



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed
معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentaion

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industrielle
Spécialité: Mesure-Analyse-Qualité

Thème

Etude comparative des dataloggers dédiés aux systèmes photovoltaïques

Présenté et soutenu publiquement par :

Djerrar Mohammed Al Amine

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
BELKHODJA Laila	MAA	IMSI	Présidente
BENABED Khadidja	MAA	IMSI	Encadreur
ZEBIRATE Soraya	Pr	IMSI	Examinatrice

Juin 2016

Dédicace

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que je dédie
ce travail de fin d'étude à mes chers parents ; qui ont
sacrifié leurs vie pour ma réussite et m'ont éclairé le chemin
par leur conseils judicieux.*

*J'espère qu'un jour, je peux leurs rendre un peu de ce qu'ils
ont fait pour moi, que dieu leur prête bonheur et longue vie.*

*Je dédie ce travail à mes frères et sœurs, ma famille, mes
amis, tos nos professeurs qui ont m'enseigner et à tous ceux
qui me sont chers.*

Remerciement

Avant tout, je remercie mon Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force d'atteindre mon but et d'accomplir mon travail.

J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

*En premier lieu, je remercie **M^{elle}.Benabed**, enseignante à l'institut de Maintenance et Sécurité Industrielle .En tant qu'encadreur de ce mémoire, il m'a guidé dans mon travail et m'a aidé à trouver des solutions pour avancer.*

*Je remercie aussi **Mr.Benabadji**, Professeur de l'Université des Sciences et de la technologie d'Oran, pour son aide précieuse et ses conseils judicieux.*

*Je tiens à remercier les membres du jury **M^{me}.Zebirate** et **M^{me} Belkhdja** qui me font l'honneur d'examiner mon travail.*

Merci à tous les enseignants de l'institut, ainsi tous les personnes de près ou loin, qui ont m'encouragé durant la réalisation de ce travail.

Résumé

Le but de ce travail est de faire une recherche bibliographique et sur internet au sujet des enregistreurs automatiques de données (dataloggers) spécialement dédiés aux systèmes photovoltaïques, en tenant compte de leurs propres consommations d'énergie (la plus basse possible), leurs capacités de stockages (la plus grande possible), et enfin leurs différentes options de connectivités (liaison filaire basée sur le port RS232 ou USB, ou non-filaire, tel que le WiFi, le bluetooth, l'infrarouge irDa, etc...). Le travail est achevé par la réalisation d'un mini-datalogger prototype, assemblé avec un strict minimum de composants électroniques, et dont les caractéristiques principales répondent aux meilleurs critères relevés au terme de cette étude comparative.

Sommaire

Sommaire

Résumé

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : L'énergie solaire photovoltaïque

I-1 - Introduction	4
I-2- Historique du photovoltaïque.....	4
I-3 - Le développement du photovoltaïque dans le monde.....	5
I-4 - La ressource solaire.....	6
I-5 - Ensoleillement.....	7
I-5-1 - Rayonnement direct	7
I-5-2 - Rayonnement diffus.....	8
I-5-3 - Rayonnement réfléchi.....	8
I-5-4 - Rayonnement global.....	8
I-6 - Influence de la localisation sur le gisement solaire.....	8
I-7 - Gisement solaire en Algérie.....	9
I-8 – Rotation-Inclinaison de la terre	10
I-9 – Ombrage.....	11
I-10 – Effet photovoltaïque	12
I-11 – Cellule photovoltaïque.....	13
I-11-1 – Modélisation de la cellule.....	13
I-11-2 – Caractéristique courant-tension de la cellule.....	14
I-12 – Branchement des cellules.....	15
I-12-1 - Branchement en série	15
I-12-2 – Branchement en dérivation.....	15
I-12-3 – Branchement mixte série-dérivation.....	16
I-13 – Protection des cellules.....	16

I-14 – Technologies des cellules.....	17
I-14-1 – 1 ^{ère} génération « les cellules cristallines ».....	17
I-14-2 – 2 ^{ème} génération « couches minces ».....	18
I-14-3 – 3 ^{ème} génération « multi jonction ».....	18
I-15 – Paramètres de performance.....	20
I-15-1 – Influence de la température et de l'éclairement	20
I-15-2 – Les autres paramètres	21
I-16 – Conclusion.....	21
 Chapitre II : Les installations photovoltaïques	
II-1 – Introduction.....	23
II-2 – Les centrales solaires photovoltaïques.....	23
II-3 –Types d'installation photovoltaïque	24
II-3-1- Installation autonome.....	24
II-3-2 – Installation hybride.....	25
II-3-2-1 – Système hybride (photovoltaïque -éolien).....	25
II-3-2-2 – Système hybride (photovoltaïque-éolien-groupe électrogène).....	26
II-3-2-3 – Système solaire hybride.....	27
II-3-3 –Installation raccordée au réseau.....	28
II-4- Les éléments d'une installation photovoltaïque.....	29
II-4-1- Le module photovoltaïque.....	29
II-4-2 – Le régulateur de charge et de contrôle	30
II-4-2-1- Le rôle d'un régulateur de charge et de contrôle.....	30
II-4-2-1- Les types d'un régulateur de charge et de contrôle.....	30
II-4-3- L'onduleur.....	31
II-4-3-1- Types d'onduleur.....	32
II-4-3-2 - Critères de choix de l'onduleur.....	33
II-4-4 – La batterie.....	33

II-4-4-1 – Quelques définitions liées à la batterie.....	33
II-4-4-2 – La température de la batterie.....	34
II-4-4-3 – Les types de la batterie.....	34
II-5 – Conclusion.....	34

Chapitre III : Etude comparative des dataloggers dédiés aux systèmes photovoltaïques

III-1 – Introduction.....	36
III-2 – Dataloggers.....	36
III-2-1 - Définition d'un dataloggers.....	36
III-2-2 -Comparaison entre les dataloggers et les autres instruments de collecte de données.....	37
III-2-3 – Applications.....	37
III-2-4 – Les dataloggers dédiés aux systèmes photovoltaïques.....	39
III-2-4-1 – Présentation générale.....	39
III-2-4-2 – La nature des données stockées.....	39
III-2-4-3 – Le stockage.....	39
III-2-4-4 – Le transfert de données.....	39
III-2-4-5 - Différents types des dataloggers.....	40
III-2-4-6 – Comparaison des dataloggers.....	41
III-4 – Etude théorique du datalogger réalisé.....	42
III-4-1- Composition du système.....	42
III-4-2 – Les microcontrôleurs.....	43
III-4-3 – Le PIC16F1825.....	43
III-4-4 – Le capteur de température TC1047A.....	51
III-4-5 – Conclusion.....	52

Chapitre IV : Réalisation pratique du datalogger

IV-1 – Introduction.....	54
IV-2 – Présentation	54
IV-3 – Description Hardware.....	56
IV-4 – Le microcontrôleur 8-bit (PIC 16F1825).....	57
IV-5 – Le clavier de 3 boutons poussoirs.....	59
IV-6 – La circuiterie pour les 4 voies de mesure.....	59
IV-7 – Le connecteur ICSP.....	60
IV-8 – La section émission RS 232.....	61
IV-9 – Organisation de la mémoire flash du PIC16F1825.....	62
IV-10 – Description Firmware.....	64
IV-10-1 – Le fichier principal MD4E.ASM.....	65
IV-11 – Conclusion.....	69

Conclusion générale

Bibliographie

Annexes

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1 : Puissance cumulée photovoltaïque dans le monde.....	5
Figure I.2 : Rayonnement solaire.....	6
Figure I.3 : Spectre électromagnétique.....	7
Figure I.4 : Composantes du rayonnement reçu au niveau du sol.....	8
Figure I.5 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.....	9
Figure I.6 : La position du soleil.....	10
Figure I.7 : La course de soleil en fonction des saisons.....	10
Figure I.8.a : Ombrage totale.....	11
Figure I.8.b : Ombrage partiel.....	11
Figure I.9 : Effet photovoltaïque.....	12
Figure I.10 : Modélisation d'une cellule solaire.....	13
Figure I.11 : Caractéristique courant-tension d'une cellule.....	14
Figure I.12 : Caractéristique électrique d'un branchement en série.....	15
Figure I.13 : Caractéristique électrique d'un branchement en dérivation.....	15
Figure I.14 : Caractéristique électrique d'un branchement série-dérivation.....	15
Figure I.15 : Protection des cellules « diode by-pass et anti-retour ».....	15
Figure I.16.a : Cellule monocristalline.....	17
Figure I.16.b : Cellule poly cristalline.....	17
Figure I.17 : Cellule amorphe souple.....	18
Figure I.18 : Cellule double jonction.....	19
Figure I.19 : Influence de la température et de l'éclairement sur I(V) d'un module BP MX62	20
Figure II.1 : La ferme solaire Topaz « la plus puissante du monde ».....	23
Figure II.2 : La centrale solaire de Bordeaux.....	24
Figure II.3 : Schéma d'une installation photovoltaïque autonome.....	25
Figure II.4 : Schéma d'une installation hybride (photovoltaïque - éolienne).....	26
Figure II.5 : Schéma d'une installation hybride parallèle.....	27
Figure II.6 : Panneaux solaires hybride.....	28
Figure II.7 : Schéma d'une installation raccordée au réseau.....	28

Figure II.8 : Coupe d'un module photovoltaïque.....	29
Figure II.9 : Régulateurs de charge MPPT.....	31
Figure III.1 : Les différentes applications du datalogger.....	38
Figure III.2 : Carte interne d'un datalogger, copyright FRONIUS.....	40
Figure III.3 : Interface GS logger.....	40
Figure III.4 : Les trois modèles du datalogger WEB'log (Light+ , Basic, Pro).....	41
Figure III.5 : Datalogger HOBO U30-NRC.....	41
Figure III.6 : Synoptique du datalogger réalisé	42
Figure III.7 : Brochage du PIC16F1825.....	44
Figure III.8.a : Circuits pour l'horloge interne du PIC16F1825.....	44
Figure III.8.b : Exemples d'horloge externe du PIC16F1825.....	45
Figure III.9 : Reset automatique.....	45
Figure III.10 : Synoptique interne de la broche RA3.....	47
Figure III.11 : Synoptique interne de la broche RC0 et RC3.....	48
Figure III.12 : Synoptique interne du compteur TMR0.....	49
Figure III.13 : Schéma block du TC1047A.....	51
Figure III.14 : Courbe représentative $V_{out} = f(T^{\circ}C)$	51
Figure IV.1 : Fenêtre de l'application XLP Battery Life Estimator.....	56
Figure IV.2 : Aperçu de dispositif réalisé.....	56
Figure IV.3 : Synoptique de dispositif réalisé.....	57
Figure IV.4 : Circuit de PIC 16F1825, avec horloge interne de 4MHz et horloge externe de 32768...58	58
Figure IV.5 : Sortie de l'horloge secondaire 32768, à vide	58
Figure IV.6 : Sortie de l'horloge secondaire 32768, en charge.....	58
Figure IV.7 : Clavier de 3 boutons poussoirs	59
Figure IV.8 : Circuiterie pour les 4 voies de mesure.....	60
Figure IV.9 : Schéma de branchement du connecteur ICSP.....	60
Figure IV.10 : Section émission RS 232.....	61
Figure IV.11 : Interface hyper terminale pour la visualisation des mesures en temps réel.....	61
Figure IV.12 : Visualisation des données stockées sur 1 année.....	62
Figure IV.13 : Schéma détaillé et complet du dispositif réalisé.....	63

Figure IV.14 : Programmeur JDM2 pour PIC sur port série d'un PC.....	64
Figure IV.15 : Aperçu du programmeur utilisé.....	64
Figure IV.16 : Organigramme du programme principal.....	66
Figure IV.17 : Organigramme de l'interruption du Timer 1.....	67
Figure IV.8 : Organigramme de gestion des 3 boutons poussoirs.....	68

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Ensoleillement reçu en Algérie par région climatique.....	9
Tableau I.2 : Comparaison des trois principales technologies des cellules.....	19
Tableau II.1 : Les différents types des onduleurs photovoltaïques.....	32
Tableau III.1 : registres associés au compteur TMR0.....	50
Tableau III.2 : paramétrage du bit PSA, et des 3 bits PS2, PS1, PS0.....	50
Tableau IV.1 : Format d'enregistrement d'un paquet de mesures par jour.....	62

Introduction générale

Introduction générale :

En Algérie et partout dans le monde la consommation en énergie électrique est en très forte croissance. Il semble que tendanciellement, la consommation d'énergie va continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés. On parle périodiquement de diverses solutions techniques permettant de garder ce rythme de vie ; ça d'une part, d'autre part l'épuisement des ressources fossiles plus ou moins à long terme, la flambée des prix du brut, et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie : l'utilisation et le développement des énergies renouvelables.

