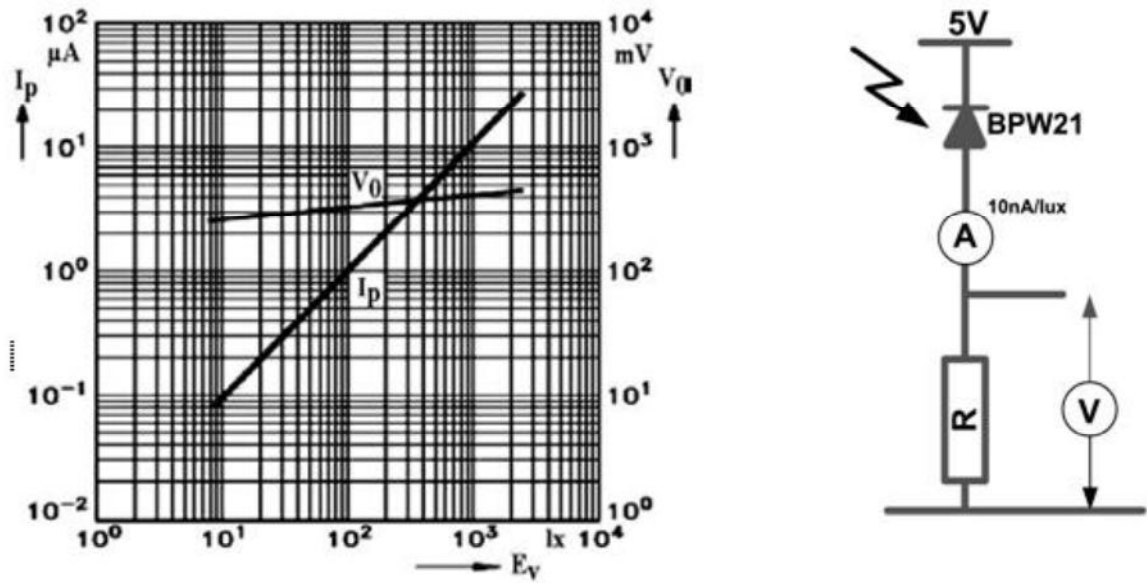


Fig. IV-6 Caractéristique de la photodiode utilisée (BPW21)

e) La photodiode (BPW34)

La photocellule BPW34 est une photodiode utilisée dans le proche infrarouge. Le courant inverse d'une diode dépend des porteurs minoritaires. En effet, ils sont très peu nombreux. Des photons d'énergie suffisante peuvent créer des paires électrons - trous. Le courant créé dépend du nombre de photons ayant une énergie supérieure à l'énergie de gap du semi-conducteur [9].

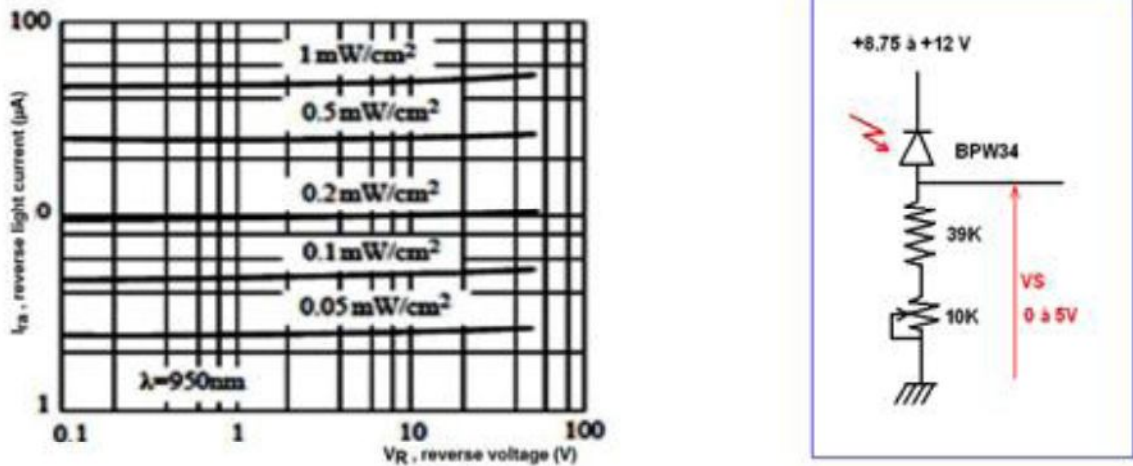


Fig. IV-7 Caractéristique de la photodiode utilisée (BPW34)

### IV.4.4 Afficheurs

#### a) Les afficheurs 7 segments :

Ce type d'afficheur est souvent présent au niveau des appareils de mesures, des calculatrices et des montres numérique : les caractères (des chiffres, bien que quelques lettres soient utilisées pour l'affichage hexadécimal) s'écrivent en allumant ou en éteignant des segments, au nombre de sept. Quand les 7 segments sont allumés, on obtient le chiffre 8 [6].