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) à l'échelle de l'homme mais aussi dans certains cas de l'humanité (solaire par exemple). Les énergies renouvelables utilisent des flux inépuisables d'énergies d'origine naturelle (soleil, vent, eau, croissance végétale...).

Le soleil peut satisfaire tous nos besoins si nous apprenons à exploiter rationnellement l'énergie qu'il rayonne vers la terre. Il brille dans le ciel depuis presque cinq milliards d'années et les scientifiques ont calculé qu'il est à la moitié de son existence. Nous avons du mal à imaginer qu'au cours d'une année le soleil diffuse vers la terre quatre mille fois plus d'énergie que celle consommée par toute la population mondiale. Aujourd'hui il paraît insensé de ne pas en profiter car nous avons les moyens technologiques nécessaires. De plus il faut considérer que cette source d'énergie est gratuite, propre et inépuisable. L'énergie solaire photovoltaïque est l'une de trois utilisations de l'énergie solaire. Cette dernière est utilisée pour la production de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques.

Mais malgré que cette énergie est gratuite, un contrôle et un suivi de bon fonctionnement d'une installation solaire photovoltaïque est rentable, car chaque Kilowatt-heure alimenté par le courant solaire compte et se transforme en argent comptant. Généralement, le système de surveillance est composé d'un système d'acquisition de données et de stockage, un logiciel d'exploitation pour le traitement et l'analyse des données et un afficheur. Le système d'acquisition et de stockage des données est un enregistreur automatique de données (datalogger).

Le but essentiel de ce travail est de faire une comparaison entre les dataloggers spécialement dédiés aux systèmes photovoltaïques afin de relever les meilleurs critères pour les employés dans la réalisation d'un mini datalogger destiné pour la surveillance d'une mini centrale solaire de production d'électricité à partir de panneaux photovoltaïques.

Ce travail comporte quatre chapitres ainsi qu'une introduction et une conclusion.

Dans le début de ce manuscrit, une recherche bibliographique a été faite. Cette dernière, nous a permis de mieux présenter l'énergie solaire photovoltaïque et

particulièrement les cellules photovoltaïques (technologies des cellules, branchement des cellules, protection des cellules,...).

Le deuxième chapitre est consacré à l'exposition de quelques types d'installations photovoltaïques (installations autonome, hybrides et raccordées au réseau). Ainsi, nous décrivons en détail les principaux éléments constituant une installation solaire photovoltaïque (les modules, régulateurs, onduleurs, batteries).

Le troisième chapitre est divisé en trois parties. D'abord, nous exposons les diverses applications de l'enregistreur automatique des données (datalogger). Ensuite, nous présentons les dataloggers dédiés aux systèmes photovoltaïques et nous relevons les meilleurs entre eux. Enfin, une étude théorique a été faite pour un mini datalogger réalisé, dédié à l'enregistrement automatique d'un ensemble de mesures pour le contrôle de bon fonctionnement d'un petit système photovoltaïque.

Une description complète et détaillée de la conception et la réalisation du mini datalogger a été faite à travers le quatrième chapitre.

En fin, une conclusion synthétise notre travail et donne les perspectives qui peuvent être développées pour le futur.

Chapitre I : L'énergie solaire

Photovoltaïque

I.1 - Introduction :

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, l'étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse, ou dans les diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et, malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, la quantité restante demeure encore importante quand elle arrive au sol.

Dans ce chapitre, nous allons parler de cette source d'énergie quasiment illimitée. En premier temps, nous donnons un historique, suivi de l'évolution du parc solaire dans le monde. Ensuite, nous faisons un rappel sur les notions liées à cette source (Ensoleillement, ombrage, effet photovoltaïques, ...). Enfin, nous allons exposer tout ce qui concerne les cellules photovoltaïques (Modélisation de la cellule, caractéristiques I-V, branchement des cellules,....).

I.2 - Historique du photovoltaïque :

1839 : Le physicien français Antoine Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1883 : La première cellule en sélénium fut construite par l'américain Charles Fritts ($\eta=1\%$).

1904 : Albert Einstein (1879-1975) expliqua cet effet et reçut le prix Nobel en 1921.

1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958 : 1^{ère} utilisation photovoltaïque dans un satellite artificiel américain Vanguard 1 ($\eta=9\%$ et 0,1 W).

1963 : 1^{ère} application terrestre dans un phare au Japon (242 W).

1973 : 1^{ère} maison photovoltaïque 'Solar One' construite à l'université de Delaware aux USA.

1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

1992 : 1^{ère} installation PV reliée au réseau électrique en France (900 W).

2015 : Plus de 200 GW_c de panneaux solaires installés dans le monde.

I.3 - Le développement du photovoltaïque dans le monde :

L'énergie photovoltaïque est particulièrement bien adaptée aux enjeux majeurs de notre société : raréfaction des gisements fossiles et nécessité de lutter contre le changement climatique. L'énergie solaire est inépuisable, disponible partout dans le monde et ne produit ni déchets, ni gaz à effet de serre. C'est la raison pour laquelle le parc photovoltaïque se développe considérablement dans le monde.

Dans le monde, le parc solaire photovoltaïque croît exponentiellement depuis l'année 1998. Fin 2007, la capacité totale installée s'élevait à près de 9 200 MW, contre 1 500 MW en 2000. A la fin de l'année 2014, le marché mondial cumule 177 GW de photovoltaïque raccordé, avec près de 40 GW installé en 2014, ce qui représente plus de 1% de la couverture de la demande mondiale électrique.

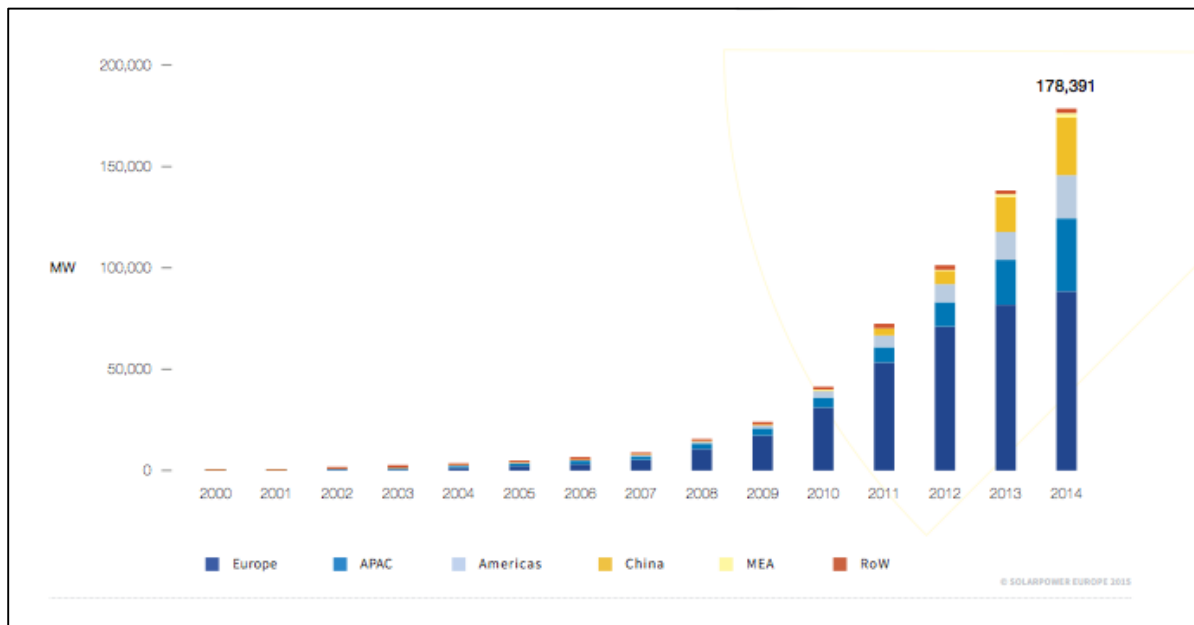


Figure I.1 : Puissance cumulée photovoltaïque dans le monde [1].

A la fin de l'année 2015, la capacité totale installée dépasse les 200 GW. EPIA, l'association européenne du photovoltaïque, prévoit que le parc installé pourrait atteindre environ 1 800 000 MW en 2030, pour une production représentant 14 % de la consommation mondiale d'électricité.

I.4 - La ressource solaire :

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant grosso modo de 0,22 à 10 microns (μm).

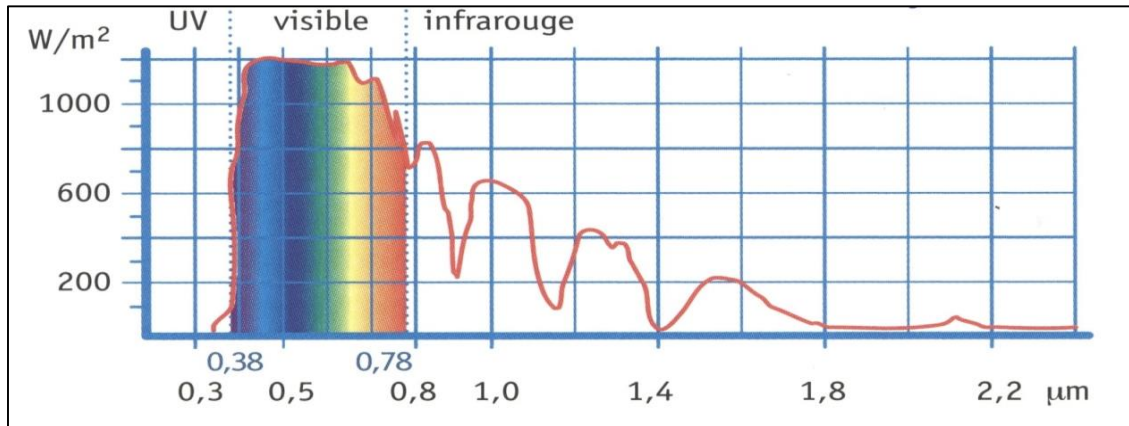


Figure I.2 : Rayonnement solaire.

- 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'ensoleillement correspond à l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan à un moment donné. Il s'exprime habituellement en Watt par 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 Wh/m^2 .

Le spectre électromagnétique couvre l'étendue complète des ondes électromagnétiques de toutes longueurs d'onde (ou, de façon équivalente, de toutes fréquences). Ce spectre s'étend donc au-delà de la lumière visible. Des basses fréquences aux hautes fréquences (ou des grandes longueurs d'onde aux petites longueurs d'onde) on retrouve les ondes radio, les micro-ondes, les infrarouges (IR), la lumière visible, les ultraviolets (UV), les rayons X et les rayons gamma. La figure suivante montre que la lumière visible ne couvre qu'une infime partie du spectre électromagnétique.

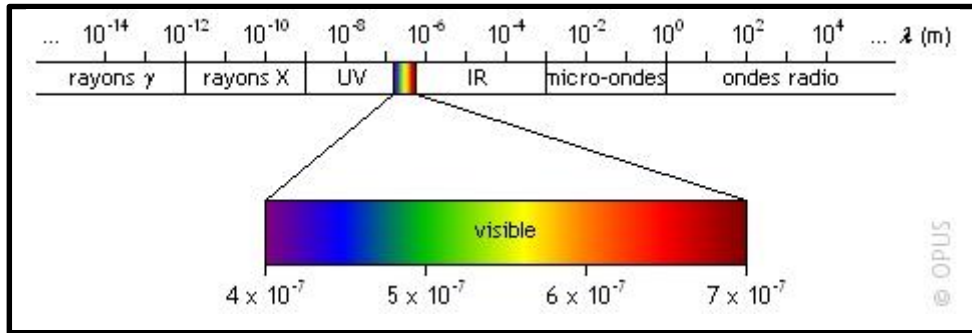


Figure I.3 : Spectre électromagnétique.

La dualité onde-particule de la lumière offre une relation étonnante au premier, puisqu'elle relie l'énergie d'un photon (théorie corpusculaire) à la fréquence de l'onde électromagnétique (théorie ondulatoire).

$$E = h * f \quad \text{(I.1)}$$

Où **E** est l'énergie d'un photon en joules, **h** est la constante de Planck ($h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J s}$) et **f** est la fréquence de la lumière en hertz.

I.5 - Ensoleillement :

L'ensoleillement, aussi appelé insolation, est la mesure du rayonnement solaire que reçoit une surface au cours d'une période donnée, s'exprimant en mégajoules par mètre carré, MJ/m² (comme recommandé par l'Organisation météorologique mondiale) ou en watt-heures par mètre carré, Wh/m² (surtout par l'industrie solaire).

La rotation et l'inclinaison de la terre provoquent une variation de l'énergie disponible en fonction de la latitude en un point donné. De plus, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et les phénomènes météorologiques entraînent des variations quotidiennes qui augmentent, ou diminuent, le rayonnement solaire reçu par un système photovoltaïque. On distingue pour cela trois types de rayonnement :

I.5.1 -Rayonnement direct :

Les rayons du soleil atteignent le sol terrestre sans subir de modification de leur trajectoire initiale. Les rayons restent parallèles.

I.5.2 - Rayonnement diffus :

En traversant l'atmosphère, les rayons du soleil rencontrent des obstacles tels que les nuages, la poussière, etc... Ces obstacles ont pour effet de rediriger les rayons du soleil parallèle (à l'origine) en une multitude de faisceaux dans toutes les directions.

I.5.3 - Rayonnement réfléchi :

C'est le résultat de la réflexion des rayons lumineux sur une surface réfléchissante (par exemple, la neige en montagne). Cette réflexion dépend de l'albédo (pouvoir réfléchissant) de la surface concernée.

I.5.4 - Rayonnement globale :

La quantité globale d'énergie, sous forme de rayonnement, est la somme de tous les rayonnements ci-dessous.

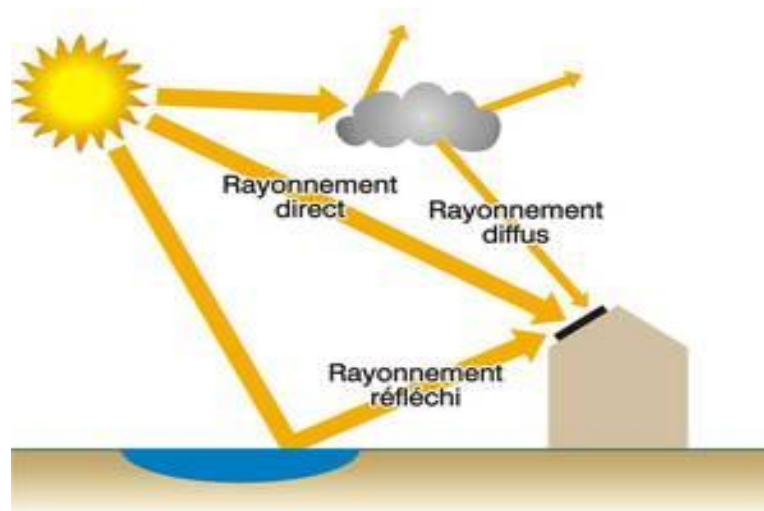


Figure I.4 : Composantes du rayonnement solaire reçu au niveau du sol terrestre.

I.6 - Influence de la localisation sur le gisement solaire :

La ressource solaire est partout présente mais inégalement répartie. Une variation dans un facteur de 1 à 3.5 a été constatée dans les zones peuplées par l'homme. Le 1^{er} paramètre est la latitude, c'est-à-dire la distance par rapport à l'équateur [2]. L'irradiation solaire diminue au fur et à mesure qu'on se rapproche des pôles (ou qu'on s'éloigne de l'équateur).

La nébulosité du site est également une variable. On remarquera en ce sens que les zones arides à très faibles nébulosité sont les plus soumises aux fortes irradiations solaires (désert d'Atacama au Chili, désert du Sahara en Afrique).

-Voici une carte qui indique le rayonnement mini-maxi exprimé ici en Kwh/m²/jour :

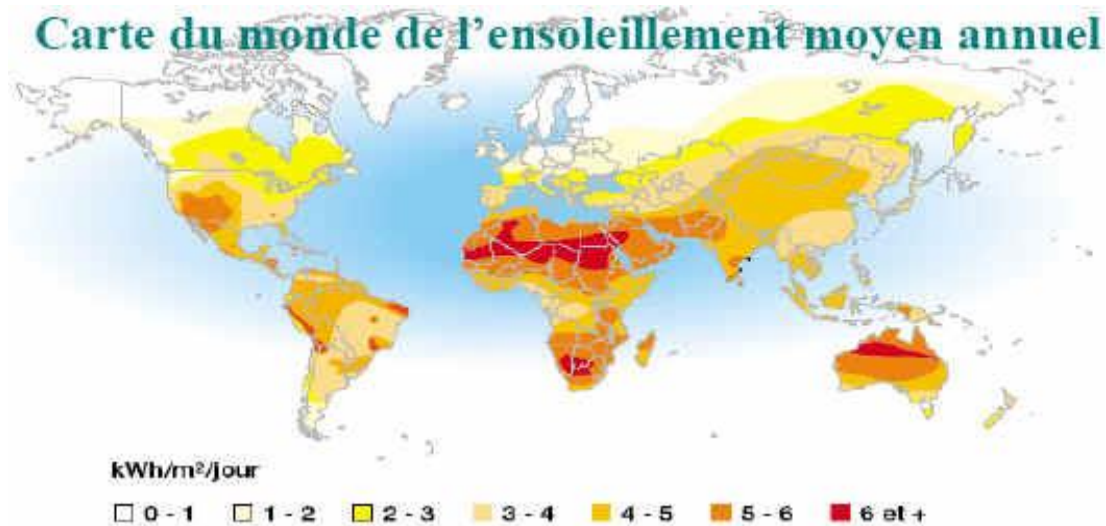


Figure I.5: Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [3].

I.7 - Gisement solaire en Algérie :

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque [4]. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau selon l'ensoleillement reçu annuellement :

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau I.1 : Ensoleillement reçu en Algérie par région climatique.

I.8 - Rotation –Inclinaison de la terre :

Le schéma suivant permet de mieux comprendre l'effet de la rotation et de l'inclinaison 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 solaire 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 est plus grande qu'en hiver. La position du soleil par rapport à la terre est déterminée la hauteur et l'azimut.

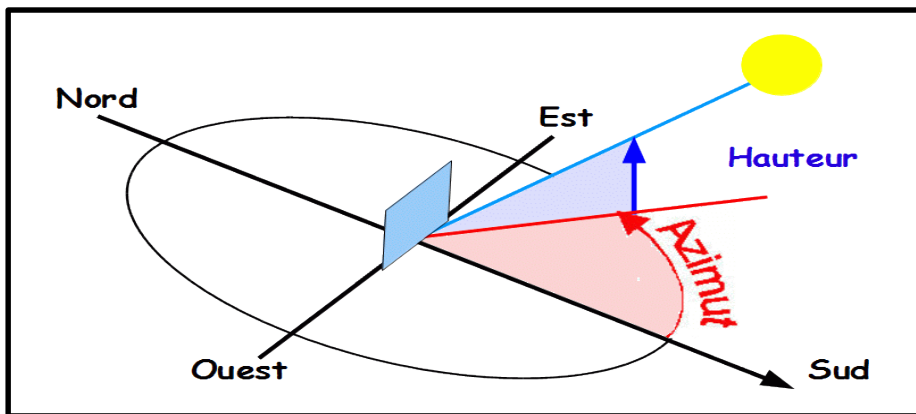


Figure I.6 : La position du soleil.

La quantité d'irradiation solaire, donc d'énergie, est fonction de la position du soleil autrement dit de sa course dans le ciel comme le montre le schéma suivant.

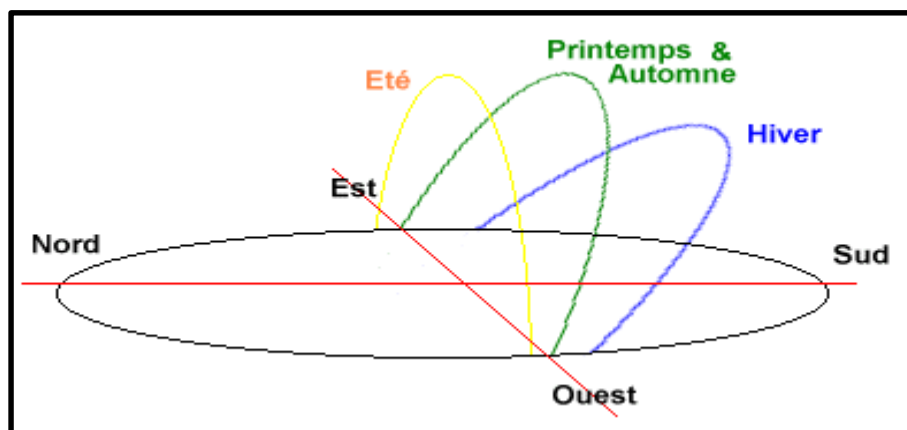


Figure I.7 : Course du soleil en fonction des saisons.

I.9 - Ombrage :

Les modules photovoltaïques sont très sensibles à l'ombrage. Contrairement aux panneaux solaires thermiques qui peuvent tolérer un peu d'ombrage, les modules photovoltaïques ne peuvent être occultés, principalement à cause des connections électriques (en série) entre les cellules et entre les modules.

On distingue deux types d'ombrage : l'ombrage total et l'ombrage partiel. L'ombrage complet empêche tout rayonnement (direct et indirect) d'atteindre une partie de cellule photovoltaïque (par exemple, une déjection d'oiseau, une branche d'arbre sur le panneau, une couverture). L'ombrage partiel empêche seulement le rayonnement direct d'atteindre une partie de la cellule photovoltaïque (par exemple, une cheminée, un arbre, un nuage).

Souvent, les cellules d'un module photovoltaïque sont connectées en série. Ainsi, la cellule la plus faible va déterminer et limiter la puissance des autres cellules. L'ombrage de la moitié d'une cellule ou de la moitié d'une rangée de cellule diminuera la puissance proportionnellement au pourcentage de la surface ombrée d'une cellule, dans ce cas de 50%. L'ombrage total d'une rangée de cellules peut réduire à zéro la puissance du module.

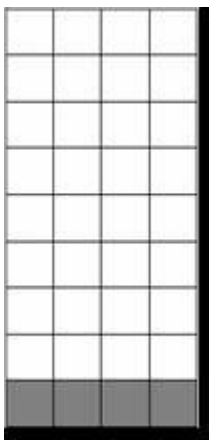


Figure I.8.a : Ombrage total.

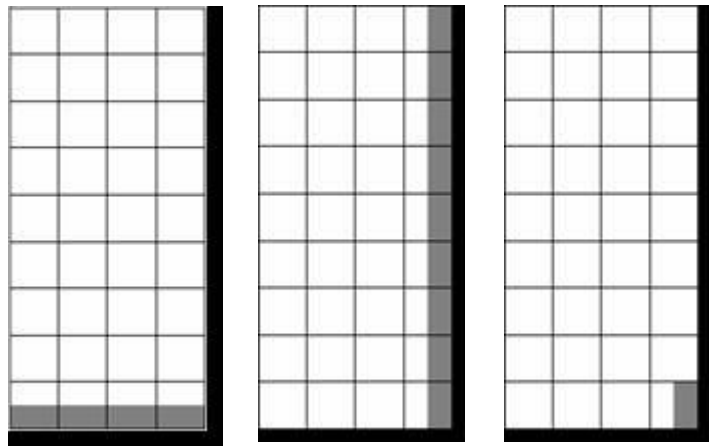


Figure I.8.b : Ombrage Partiel.

Pour ces raisons, il conviendra de choisir un endroit approprié pour l'installation d'un système photovoltaïque où il y a, le moins d'ombrage possible. Si des obstacles présents autour d'une installation photovoltaïque ne peuvent être évités, la conception du système devra permettre d'atténuer les conséquences de ces obstacles sur le rendement.

I.10 - Effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p . Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p . La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p . Une jonction (dite $p-n$) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p , une diode est obtenue.

Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie supérieure ou égale à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir engendrant ainsi une paire électron-trou.