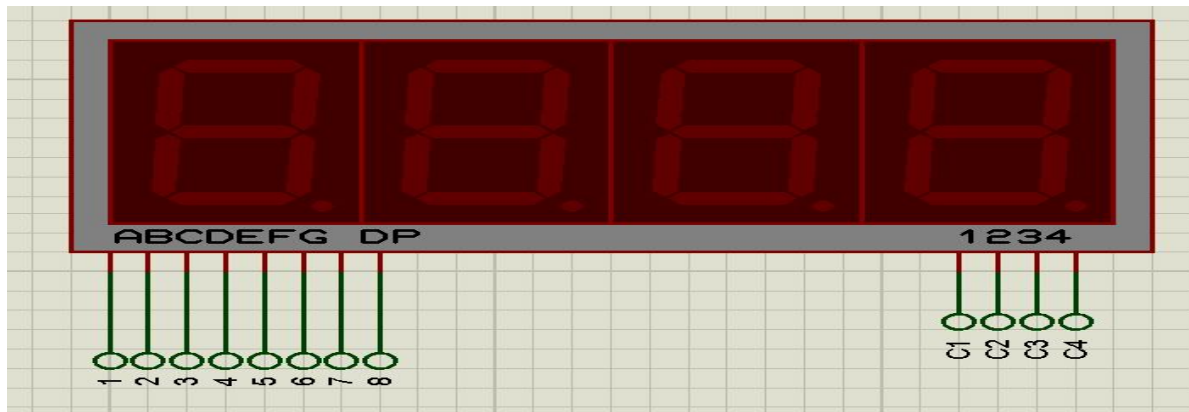


Fig. IV-8 Schéma partiel de l'afficheur 4 digits

#### b) Afficheur à cristaux liquides (LCD)

ces afficheurs, appelés afficheurs LCD (Liquid Crystal Display), sont en fait des modules compacts intelligents qui nécessitent peu de composants externes pour leur fonctionnement. Ils consomment très peu, comparés aux afficheurs 7 segments. Plusieurs afficheurs sont disponibles sur le marché qui diffèrent les uns des autres, par leurs dimensions, (de 1 à 4 lignes de 8 à 80 caractères), et aussi par leurs caractéristiques techniques ainsi que leur tension de service. Certains de ces afficheurs sont dotés d'un rétro-éclairage. Cette fonction fait appel à des LED montées derrière l'écran du module [10].

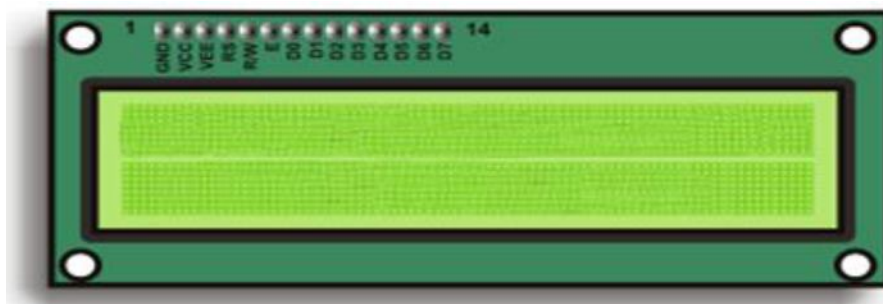


Fig. IV-9 Photos d'un afficheur et son brochage.

### IV.4.5 La communication série RS 232 :

La communication RS-232 est une norme standardisant un bus de communication de type série sur trois fils minimum (électrique, mécanique et protocole). Elle était disponible sur presque tous les PC jusqu'au milieu des années 2000, il est communément appelé le « port série ». Sur les systèmes d'exploitation MS-DOS et Windows, les ports RS-232 sont désignés par les noms COM1, COM2, etc. Cela leur a valu le surnom de « ports COM », encore utilisé de nos jours. Toutefois, il est de plus en plus remplacé par le port USB (transfert de données plus rapide, mais portée plus courte). Les liaisons RS-232 sont fréquemment utilisées dans l'industrie afin de connecter les différents appareils électroniques (automate, appareil de mesure, etc.) [11].

#### a) Description :

La connectique de cette liaison se présente souvent sous la forme du connecteur DB-9 ou DB-25, mais peut aussi être d'un autre type (RJ25). Seule la version DB-25 est vraiment standardisée, la DB-9 est une adaptation d'IBM lors de la création du PC AT. La transmission des éléments d'information (ou bit) s'effectue bit par bit, de manière séquentielle.

L'affectation des broches de la DB9 est représentée ci-dessous (Voir Annexe 05).

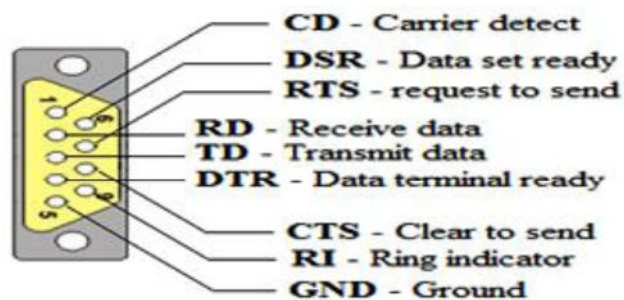


Fig. IV-10 Connecteur DB 9 male.

Du point de vue électronique, les signaux TX et RX en sortie des prises répondent aux normes RS232, c'est à dire: niveau logique 1 compris entre -3 et -25V et niveau logique 0 compris entre +3 et +25V.

#### b) Vitesse de transmission des données :

- Étant donné qu'il n'y a pas d'horloge commune entre les équipements qui communiquent via une liaison série, l'émetteur et le récepteur doivent envoyer les bits à la même vitesse.

- La vitesse de transmission des données est exprimée par le baudrate. Il s'agit du nombre de bits maximum envoyé sur la liaison série en une seconde.
- La plage des vitesses utilisées varie de 1200 à 115200 bauds (ou bits/seconde).

## IV.5 Microcontrôleur

Un microcontrôleur est un composant tout comme un microprocesseur que l'on doit programmer (en assembleur ou en langage C, le plus souvent) afin qu'il exécute automatiquement des commandes (codes machines). Cependant un microcontrôleur, contrairement à un microprocesseur, est un composant qui regroupe dans sa puce plusieurs modules, dont une mémoire flash pour contenir le programme d'exécution, une mémoire statique pour contenir les constantes, variables et tableaux de travail, une horloge pour cadencer le fonctionnement du microcontrôleur, et des ports d'entrées sorties tri-sates. Avec l'évolution des microcontrôleurs, on trouve maintenant couramment d'autres modules importants, tels que des convertisseurs analogique numérique (CAN) de 8 et 10 bits, des modulateurs à largeur d'impulsion variable (PWM), des circuits à horloges multiples (Timer0, Timer1 et Timer2) de 8 bits et 16 bits, des modules de communications séries synchrones (SPI et I<sup>2</sup>C) et asynchrone (USART), etc... S'il est possible d'utiliser un ordinateur sans rien savoir du microprocesseur qu'il contient, il en est tout autrement pour entamer la conception et la réalisation d'un montage à microcontrôleur. La série des prototypes réalisés est basée sur un microcontrôleur 8 bits de Microchip [12], le moins chère de la gamme mid-range : le PIC16F716.

### IV.5.1 Identification d'un PIC :

La référence d'un microcontrôleur PIC est de la forme NN LLL XXX, ou, NN : désigne la famille à laquelle appartient le circuit.

LLL : est un ensemble d'une, deux ou de trois lettres qui indiquent le type de mémoire de programme contenue dans le circuit et de la plage de la tension d'alimentation autorisée.

XXX : est un ensemble de deux ou de trois chiffres constituant la référence du circuit.

Il existe trois grandes familles de microcontrôleur PIC :

- La famille Base-Line : utilise des mots d'instructions codés sur 12 bits.
- La famille Mid-Range : utilise des mots d'instructions codés sur 14 bits.
- La famille High-End : utilise des mots d'instructions codés sur 16 bits.



On peut noter dès à présent que les PIC sont des composants statiques, c'est-à-dire que la fréquence d'horloge peut être abaissée jusqu'à l'arrêt complet sans perte de données et sans dysfonctionnement [13].

### IV.5.2 Microcontrôleur PIC16F716

Ce type de PIC (*Programmable Interface Contrôler*) est un circuit de petite taille, fabriqué par la Société américaine Arizona MICROCHIP Technology. Son boîtier est un DIL (*Dual In Line*) de 2x9 pattes. En dépit de sa petite taille, il est caractérisé par une architecture interne qui lui confère souplesse et vitesse incomparables. Ses principales caractéristiques sont :

- ✓ 13 lignes d'entrées/sorties, réparties en un port de 5 lignes (Port A) et un port de 8 lignes (Port B).
- ✓ Alimentation sous 2.0V à 5.5 Volts.
- ✓ Architecture interne performante (RISC) donnant une extraordinaire rapidité.
- ✓ Une mémoire de programme pouvant contenir 2048 instructions de 14 bits chacune.
- ✓ Une mémoire RAM utilisateur de 128 emplacements à 8 bits.
- ✓ Deux horloges internes (TIMER0 et TIMER1), avec prédiviseur et chien de garde (WATCHDOG).
- ✓ Possibilité d'être programmé *in-circuit* (mode ICSP), c'est à dire sans qu'il soit nécessaire de le retirer du support de l'application.
- ✓ Vecteur de Reset situé à l'adresse 000.
- ✓ Un vecteur d'interruption, situé à l'adresse 004.
- ✓ Bus d'adresses de 13 lignes.
- ✓ Présence d'un code de protection permettant d'en empêcher la duplication.
- ✓ Facilité de programmation en assembleur (35 instructions seulement).
- ✓ Simplicité de mise en circuit.
- ✓ Faible prix.

### IV.5.3 Aspect matériel du PIC16F716

Ce composant est un microcontrôleur à 8 bits de la gamme *mid-range* de Microchip. Il est réalisé en technologie CMOS (complementary metal oxide semiconductor) et peut être cadencé par une horloge de 0 à 20 MHz.