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel: le courant électrique circule ; l'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité.

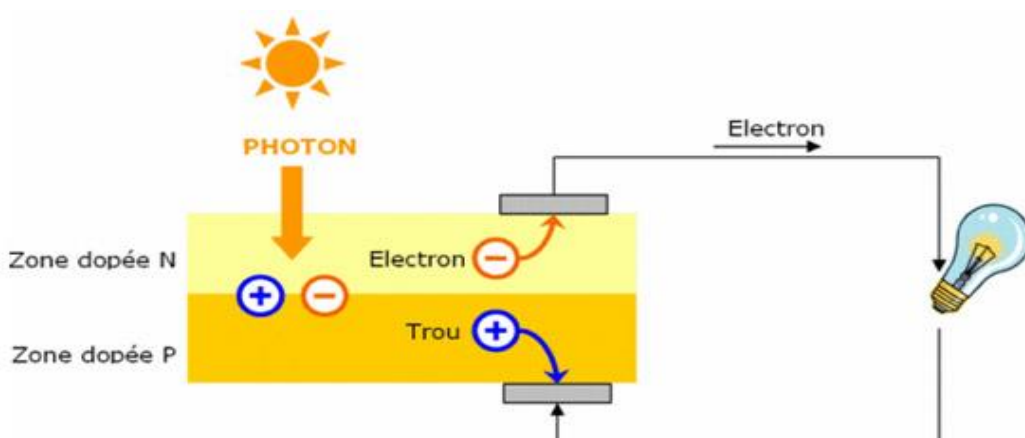
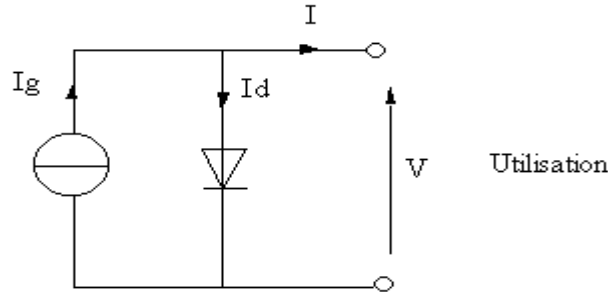


Figure I.9 : Effet photovoltaïque.

I.11 - Cellules photovoltaïques :

I.11.1 – Modélisation de la cellule photovoltaïque :

On peut modéliser une cellule photovoltaïque éclairée comme montre la figure I.10 :



I_g : courant généré I_d : courant de diode I : courant disponible

Figure I.10 : Modélisation d'une cellule solaire.

➤ Cellule éclairée :

Le courant disponible I sera $I = I_g - I_d$ avec $I_g = K \cdot \Phi$ (K étant une constante due à la fabrication de la cellule et Φ l'insolation en W/m^2)

En court-circuit, $V = 0$ donc $I_d = 0$ d'où $I_{cc} = I_g = K \cdot \Phi$.

- Le courant de court-circuit est donc proportionnel à l'insolation.

En circuit ouvert, $I = 0$ et $I_d = I_g$.

➤ Cellule dans l'obscurité :

Si la cellule n'est pas éclairée, $I_g = 0$ et la cellule se comporte comme une diode, donc comme un récepteur.

Remarque : La modélisation représentée ci-dessus est une modélisation d'une cellule idéale.

I.11.2 - Caractéristiques électriques de la cellule :

Les propriétés électriques de la cellule sont synthétisées dans un graphe qu'on appelle caractéristique courant-tension.

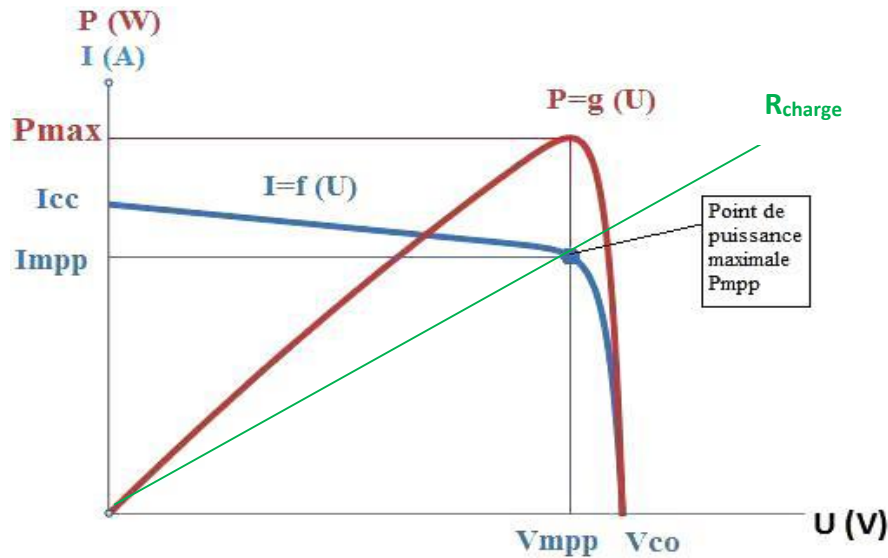


Figure I.11 : Caractéristique courant –tension d'une cellule.

-Trois points sont importants sur cette courbe :

- Le **point de puissance maximale PMPP** - (Maximum Power Point) : c'est quand la charge a une résistance égale à R_{charge} (droite verte) que la cellule délivre la puissance maximale.
- Le **courant de court-circuit** noté I_{cc} : il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est en court-circuit, c'est-à-dire lorsque le pôle + est relié au pôle - (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ($P = U \times I$) est nulle.
- La **tension en circuit ouvert** notée V_{co} : il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle + et le pôle - sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule ($P = U \times I$) est nulle.

I.12 - Branchement des cellules :

I.12.1 - Branchement en série :

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions à courant donné. L'équation (I.2) résume la caractéristique électrique d'une association en série.

$$V_{sco} = n_s * V_{co} \quad (I.2)$$

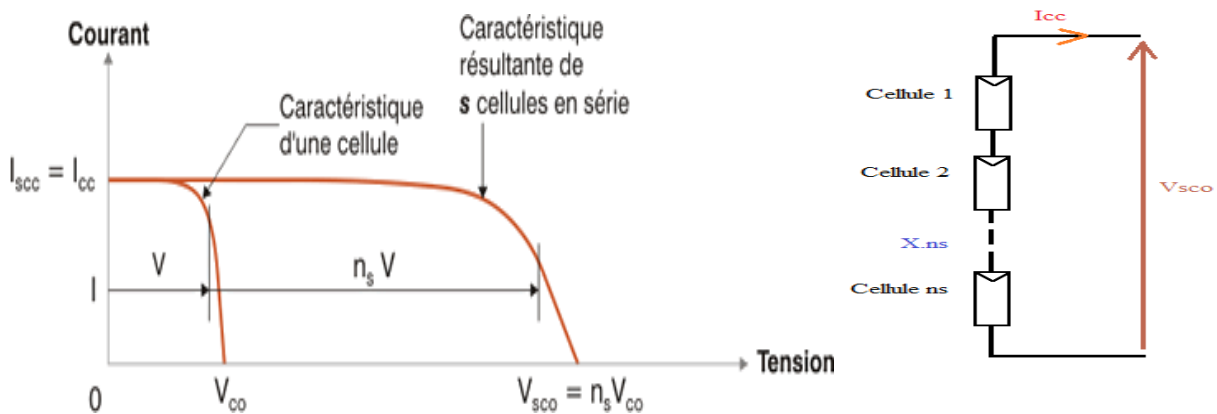


Figure I.12 : Caractéristique électrique d'un branchement en série.

I.12.2 - Branchement en dérivation :

Dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules étant soumises à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée. L'équation (I.3) résume les caractéristiques électriques d'une association en parallèle.

$$I_{pcc} = n_p * I_{cc} \quad (I.3)$$

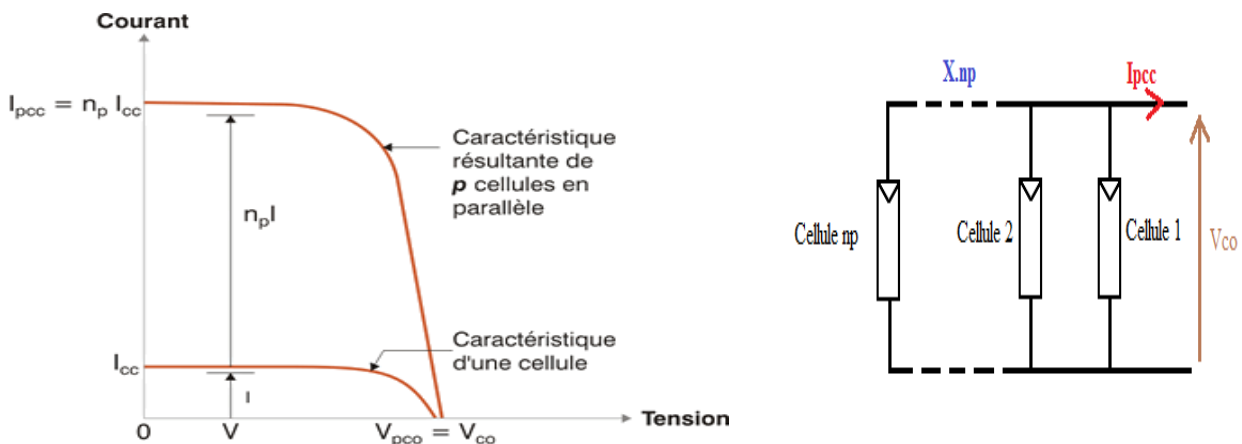


Figure I.13 : Caractéristique électrique d'un branchement en dérivation.

1.12.3 - Branchement mixte série – dérivation :

Dans ce cas, on monte en dérivation des ensembles de panneaux montés en série (on peut aussi monter en série des ensembles de panneaux montés en dérivation).

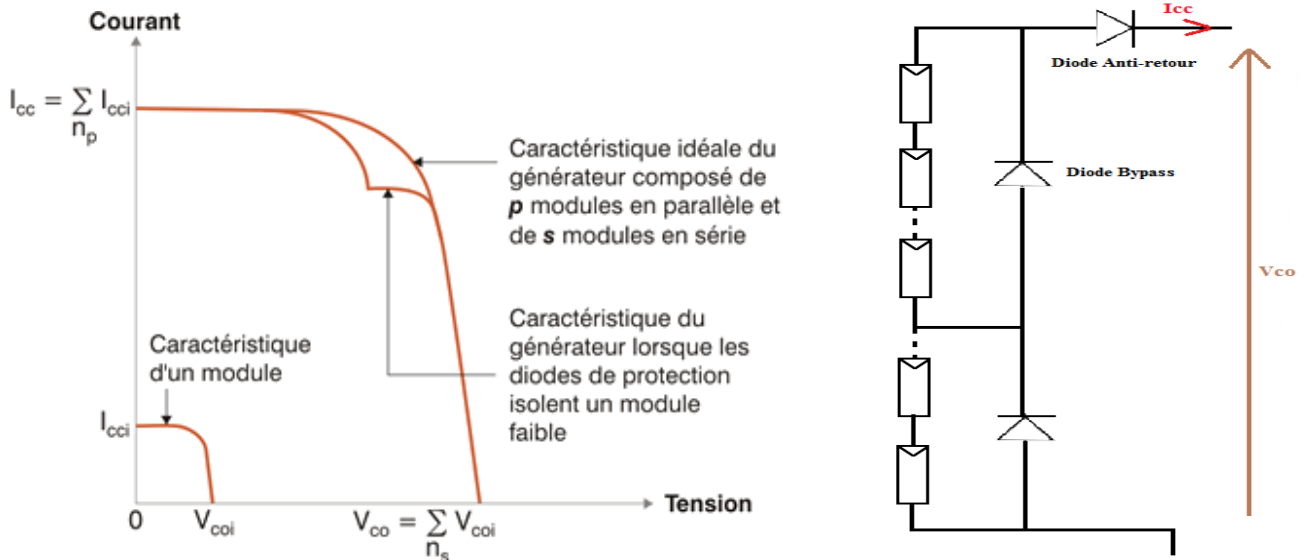


Figure I.14 : Caractéristique électrique d'un branchement série –dérivation.