Il alimenter par une tension continue à choisir dans l'intervalle [2.0 V,...,5.5 V]. Le brochage suivant montre que certaines pattes sont réservées à un double usage (en fait, d'autres microcontrôleur PIC, dans cette même gamme, dispose de broches multi-usages, comme le PIC16F628A, ou le PIC16F877A, par exemple). Le PIC16F716 dispose de deux ports d'entrées sorties, dénommés Port A et Port B (**figure IV-11**).

Le port A est manipulé à travers 5 lignes (broches 17, 18, 1, 2, 3), alors que le port B est manipulé à travers 8 lignes (broches 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13). Deux broches (15 et 16) sont réservées aux circuits de l'horloge interne ou externe, tandis que l'alimentation du composant se fait entre les broches Vdd (14) et Vss (5). Enfin, la broche MCLR (4) permet un reset manuel de ce composant [14].

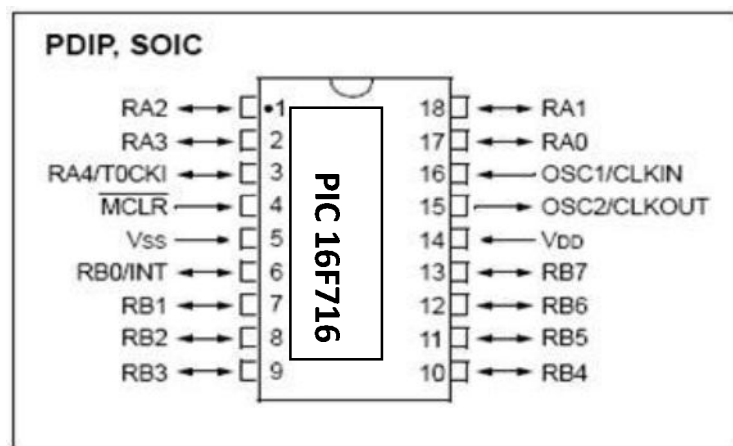


Fig. IV-11 Brochage du PIC16F716.

### IV.5.4 Programmation [15]

Pour la programmation l vous faut un éditeur de texte pour taper les programmes :

- notepad, de Windows, ou mieux encore, notepad++ (Windows/Linux/Mac).

Il vous faut un assembleur qui va permettre de transformer vos instructions écrites en assembleur (\*.asm) en code hexadécimal (\*.hex) pour le PIC. Il est fourni gratuitement par Microchip, à télécharger depuis le site <http://www.microchip.com> dans la rubrique "Developpement tools". Il s'appelle MPLAB.

Enfin, il vous faut un programmeur de PIC, et un logiciel pour programmeur de PIC. Il existe plusieurs logiciels de programmeur de PIC sur internet, dont les plus fiables sont :

- WinPIC800, site : [www.winpic800.com](http://www.winpic800.com)
- ICPROG, site : [www.ic-prog.com](http://www.ic-prog.com)
- WinPicProg, site : [www.winpicprog.co.uk](http://www.winpicprog.co.uk)

#### **IV.6 Conclusion:**

L'étude théorique décrite dans ce chapitre nous a permis d'avoir une idée plus claire sur les différents montages utilisés dans une installation solaire photovoltaïque telle-que, en particulier, le pyranomètre, le datalogger et le suiveur solaire.

Le choix des composants constituant ces appareils sont principalement :

- Le capteur de température (LM35DZ)
- L'afficheur (type LCD ou 7 segments)
- La photodiode (BPW21 : visible, BPW34 : proche infrarouge).
- Le circuit MAX232 pour la communication (RS232)
- le microcontrôleur (PIC16F716).

## IV.7 Bibliographie chapitre IV

- [1] Mr Bouna Ould Zeidane “Contribution to the study of the Grid Connected Photovoltaïque System” Mémoire de magister. 2006.
- [2] Adrien Ramond. “Conception et réalisation d'une nouvelle architecture multi-entrées multi-sorties pour la gestion de micro puissance dans les systèmes autonomes” Micro and nanotech- nologies/Microelectronics, INSA de Toulouse, 2011.
- [3] T. Zarede, M. Fathi, “ Commande électronique et évaluation énergétique d'un convertisseur photovoltaïque associé à un suiveur solaire ” *Revue des Energies Renouvelables SIENR'14 Ghardaïa* ; 81 – 86, 2014.
- [4] H. Djalo, P. Njampou , “Modèle de Gassara dans la poursuite de la production pic d'une plaque solaire par régulation deux degrés de liberté ”, *Revue des Energies Renouvelables* ; 16 (4) : 749 – 759, 2013.
- [5] Document Scientifique, CEA, ‘Questions de Physique autour de l’Energie Solaire’, DCOM, Service Information Média, 2012.
- [6] YACINE Fouad, “ Etude Des Nouvelles Generations De Cellules Photovoltaïques ” thèse de magister ; Université Des Sciences et de le Technologie d’Oran Mohamed Boudiaf(USTO.MB), 2011.
- [7] DS005516, LM35 datasheet: Precision centigrade temperature sensors, National Semiconductor, November 2000.
- [8] S. Djerroud, A. B. Stambouli, N. Benabadji; “Mise au point d’un dispositif automatique de caractérisation du module solaire à base d’un microcontrôleur PIC16F877, Application au module solaire hybride en a-Si:H ”, *Revue des Energies Renouvelables* ; **13 (4)** : 613 – 623. 2010.
- [9] <http://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>.
- [10] S. Ameer, M. Laghrouche, A. Adane, “Monitoring a Greenhouse Using a Microcontroller-Based Meteorological Data Acquisition System,” *Renewable Energy*, **24(1)**: 19–30, 2001.
- [11] M. Benganem, “A Low Cost Wireless Data Acquisition System for Weather Station Monitoring”, *Renewable Energy*; **35(4)**, 862–872. 2010.
- [12] La programmation des PICs . BIGONOFF Révision 6 ; Edition : 2001 .
- [13] Les microcontrôleurs PIC . BERNARD BÉGHYN HERMES-SCIENCE ; Edition : 2003.
- [14] Carmine, A. Advanced Assembler Language and MVS Interfaces: For IBM Systems and Application Programmers, 2nd ed., Wiley, New York. 1999.
- [15] Apprendre la programmation des PICs . PASCAL MAYEUX DUNOD ; Edition : 2002.

# CHAPITRE V

## V.1 Réalisation d'un appareil de mesures du rayonnement solaire "PYRANOMETRE" [1]

**Résumé :** Dans ce papier, nous présentons une description détaillée d'un mini pyranomètre 8-bit à 2 entrées. Ce dispositif est dédié à la mesure du rayonnement solaire incident direct, dans le visible et le proche infra-rouge (grâce à deux photodiodes à large spectre, respectivement, une BPW21 et une BPW34). Ce dispositif est souvent couplé avec un enregistreur automatique (un datalogger) pour établir un relevé de mesures sur une longue période, afin de procéder à un bon dimensionnement d'un système de panneaux photovoltaïques sur une région en cours d'électrification en énergie solaire. La réalisation de ce montage a été centrée sur l'utilisation du plus petit microcontrôleur 8-bit existant sur le marché actuel, un PIC10F222 de 6 pins seulement, de la gamme baseline de Microchip. Ce microcontrôleur est chargé d'assurer toutes les fonctions prévues dans ce dispositif (mesures, contrôles et gestion d'une table L.U.T pour chaque capteur mis en jeu), grâce à des modules intégrés spécialisés tels qu'un convertisseur analogique numérique 8-bit à deux canaux de mesures et un timer 8-bit avec pré-diviseur. Sa très faible consommation (170 $\mu$ A sous 2V, 4MHz) le rend particulièrement recommandé pour la conception et la réalisation de dispositif à grande autonomie d'énergie, en particulier, les produits et accessoires dédiés à la mesure, le contrôle et la régulation dans les divers domaines de l'énergie solaire.

**Mots-clés :** Pyranomètre, rayonnement solaire, visible, proche infra-rouge, panneau photovoltaïque.

### 1. PRÉSENTATION

Ce mini-pyranomètre, compacte et de très faible consommation, est dédié à la mesure automatique de deux paramètres physiques importants, à savoir : la quantité de rayonnement solaire incident direct, dans le visible et le proche infra-rouge. Ces mesures sont acquises périodiquement (une mesure toute les trois secondes) et immédiatement visualisées sur un afficheur à 4 digits 7-segments, visualisant successivement le rayonnement solaire incident direct, dans le visible, puis dans le proche infra-rouge. Pour minimiser la consommation en courant de ce dispositif, l'affichage de chaque mesure est maintenue visible durant 1 seconde (courant pulsé, consommation autour de 8 mA, par chaque diode LED de l'afficheur, une à la fois), puis le montage est mis en veilleuse (*sleep mode*) durant 2 secondes, où le courant consommé est réduit à une valeur inférieure à 1 $\mu$ A ! L'alimentation de l'ensemble est assurée par une pile plate de 4.5V ou trois piles LR6 de 1.5V en série. Sachant que leur capacité va de 500 mAh (type carbone-zinc), 1000 mAh (type alcaline) à 3000 mAh (type lithium), on peut espérer une durée de fonctionnement continu de ce dispositif respectivement de 62h, 125h ou 375h. Comme il s'agit d'un dispositif d'emploi discontinu, si l'on suppose un relevé de mesures quotidien de moins d'une heure, alors son autonomie peut être considérable (plusieurs mois).



Fig 1. Synoptique du dispositif réalisé.

## 2. Description Hardware

Le schéma synoptique de ce montage comporte les principaux modules suivants :

- un microcontrôleur 8-bit (PIC10F222),
- un module afficheur à 4 digits 7-segments,
- un étage d'entrée à 2 voies de mesures (rayonnement incident direct du visible, rayonnement incident direct du proche infrarouge), avec un préamplificateur à un seul transistor bipolaire.
- et enfin l'alimentation régulée pour disposer d'une tension précise de +2,56V, bien adapté au convertisseur analogique numérique. Avec cette valeur précise, nous disposons d'une résolution de 10 mV par compte numérique.