I.13 - Protection des cellules : Diode By - pass et la diode anti-retour :

Deux types de protection sont généralement indispensables au bon fonctionnement d'un module photovoltaïque :

- La protection par diodes parallèles (ou by-pass) a pour but de protéger une série de cellules dans le cas d'un déséquilibre lié à la défectuosité d'une ou plusieurs des cellules de cette série ou d'un ombrage sur certaines cellules.
- La diode série placée entre le module et la batterie empêche pendant l'obscurité le retour de courant vers le module. Elle est dans ce cas appelée diode anti-retour.

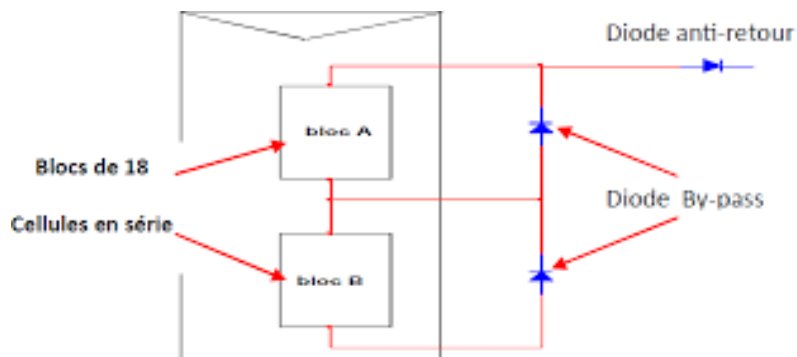


Figure I.15 : Protection des modules « Diode by-pass et anti-retour ».

I.14 - Technologies des cellules photovoltaïques :

Pour la plupart des générateurs photovoltaïque, la matière active est le silicium. Les plus utilisés sont :

I.14.1 – 1^{ère} génération « les cellules cristallines » :

Ces cellules, généralement en silicium, ne comprennent qu'une seule jonction p-n. La technique de fabrication de ces cellules, basée sur la production de "wafers" à partir d'un silicium très pure, reste très énergivore et coûteuse.

On distingue deux types de cellules cristallines :

➤ **Les cellules poly cristallines :**

Le refroidissement du silicium en fusion est effectué dans des creusets parallélépipédiques à fond plat. Par cette technique, des cristaux orientés de manière irrégulière se forment. Cela donne l'aspect caractéristique de ces cellules bleutées présentant des motifs générés par les cristaux.

➤ **Les cellules monocristallines :**

C'est la première génération de photopiles. Ces cellules sont constituées de cristaux très purs obtenus par un contrôle strict et progressif du refroidissement du silicium.



Figure I.16.a : cellule monocristalline.

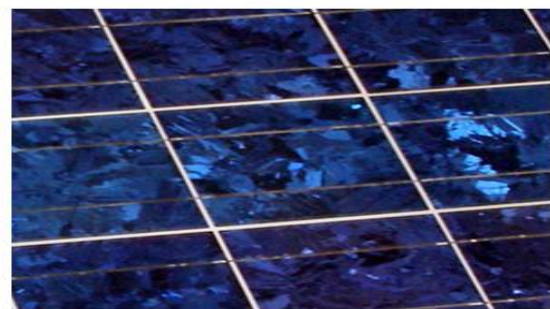


Figure I.16.b : cellule poly cristalline.

I.14.2 - 2^{ème} génération « couches minces » :

Dans le cas de "couches minces", le semi-conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support (du verre par exemple). Le silicium amorphe (a-Si) (silicium non cristallisé de couleur gris foncé), le tellure de cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre indium (CIS) font notamment partie de cette génération. Ce sont des cellules de cette technologie que l'on retrouve dans les montres, calculatrices,... dites solaires !

➤ Le silicium amorphe :

Les cellules au silicium amorphe sont des cellules à couche mince, c'est-à-dire qu'elles sont fabriquées en déposant une fine couche de silicium sur un support (ou "substrat"), par exemple du verre. L'épaisseur de silicium utilisée est beaucoup plus faible que pour les cellules mono ou poly cristallines qui sont réalisées à partir de tranches de silicium. Il existe d'autres types de cellules "couches minces" : tellure de cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre indium (CIS),...



Figure I.17 : Une cellule amorphe souple.

I.14.3 - 3^{ème} génération « multi jonction » :

Pour améliorer les rendements des cellules, la recherche se tourne actuellement vers plusieurs pistes dont notamment :

➤ **Cellules multicouches :**

Superposition de multiples cellules aux propriétés différentes (utilisant des bandes d'énergie différentes permettant un balayage plus large du spectre solaire). Ce type de cellules est déjà commercialisé, mais principalement pour des applications spatiales

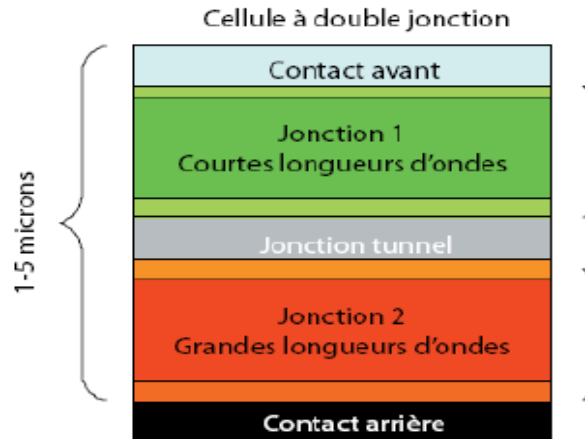


Figure I.18 : Cellule double jonction.

Cellules	Rendement	Avantages	Inconvénients
Cellules monocristallines	de 12 à 19 %	- Très bon rendement.	- Coût élevé. -Rendement faible sous éclairage réduit.
Cellules poly-cristallines	de 11 à 15 %	- Rapport performance/prix	-Rendement faible sous éclairage réduit.
Cellules amorphes	de 5 à 7 %	-Fonctionnent avec éclairage faible. -Moins sensible à l'ombrage et aux élévations de température -Possibilité de créer des panneaux souples	-Rendement global plus faible. -Rendement moindre sous éclairage direct.

Tableau I.2 : Comparaison des trois principales technologies des cellules.

I.15 - Paramètres de performances :

I.15.1 – Influence de la température et de l'éclairement :

La température joue également un rôle important dans la performance des cellules photovoltaïques. Elle a une influence considérable sur le comportement de la cellule et donc sur son rendement. Cette influence se traduit principalement par une diminution de la tension générée (et une très légère augmentation du courant).

Suivant les modèles, ce comportement induit, par degré, une perte de 0.5 % du rendement par rapport au rendement maximum de la cellule. On comprendra donc tout l'intérêt d'une ventilation correcte à l'arrière des panneaux !

L'éclairement correspond à l'intensité lumineuse captée par un module, et se mesure en W/m^2 . La nuit, l'éclairement est nul (0 W/m^2). L'éclairement varie au cours de la journée entre 0 et $1\,000 \text{ W/m}^2$ (valeur maximum), en fonction de la saison. L'éclairement a une nette influence sur le comportement du panneau et donc aussi sur son rendement. Cette influence se traduit principalement par une diminution du courant fournit (et une légère augmentation de la tension).

Une étude d'un panneau photovoltaïque du module BP MXS62 de BP solaire sous environnement MATLAB version 7.1 donne les résultats suivantes :

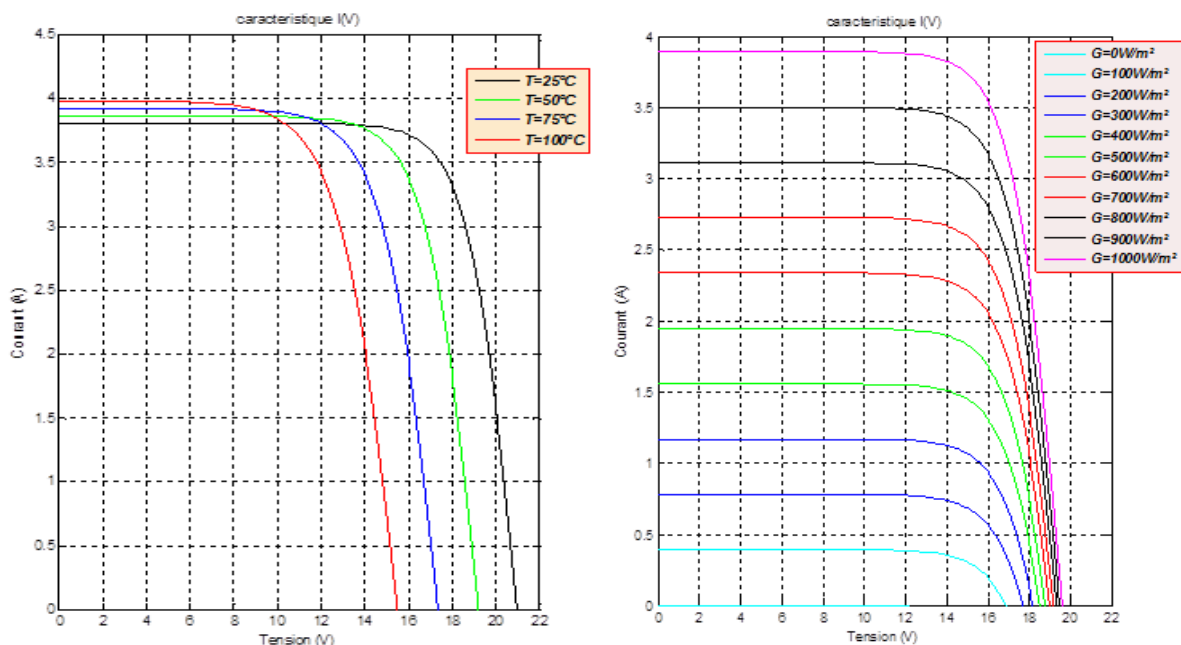


Figure I.19 : Influence de la température et de l'éclairement sur la caractéristique I(V) d'un module BP MXS62 [5].

I.15.2 Les autres paramètres :

Outre les ressources solaires, limitées par les effets d'ombrage, de nombreux autres paramètres peuvent influencer la performance des cellules photovoltaïques.

De façon générale, on retiendra que la surface des modules doit être maintenue propre des poussières, déjections d'oiseaux, mousses, etc. Généralement, il n'y a pas besoin de s'en préoccuper car la pluie nettoie suffisamment la surface des modules, (une inclinaison des modules de 15° est suffisante pour obtenir un auto-nettoyage efficace du verre), mais une vérification périodique est conseillée.

I.16 Conclusion :

En conclusion, l'énergie solaire est inépuisable et disponible gratuitement en grande quantité, donc il faut savoir comment l'exploiter. Dans le chapitre qui suit, on parlera sur les différentes installations destinées pour l'exploitation de cette énergie.

Chapitre II : Les installations photovoltaïques

II.1 - Introduction :

Les installations photovoltaïques sont généralement subdivisées en deux grandes familles : les installations stand-alone (sites isolés), et les installations grid-connected (connectées au réseau). Dans ce chapitre, nous allons donner quelques types d'installations photovoltaïques, ainsi nous allons présenter en détail les éléments principales qui peuvent les constituer.

II.2 - Centrales solaires photovoltaïques:

Les centrales solaires photovoltaïques permettent de produire de l'électricité à grande échelle. Elles rassemblent plusieurs modules solaires photovoltaïques, reliés en série ou en parallèle, qui sont des générateurs de courant continu. D'une puissance allant de quelques MW à plusieurs dizaines de MW le plus souvent, les centrales solaires sont de plus en plus puissantes, et peuvent dépasser les 100 MW en 2012. Qu'il s'agisse de panneaux installés sur les bâtiments ou de centrales, la technique de production d'électricité est la même.

La plus grande et la plus puissante centrale solaire du monde vient d'être connectée au réseau électrique en Californie (Etats-Unis). Avec l'installation des 40 derniers mégawatts, cette centrale solaire a désormais une puissance de 550 MW.



Figure II.1 : La ferme solaire Topaz « la plus puissante du monde ».

Le plus grand parc photovoltaïque d'Europe vient d'être inauguré à Cestas (Gironde), près de Bordeaux. D'une capacité totale de 300 MWc, le plus grand parc photovoltaïque d'Europe produira en moyenne 350 gigawatt heures (GWh) par an, ce qui représente la consommation moyenne d'une ville de la taille de Bordeaux soit environ 130 000 foyers. A titre de comparaison, cela correspond à un tiers de la puissance d'une tranche de réacteur nucléaire de 900 MW ou à 100 à 150 éoliennes.