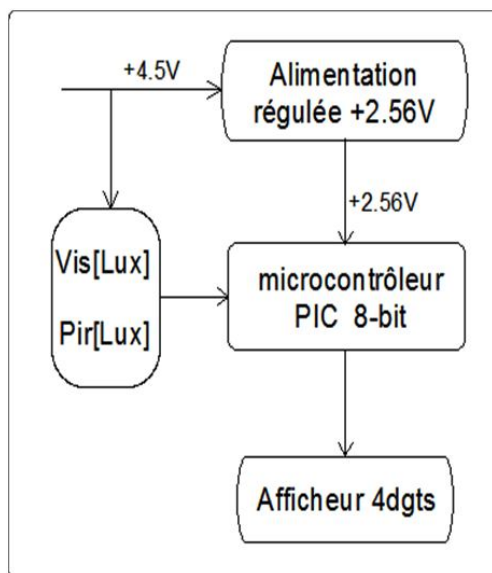


Fig 2. Synoptique du dispositif réalisé.

### 3. Le microcontrôleur 8-BIT (PIC10F222)

Ce microcontrôleur 8-bit comporte seulement 6 pins, et de ce fait, il est considéré comme le plus petit microcontrôleur dans le marché actuel. Il fait partie de la gamme baseline de la société américaine Microchip, devenu leader mondial dans cette catégorie de composants numériques programmables. Il est doté d'une architecture RISC (avec seulement 33 instructions), dont les performances en vitesse d'exécution et taux d'occupation mémoire sont bien meilleurs que l'ancienne architecture CISC (exemple : Motorola 68705 ou Intel 8051). Il est alimenté par une tension continue pouvant aller de 2.0V à 5.5V ; dans notre cas, nous avons utilisé une pile plate de 4.5V. Concernant les impératifs de fonctionnement du module interne de conversion analogique numérique ADC de résolution 8-bit, une tension précise de 2.56 V a été utilisée (grâce à une alimentation régulée). En effet, avec une résolution de 8-bit, on dispose de 256 pas de mesures, et en fixant la tension de référence à 2.56 V, on obtient alors une sensibilité de  $2560 / 256 = 10$  mV.

Enfin, ce microcontrôleur comporte un oscillateur interne de 4 et 8 MHz au choix, de précision 1%. Deux facteurs étaient très importants dans notre montage : la précision des mesures (d'où la nécessité d'une alimentation régulée) et l'autonomie en énergie. Pour ce dernier point, nous avons choisi de piloter l'afficheur 4 digits en mode double multiplexage (c'est-à-dire, une seule LED allumée pendant l'activation d'un digit, d'où un courant pulsé de 8 mA, avec un très faible scintillement dû au multiplexage) durant 1 seconde, puis d'espacer les mesures par un temps mort de 2 secondes, où le microcontrôleur est mis en mode veilleuse, consommant ainsi



un courant inférieur à 1  $\mu$ A. Enfin, le temps mort de 2 secondes entre mesures successives et gérer par le module interne dit WATCHDOG, réglé avec un pré-diviseur de 1:128 ; ce module est utilisé pour réactiver le PIC (qui était mis en veilleuse) au bout de 2 secondes, afin de procéder à la mesure suivante (puis il est remis en veilleuse, et ainsi de suite...).

#### 4. Le module afficheur 4 DIGITS A LED 7-SEGMENTS

Le module afficheur 4 digits à LED 7-segments classique nécessite 12 lignes I/O (entrées/sorties) de la part du PIC, comme le montre le schéma suivant:

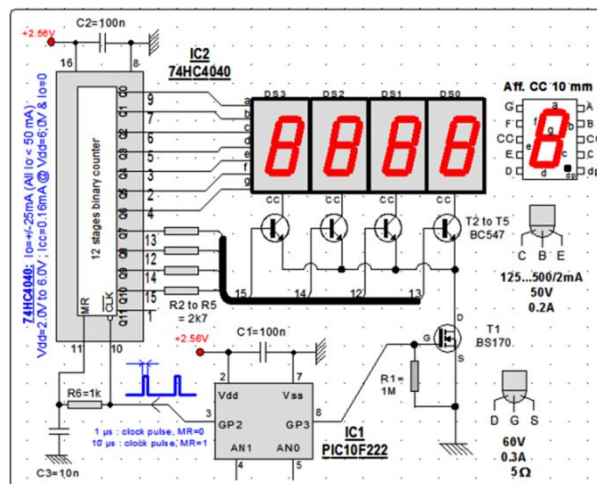


Fig 3. Module afficheur 4 digits à LED 7-segments avec compteur binaire 12-bit.