Figure II.2 : La centrale solaire de Bordeaux.

II.3 - Types d'installation photovoltaïque :

II.3.1 - Installation autonome :

Un système photovoltaïque autonome alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. C'est bien souvent le seul moyen de s'électrifier lorsque le courant du réseau n'est pas disponible (les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne...). Ce type de système nécessite l'utilisation de batteries pour le stockage de l'électricité et d'un contrôleur de charge (régulateur) pour assurer la durabilité des batteries.

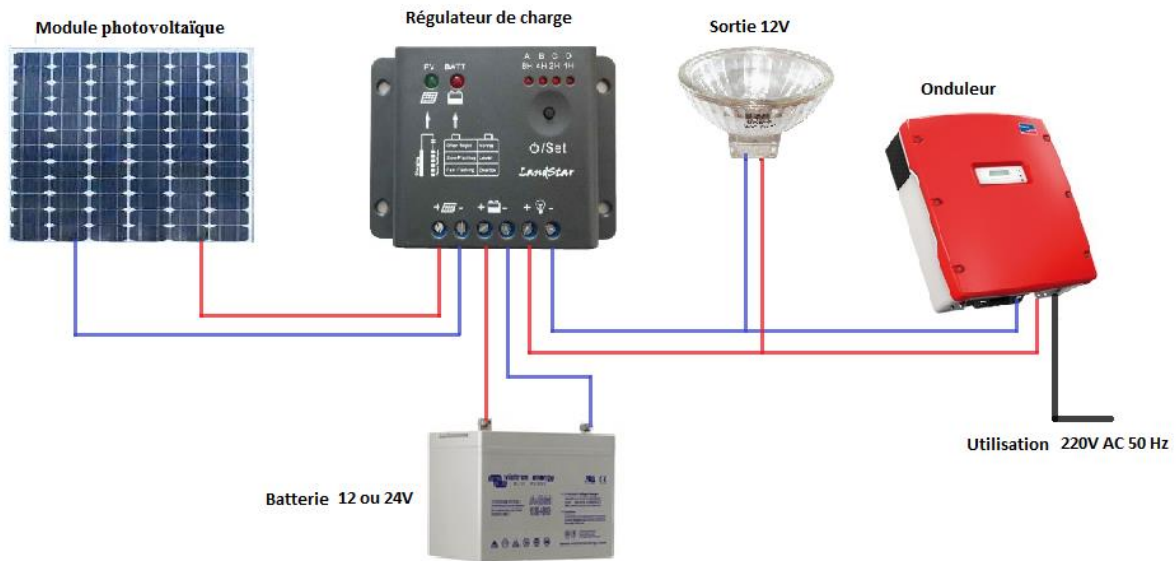


Figure II.3 : Schéma d'une installation photovoltaïque autonome.

II.3.2 – Installation hybride :

Le système hybride de production d'énergie, de façon générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables. Le système hybride présente un double avantage afin de minimiser les perturbations de l'environnement, grâce à une consommation sur le lieu de production de ressources naturelles renouvelables et une sécurité d'approvisionnement, quelles que soient les conditions météorologiques.

II.3.2.1 –Système hybride (photovoltaïque - éolien) :

Un système d'énergies hybrides (photovoltaïque – éolien) associe deux énergies différentes : l'éolien et le photovoltaïque.

Ces deux énergies sont très complémentaires et on retrouve souvent ce concept sur les bateaux ou les sites isolés terrestres. Un tel système permet de fournir de façon quasi permanente de l'énergie électrique. L'utilisation de batteries d'accumulateurs permettra de stocker l'énergie emmagasinée et de la restituer à la demande. La puissance des générateurs éoliens et solaires ainsi que la capacité des batteries est déterminée en fonction des besoins en énergie et bien sûr de la localisation géographique.

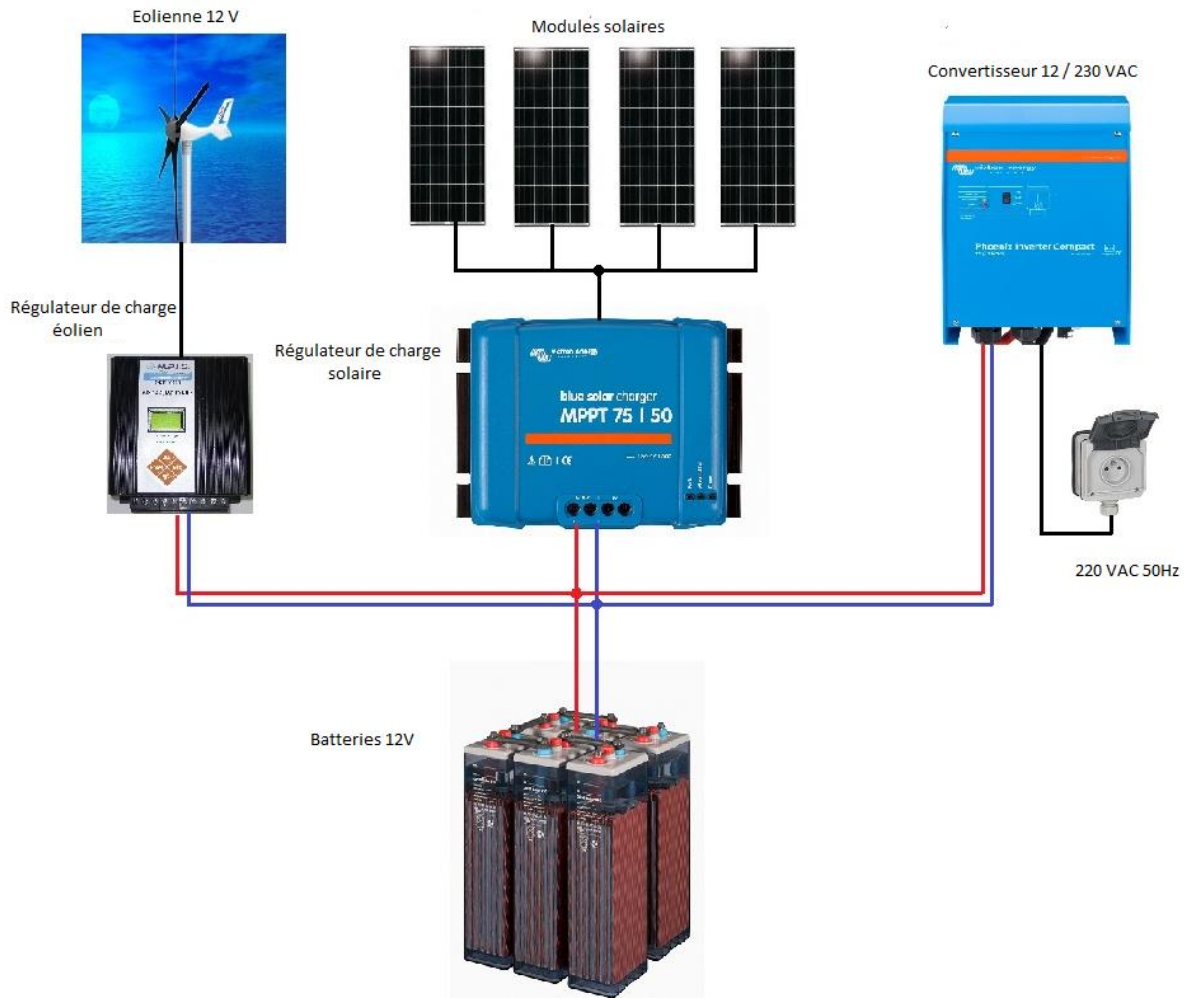


Figure II.4 : Schéma d'une installation hybride (photovoltaïque – éolien)

II.3.2.2 - Système hybride (photovoltaïque - éolien - groupe électrogène) :

L'utilisation d'une énergie de secours telle qu'un groupe électrogène, nous ramène à un système hybride avec trois sources.

Il existe deux types de système de production hybride (photovoltaïque, éolien, groupe électrogène) : système alterné et système parallèle [6]. Le système alterné consiste en association d'un système éolien, un système photovoltaïque et un groupe électrogène relié par un système de commutation entre les trois permettant d'assurer le passage d'un fonctionnement d'une source à une autre (selon les conditions météorologique jour et nuit), par contre le système parallèle relie les deux sources (éolienne, photovoltaïque) en même temps à la batterie et le groupe électrogène intervient en secours (quand les batteries sont déchargées).

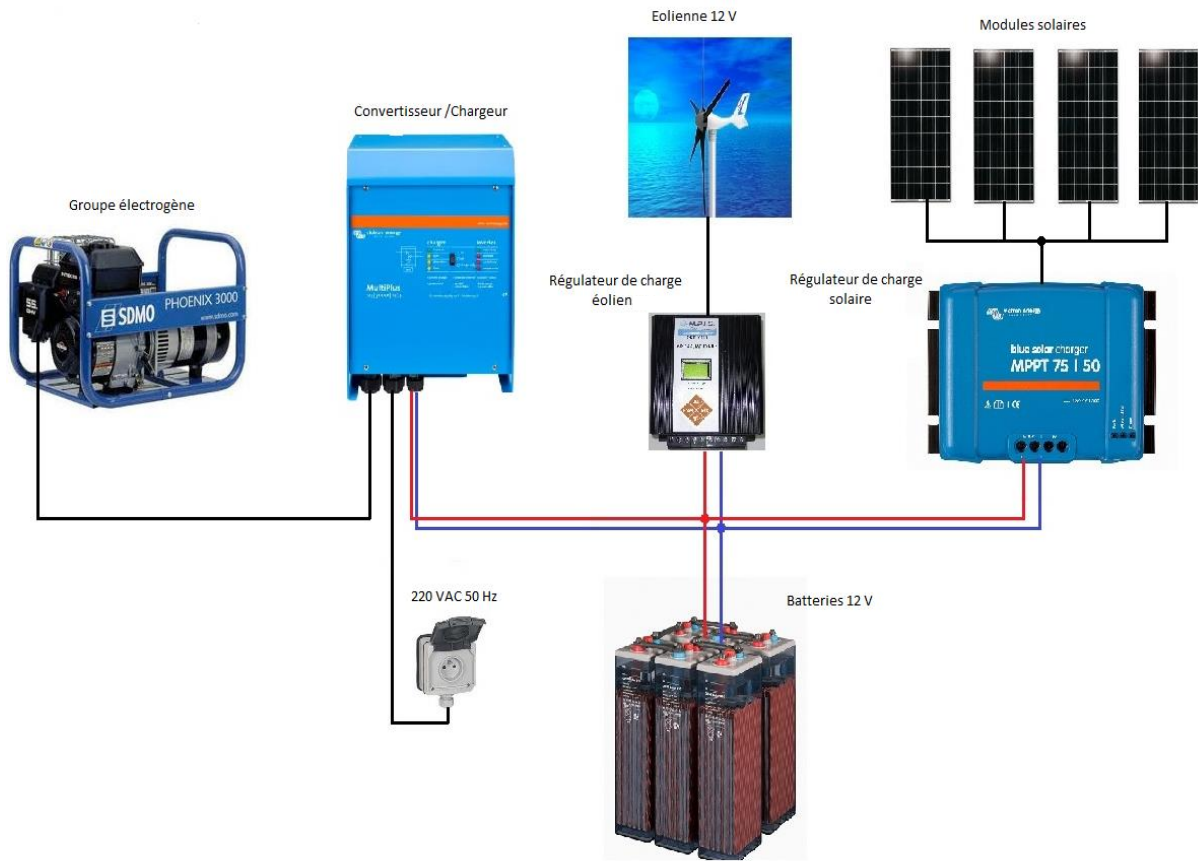


Figure II.5 : Schéma d'une installation hybride parallèle.

II.3.2.3 – Système solaire hybride :

Dans un système solaire hybride, on produit de la chaleur et de l'électricité à partir des panneaux solaires hybrides. Un panneau solaire hybride est composé d'un capteur solaire thermique à haut rendement sur lequel sont disposées des cellules solaires photovoltaïques.

L'inconvénient d'une cellule photovoltaïque classique est que son rendement baisse à mesure que la température augmente. En effet, une partie du rayonnement solaire n'est pas convertie en électricité et se dissipe sous forme de chaleur, augmentant la température de la cellule par rapport à la température ambiante.

Dans un capteur solaire hybride, le fluide (air, eau) qui circule dans la partie thermique pour être réchauffé permet également de refroidir les cellules photovoltaïques et donc d'augmenter leurs rendements. La température du système solaire hybride est ainsi stabilisée à environ 45°C, cela permet de produire plus d'électricité photovoltaïque qu'un capteur PV conventionnel de même puissance crête tout en produisant de la chaleur. Pour une installation solaire hybride, on a un rendement 3 à 4 fois supérieur à une installation

photovoltaïque de base. L'inconvénient majeur de cette installation est son coût d'investissement : entre 30 et 40% plus cher qu'une installation PV standard.



Figure II.6 : Panneaux solaires hybride.

II.3.2.4 - Installation raccordée au réseau :

Une installation photovoltaïque raccordée au réseau comprend les composants suivants :

- Un ensemble de panneaux photovoltaïques.
- Un ensemble d'onduleurs transformant le courant continu en alternatif.
- Un système de comptage permettant de mesurer l'énergie électrique produite par le système et celle injectée au réseau électrique.

L'énergie électrique produite par l'installation photovoltaïque sera consommée directement au niveau du bâtiment. En cas de surplus, l'excédent sera injecté sur le réseau public.

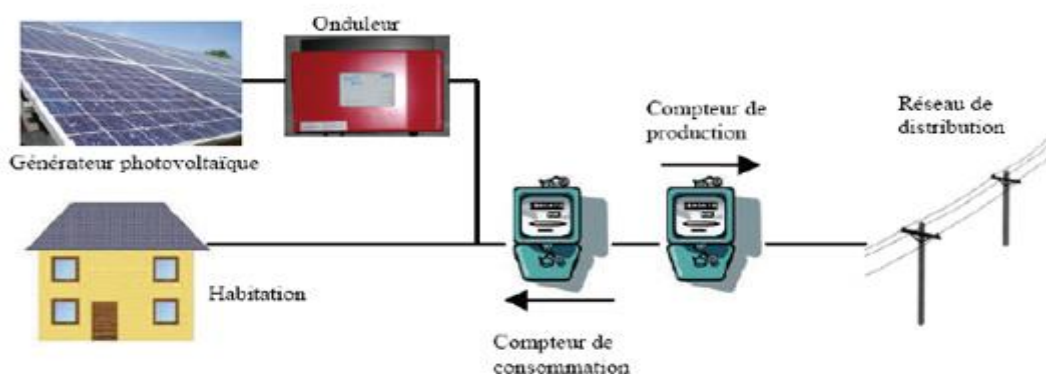


Figure II.7 : Schéma d'une installation raccordé au réseau.

II.3 - Les éléments d'une installation photovoltaïque :

II.3.1 - Le module photovoltaïque :

Un module photovoltaïque est un capteur solaire photovoltaïque qui fonctionne comme un générateur électrique de courant continu constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement, qui sert de module de base pour les installations photovoltaïques et notamment les centrales solaires photovoltaïques. Le but de cette association est triple :

- Obtenir une tension suffisante grâce à la connexion en série de nombreuses cellules, protéger les cellules et leurs contacts métalliques contre les conditions ambiantes (humidité,...).
- Protéger mécaniquement les cellules, qui sont très fragiles.
- Les matériaux utilisés pour l'encapsulation doivent avoir une durée de vie élevée pour résister aux variations de température et à l'exposition aux rayons UV.
- Les modules doivent aussi résister aux efforts mécaniques (transport, montage, efforts éoliens) et aux averses de grêle. Enfin, ils doivent pouvoir se fixer facilement sur une structure.

Les cellules sont noyées dans un bain de résine et encapsulées entre de deux vitres en verre trempé ou entre une vitre et une feuille de TEDLAR.

Le tout est généralement insère dans un cadre aluminium anodisé.

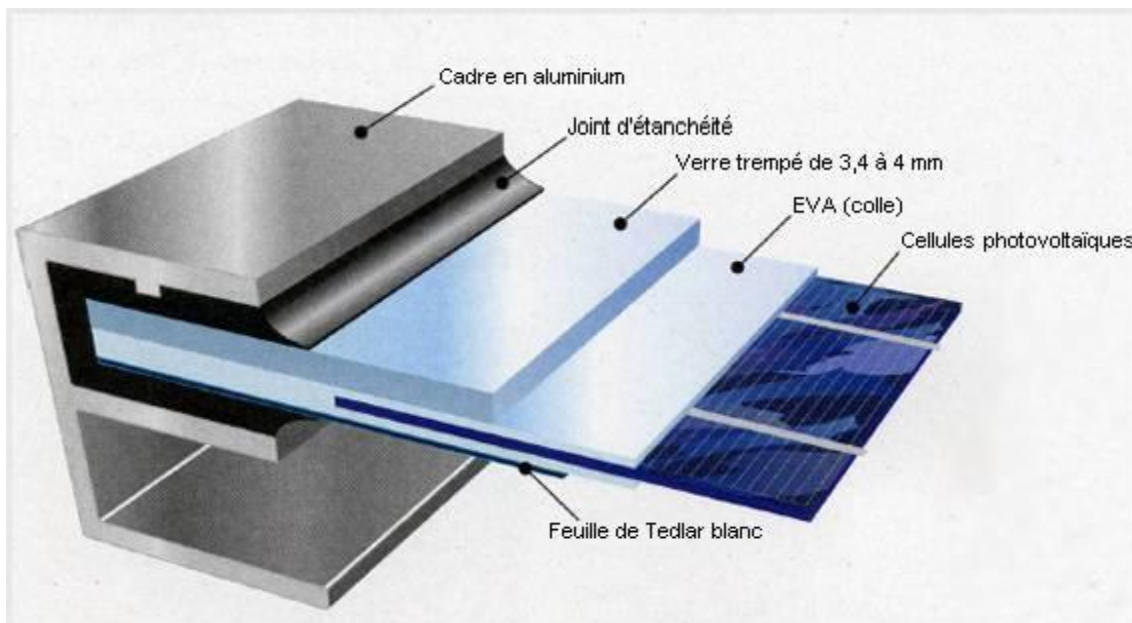


Figure II.8 : Coupe d'un module photovoltaïque.

II.3.2 - Le régulateur de charge et de contrôle :

Un régulateur de charge appelé aussi contrôleur de charge, est un système ou appareil électronique fonctionnant de façon complètement automatique auquel sont raccordés le générateur (modules PV), la batterie ainsi que d'éventuels équipements de l'installation.

II.3.2.1 - Le rôle d'un régulateur de charge et de contrôle :

Le régulateur de charge principalement sert avant tout à contrôler l'état de la batterie. Il existe plusieurs valeurs limites correspondant chacune à un type de protection différent : surcharge, décharge profonde, température de fonctionnement, court-circuit, etc. Les nouvelles générations de régulateurs, quant à eux, sont de plus en plus perfectionnées et proposent des fonctionnalités plus nombreuses et de plus en plus évoluées.

II.3.2.2 - Les types d'un régulateur de charge et de contrôle :

On peut distinguer deux grandes familles de régulateurs, si on s'intéresse particulièrement à leur structure, ceux où la connexion est directe entre le module photovoltaïque et la batterie, et ceux où la connexion comporte un étage intermédiaire d'adaptation d'impédance [7]. Dans ces deux types de famille on peut citer :

➤ **Les régulateur série / shunt :**

Ces régulateurs à connexion directe doivent intégrer les fonctionnalités de charge, décharge et sécurité citées précédemment. Deux types de régulateurs sont appropriés à ces exigences : le régulateur série et le régulateur shunt. La différence majeure entre les deux structures est le moyen de déconnecter l'énergie produite par le module photovoltaïque de la batterie. Dans la majorité des régulateurs, les interrupteurs sont des MOSFET.

➤ **Le régulateur « PWM » (Pulse Width Modulation) :**

Certains régulateurs réalisent une commande PWM, le rapport cyclique variant selon l'énergie à fournir à la batterie afin de réaliser une charge à tension constante. Celui-ci est un peu plus subtil que le « tout ou rien » : Les régulateurs solaires traditionnels intégrant la technologie PWM relient les panneaux solaires au banc de batteries. Dans cette utilisation directe, la tension de sortie des panneaux est réduite à la tension nominale des batteries.

➤ **Le régulateur MPPT :**

Ce régulateur est actuellement la meilleure solution .les régulateurs MPPT (Maximum Power Point Tracking) traquent la tension V_{mp} des modules. Ils balayent une plage de tension en entrée pour déterminer constamment à quel point se trouve la puissance maximale délivrée par les modules. Le régulateur MPPT prélève la puissance à cette tension V_{mp} et la renvoie vers les batteries sous une tension plus basse, ce qui a pour effet d'augmenter le courant de charge. La puissance est égale au produit de la tension et du courant, ainsi, si la tension est réduite, le courant augmente nécessairement pour maintenir le ratio entrée/sortie égal. Pour un rendement de 100% : Puissance d'Entrée = Puissance de Sortie.

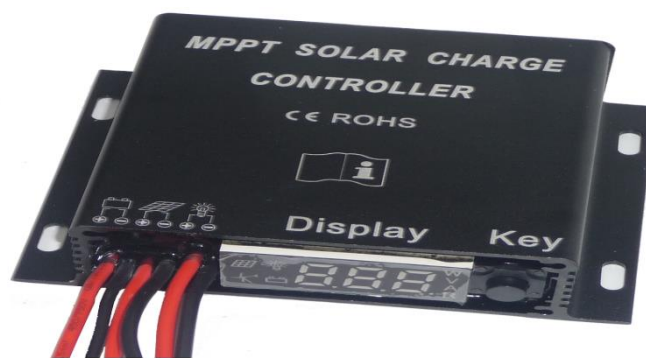


Figure II.9 : Régulateur de charge MPPT.

II.3.3 - L'onduleur :

Les onduleurs photovoltaïque transforment le courant continu CC des batteries ayant des tensions nominales 12, 24 ou 48 VCC en courant alternatif CA afin d'alimenter tous les appareils électriques CA en milieux résidentiels, industriels, institutionnels ou commerciaux (généralement du 120 et 240 VCA).

II.3.3.1 - Types d'onduleur :

Le type d'onduleurs à utiliser dépend des paramètres d'installation et de branchement des modules photovoltaïques : branchement en série ou en parallèle, degrés d'inclinaison différents entre les modules, tension de sortie de l'installation, flux lumineux général, écart de puissance entre les modules. On distingue quatre types :

- L'onduleur centralisé.
- L'onduleur « String ».
- L'onduleur « Multi-String ».
- L'onduleur modulaire.

-Voici un tableau qui décrit les différents types des onduleurs :

Type	Description	Paramètres	Avantages
Onduleur centralisé	-Un onduleur pour la totalité du générateur -Utilisation d'un boîtier de raccordement entre le générateur et l'onduleur	-Pour les montages combinant branchement en série et en parallèle -Flux lumineux identique pour tous les modules	-Faibles tolérances de puissance entre les modules -Possibilité de grimper à une puissance de plusieurs MW
Onduleur « String »	-Modules branchés en série dans un string (rangée) -Un onduleur pour chaque string	-Flux lumineux différents entre les rangées -Rangées branchées au réseau via son onduleur	-MPP tracking personnalisé pour chaque rangée -Adaptés pour les rangées à degrés d'inclinaison différents -Adaptés aux installations puissantes
Onduleur « Multi-String »	-Association d'onduleurs centralisés et « string » -Onduleur centralisé du côté du côté du branchement au réseau -Onduleur string du côté des générateurs	-Types de modules différents -Orientations de modules variées -Ombres partielles sur l'installation -Nombre de modules différents par rangée	-Meilleur rendement que pour un onduleur centralisé grâce à la possibilité d'un MPP tracking pour chaque rangée -Modularité de l'installation
Onduleur modulaire	-Branchement direct des modules sur le réseau -Un onduleur pour chaque module.	-Pour les installations de petite puissance	-Pas de câblage de courant continu -Un module ombragé n'influe pas sur le reste de l'installation

Tableau II.1 : Les différents types des onduleurs photovoltaïques

II.3.3.2 - Critères de choix de l'onduleur :

L'onduleur est la pièce maîtresse de l'installation photovoltaïque, mais aussi la seule pièce d'usure. Un mauvais choix au niveau des critères que nous venons d'énoncer conduit à de grandes déceptions sur la production électrique et/ou sur la longévité du matériel, toutes choses influant de façon importante sur la rentabilité de l'installation photovoltaïque.