Le PIC10F222 ne disposant que de 6 pins seulement, nous avons interfacé cet afficheur par un compteur binaire 12-bit, un 74HC4040, en utilisant l'astuce suivante : pour afficher par exemple un compte numérique de 195, le PIC envoie une rafale de 195 impulsions très rapidement (chaque impulsion dure 1  $\mu$ s), pendant que le transistor MOSFET T1, un BS170, est maintenu bloqué pour éteindre l'afficheur. Ensuite, T1 est rendu conducteur pendant 1 seconde pour lire la valeur de ce compte numérique. Enfin, le PIC envoie une impulsion finale plus longue, de 10  $\mu$ s, pour remettre à zéro le compteur binaire 74HC4040, et le transistor MOSFET T1 est de nouveau maintenu bloquée pour éteindre l'afficheur, pour réduire la consommation de ce montage. La cellule RC (résistance R6 et condensateur C3) a été prévu pour piloter les deux entrées MR et CLK du compteur binaire 74HC4040 par une seule sortie du PIC.

Les deux entrées analogiques du PIC10F222 ont été consacrées à la mesure des deux paramètres physiques importants pour un pyranomètre: le rayonnement incident direct du visible et le rayonnement incident direct du proche infrarouge. Pour la mesure du rayonnement dans le visible, une photodiode type BPW21 a été préférée, vu son large spectre de sensibilité,

centré sur 550 nm. Pour la mesure du rayonnement dans le proche infrarouge, nous avons utilisé une photodiode type BPW34, dont le spectre de sensibilité est centré sur 950 nm. L'une des deux entrées de mesures est précédée par un préamplificateur à un seul transistor PNP. Une mesure maximale de 2.56 V peut être lue 2,56 mA, à travers une résistance précise de 1 kilo-Ohm. Si l'on utilise un transistor ayant un gain bêta de 100 seulement, cela revient à disposer d'une lecture de 25,6  $\mu$ A. La lecture du datasheet d'une BPW34 offre divers graphes intéressants, dont le graphe illuminance [Lux] en fonction du courant inverse  $I_r$  [ $\mu$ A] traversant cette photodiode. Une table a été programmée dans le PIC pour disposer d'une lecture finale en Lux.

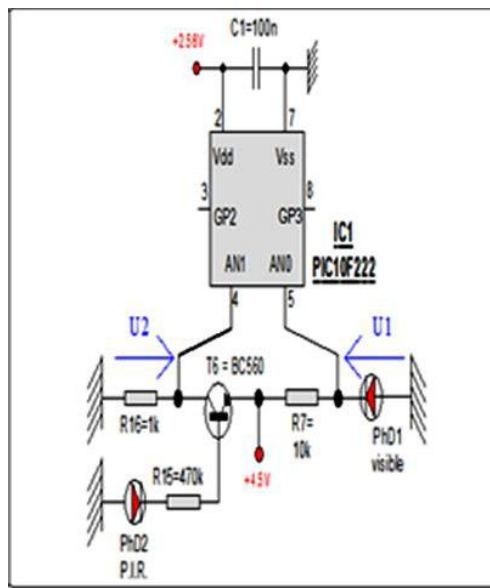


Fig 4. Etage d'entrée pour 2 voies de mesures analogiques.

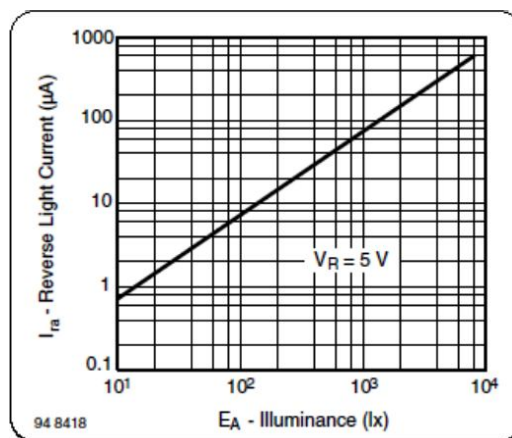


Fig 5. Graphe Courant Inverse  $I_r$  [ $\mu$ A] en fonction de l'illuminance [Lux].

## 5. L'alimentation régulée 2,56V

La section alimentation régulée produit une tension précise de 2,56 V, à partir d'une pile plate de 4.5V, ou trois piles R6 de 1.5V en série. Le choix de la valeur de 2.56 V a été dicté pour obtenir un pas de mesure de 10 mV pour un codage de 8 bits (256 mesures possibles). Le courant propre consommé par cette alimentation est de l'ordre de 150  $\mu$ A seulement. Le transistor Ta permet de minimiser les fluctuations de la tension de sortie due aux différentes variations du courant de sortie, et maintient cette tension de sortie à 2,56 V, grâce à la diode Da qui offre une tension de référence de 0,6 V. Le transistor ballast Tb permet de suppléer un courant de sortie jusqu'à l'ordre de 100 mA sans échauffement notable.

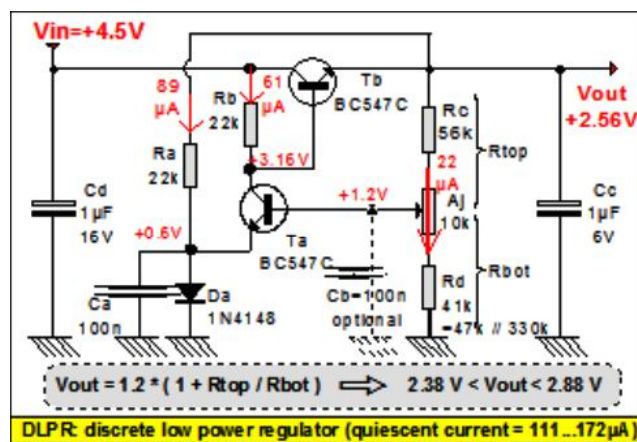


Fig 6. Alimentation régulée discrète, à très faible consommation propre.

## 6. Description Firmware

Le microcontrôleur 8-bit (PIC10F222) a été programmé en assembleur avec MPLAB v7.52 sous Windows XP, suivant une logique modulaire : un fichier principal et des fichiers secondaires associés.

Le 1er fichier (PYRANO.ASM) comporte le programme principal chargé de configurer les modules internes qui seront sollicités par la suite :

- Le module WATCHDOG prévu pour réveiller le PIC du mode SLEEP au bout de 2,3 s.
- Le convertisseur ADC 8-bit et ses 2 entrées AN0 et AN1

Après avoir réglé différents registres systèmes (OSCCAL, ADCON0, TRISGPIO et OPTION), le programme principal affiche momentanément la valeur 8888 pour assurer l'utilisateur du bon état de chaque segment des 4 digits de l'afficheur, puis procède à la 1ère mesure et l'affiche, durant 1 seconde, puis entre en mode veilleuse, grâce à l'instruction SLEEP

(pour une consommation de courant minimale). Il sera réveillé au bout de 2,3 s par le circuit du WATCHDOG, pour procéder à la mesure suivante, l’affiche, puis entre de nouveau en mode SLEEP. Ce 1er fichier comporte également des routines et macros, dont le pilotage du convertisseur ADC 8-bit (routine meas8bit). Pour minimiser davantage la consommation en courant du PIC, ce module est activé seulement pendant la phase de mesure d’un paramètre physique, puis immédiatement désactivé. Chaque mesure est implémentée séparément (measPhD1 et measPhD2) suivi par la macro d’affichage digit par digit (AffDgt) qui gère le double multiplexage. La routine HCT4040 permet de préparer à sa sortie la valeur binaire du compte numérique à afficher, ainsi que le digit à activer.

Enfin, le 2ème fichier (16B3DGT.INC) est utilisé pour convertir toute valeur binaire de 8 bit en valeur décimale à 3 digits, nécessaire au préalable avant un affichage quelconque.

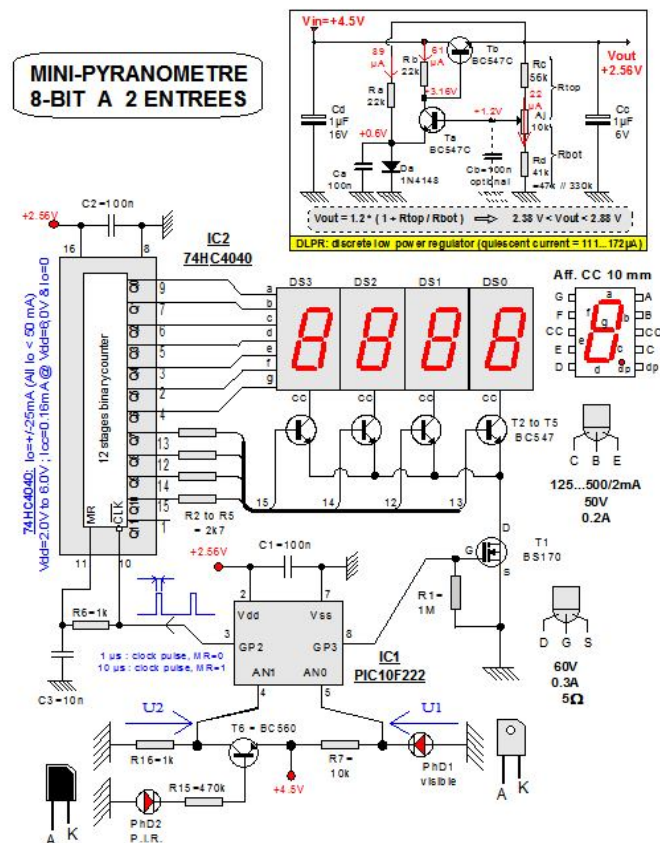


Fig 7. Schéma détaillé et complet du dispositif réalisé.

## 7. Conclusion

Cette étude est effectuée dans le laboratoire LAAR et LAMOSI, elle est basée sur l'emploi d'un microcontrôleur PIC10F222. L'objectif est la conception et la réalisation du pyranomètre à 2 entrées pour mesurer le rayonnement solaire (le visible et le proche infrarouge, en LUX). Les résultats de mesure sont visualisables sur l'afficheur à tour de rôle comme le montre les Fig. 8 et Fig. 9.



**Fig 8.** Affichage de la mesure du rayonnement incident direct du visible.



**Fig 9.** Affichage de la mesure du rayonnement incident proche-infrarouge.