- ✓ Critère de choix n° 1 : une puissance adaptée.

La puissance de l'onduleur doit correspondre à la puissance maxi des panneaux composant l'installation. L'onduleur doit avoir une plage de tension couvrant la tension maximale et la tension minimale. L'intensité de l'installation ne doit pas dépasser l'intensité maximale de l'onduleur.

- ✓ Critère de choix n° 2 : La marque, donc la fiabilité et le rendement.
- ✓ Critère de choix n° 3 : Conformité aux normes.

II.3.4 - La batterie :

Une batterie solaire est un appareil destiné à stocker l'énergie électrique produite par les panneaux solaires photovoltaïques. Les batteries sont indispensables dans les installations autonomes car les modules photovoltaïques ne fonctionnent que quand il y a de la lumière. Pour consommer de l'électricité le soir ou la nuit, il faut donc que les batteries en aient emmagasiné la journée.

II.3.4.1 - Quelques définitions liées à la batterie :

-Capacité nominale: C'est la quantité maximum d'énergie que contient une batterie (25°). Elle s'exprime en Ampère heure (Ah).

-Etat de charge: C'est le pourcentage de la quantité d'énergie disponible dans la batterie à un instant $\ll t \gg$.

-Profondeur de décharge (PDD): C'est le pourcentage d'énergie maximum que l'on peut retirer d'une batterie. Elle ne doit pas être déchargée au-delà de cette valeur, afin de prolonger sa durée de vie. En général, on choisit PDD = 25% pour 2 jours d'autonomie ou moins, PDD = 70% pour 4 jours d'autonomie, PDD = 80% pour plus de 8 jours d'autonomie.

-Tension nominale : C'est la tension type de la batterie. Elle correspond aussi à la tension de fonctionnement du système autonome. Ex : Tension 12V, 24V, 48V...

-Taux de décharge: C'est le temps nécessaire pour décharger entièrement la batterie. Supposons une batterie de capacité de 100Ah et de courant de décharge de 5 A : Le taux de décharge sera $100\text{Ah} / 5\text{A}$ soit 20 heures ; Il est noté $C/20$.

-Taux de recharge: C'est la quantité de courant qu'il faut pour recharger une batterie en un temps donné (temps du taux de décharge). Supposons une batterie de 100Ah et de taux de décharge $C/20$: Le taux de recharge sera $100\text{Ah} / 20\text{h}$ soit 5 A.

-Cycle et durée de vie: C'est le nombre de séquences de charge/décharge, que peut subir une batterie à sa profondeur de décharge. Il détermine les performances de la batterie et sa durée de vie.

-Nombres de jours d'autonomie: C'est la durée pendant laquelle la batterie peut alimenter toute seule l'installation en courant, sans être rechargée ni endommagée.

II.3.4.2 - La température de la batterie :

De tous les facteurs environnementaux, la température est celui qui influe le plus sur le comportement de la batterie en terme de charge et décharge. L'explication réside dans les réactions électrochimiques dépendantes de la température qui se produisent à l'interface électrode / électrolyte, qui peut être considérée comme le cœur de la batterie. Une augmentation de la température accélère les réactions électrochimiques, une baisse de la température les ralentit. Les performances de charge / décharge de la batterie peuvent ainsi être affectées.

II.3.4.3 - Types de batterie :

Il existe principalement trois technologies des batteries solaires :

- Batteries solaires au plomb ouvert ou fermé.
- Batteries solaires AGM.
- Batteries solaires GEL.

II.4 - Conclusion :

Même si l'énergie solaire est gratuite, une installation photovoltaïque ne s'amortit qu'après de nombreuses années. De ce fait une surveillance complète de l'installation photovoltaïque à long terme est rentable. Car chaque kilowatt-heure alimenté par le courant solaire compte et se transforme en argent comptant. Dans le prochain chapitre, On parlera sur des dispositifs de contrôles et gestion de bon fonctionnement d'une installation photovoltaïque qui sont les enregistreurs automatiques des données ou **DATALOGGERS**.

Chapitre III : Etude comparative des dataloggers dédiés aux systèmes photovoltaïques

III.1 - Introduction :

La surveillance ou le monitoring des processus exige une instrumentation spéciale. Les dataloggers sont employés pour effectuer cette tâche. Dans ce chapitre, nous allons exposer leurs différentes applications. Ainsi, nous allons présenter quelques critères pour le choix d'un datalogger dédié à un système photovoltaïque. Enfin, nous allons faire une étude théorique du notre datalogger réalisé.

III.2 - Les dataloggers :

III.2.1 - Définition d'un datalogger :

Un enregistreur de données ou datalogger est un système électronique qui permet d'enregistrer des valeurs de mesures individuelles et des séries de mesure sur une longue période (pouvant couvrir plusieurs mois). Les grandeurs sont mesurées de façon totalement automatique, et numérisées et enregistrées sur un support souvent numérique.

Les données peuvent être affichées sur un afficheur, et peuvent être transmises à un ordinateur, où il existe un logiciel qui permet de visualiser les données et de les analyser.

Selon le type d'enregistreur de données, les grandeurs mesurées peuvent être : température, humidité, tension, intensité, vitesse, pression, position GPS ...etc.

Le plus souvent ces enregistreurs de données sont utilisés dans les milieux industriels pour pouvoir contrôler les systèmes et pouvoir les diagnostiquer.

Selon l'application d'un enregistreur de données, il peut être autonome ou alimenté par batterie ou par panneaux solaires (exemple : système de mesure en milieu externe). Souvent ces enregistreurs sont menus d'un système d'affichage qui permet d'accéder à un menu de configuration, et d'afficher les valeurs mesurées.

Un tel système doit disposer d'un dispositif de stockage qui permet d'enregistrer les mesures effectuées, ce dispositif peut être une mémoire interne ou une mémoire externe (carte mémoire, flash disk , ...).

Pour assurer une grande autonomie, les enregistreurs de données font appel à des circuits intégrés consommant très peu d'énergie.

La connexion de l'enregistreur au PC se fait par interface série (RS 232) ,USB, LAN, Bluetooth,etc....

III.2.2 - Comparaison entre les dataloggers et les autres instruments de collecte de données :

Trois types d'instruments sont couramment utilisés pour la collecte et le stockage des données. Ils sont:

- ✓ Les systèmes d'acquisition de données en temps réel.
- ✓ Les enregistreurs à tracé continu.
- ✓ Les collecteurs de données.

Les dataloggers sont normalement plus économiques que les enregistreurs graphiques. Ils offrent plus de souplesse et sont disponibles avec une plus grande variété de types d'entrée. La plupart des enregistreurs de données recueillent des données qui peuvent être transférées directement à un ordinateur. Bien que cette option est disponible avec certains enregistreurs, il augmente le prix de l'enregistreur considérablement.

Les systèmes d'acquisition de données offrent une grande souplesse et sont certainement avantageuses lorsque les taux d'échantillonnage élevés sont nécessaires; cependant, puisqu'ils nécessitent une connexion ou une installation dans un ordinateur, l'ordinateur doit également être présent et actif lors de la collection des données. Les dataloggers peuvent recueillir des données indépendamment d'un ordinateur. Les données sont normalement collectées dans une mémoire non volatile pour télécharger plus tard sur un ordinateur. L'ordinateur n'a pas besoin d'être présent pendant le processus de collecte de données. Cela les rend idéales pour les applications qui nécessitent la portabilité.

III.2.3 - Application :

- **Applications médicales:**

Les applications médicales du datalogger sont diverses. Le datalogger sert à contrôler :

- ✓ Processus de stérilisation.
- ✓ Le transport des vaccins, des produits sanguins, des organes et de l'équipement médical.
- ✓ Stockage médical dans les réfrigérateurs, congélateurs et salles de culture.
- ✓ Les signaux biomédicaux.

- **Applications industrielles :**

- ✓ Le suivi du processus pour vérifier les conditions de garantie.
- ✓ Mesure des vibrations et les chocs de la manutention.
- ✓ Surveillance du niveau d'un réservoir.
- ✓ Surveillance de la déformation des objets.
- ✓ Surveillance de la pression d'un gaz.

- **Autres applications :**

- ✓ Dans l'agriculture, l'horticulture et l'élevage : surveillance des conditions de culture, stockage, transport et santé animale.
- ✓ Les musées et les galeries : présentation et transport des articles délicats ; surveillance des objets anciens et des archives.
- ✓ Comptage du trafic routier.
- ✓ Sur véhicules (diagnostic, développement (prototypes)) ; « boîte noire » pour certaines automobiles.



Figure III.1 : Les différentes applications des dataloggers.

III.3 – Les datalogger dédiés aux systèmes photovoltaïques :

III.3.1 - Présentation générale :

La supervision d'une installation photovoltaïque, ou monitoring, permet d'évaluer la qualité de fonctionnement du système et à contrario de détecter les éventuelles anomalies. Elle est en général composée d'un système d'acquisition et de stockage des données, d'un logiciel de traitement du signal ou d'analyse, et d'un afficheur. Souvent les systèmes d'acquisition de données sont des dataloggers ou enregistreurs de données spécialement conçues pour une exploitation sans faille et une gestion intelligente de l'énergie.

III.3.2 - La nature des données stockées :

Le datalogger est capable de réunir plusieurs paramètres météo du site et de l'installation. Les données généralement mesurées sont :

- ✓ L'irradiation sur la surface inclinée ;
- ✓ La température ambiante ;
- ✓ La température d'un module de référence ;
- ✓ La tension DC et AC des onduleurs ;
- ✓ La valeur du courant DC et AC des onduleurs ;
- ✓ La puissance de réseau ;
- ✓ La puissance transmise au réseau pour chaque onduleur.

III.3.3 - Le stockage :

Les mesures prises sont généralement stockées soit dans :

- ✓ La mémoire propre du datalogger 'mémoire interne'.
- ✓ Des modules externes : Clef USB, Carte SD, Carte CF,....

III.3.4 - Le transfert de données :

Les données sont transférées soit par une liaison câblée (RS 232, RS 422, RS 485) ou radio (Wifi, Bluetooth,...) et souvent visualisées à l'aide d'un ordinateur de type PC sur lequel est installé un logiciel d'exploitation qui dépouille et traite les données. La figure III.3 présente la carte d'un datalogger et la figure III.4 présente l'interface d'un logiciel d'exploitation GS logger.



Figure III.2 : Carte interne d'un datalogger, copyright FRONIUS.



Figure III.3 : Interface GS logger.

III.3.5 - Différents types des dataloggers:

La plupart des constructeurs de nos jours proposent trois modèles différents des dataloggers destinés pour la surveillance des installations photovoltaïques. Donc, les trois types sont :

- ✓ Les dataloggers pour la surveillance des petites installations <100 Kw.
- ✓ Les dataloggers pour la surveillance des moyennes installations 100 Kw.
- ✓ Les dataloggers pour la surveillance des grandes installations > 100 Kw.



Figure III.4 : Les trois modèles des dataloggers WEB'log (Light+ ,Basic , Pro).

III.3.6 - Comparaison des dataloggers :

Après une longue recherche bibliographique et sur internet au sujet des dataloggers dédiés aux systèmes photovoltaïque et la comparaison entre eux, nous avons relevés les critères les plus importants dans le choix d'un datalogger. Voici quelques critères :

- **L'autonomie d'enregistrement :**

L'autonomie d'enregistrement d'un datalogger est définie comme la durée pendant laquelle il fonctionne (enregistre les données) avec sa propre alimentation, sans être alimenté par une source extérieure. Elle dépend généralement de deux facteurs :

- La batterie (s'il s'agit d'un datalogger alimenté par une batterie).
- La consommation des circuits intégrés inclus dans la conception du datalogger.

La plupart des dataloggers offrent une autonomie d'une année, mais il existe d'autres qui ont une autonomie de plusieurs années !

Le datalogger HOBO U30-NRC pour la surveillance des installations photovoltaïque est un exemple d'un datalogger qui a une autonomie de 5 ans.



Figure III.5 : Datalogger HOBO U30-NRC.

- **Le nombre des paramètres à mesurer :**

L'influence de divers paramètres météo et la variation de la production d'une installation nécessite la collecte de plusieurs paramètres à la fois afin de les contrôler. Les meilleurs datalogger regroupent les différents paramètres de production (les puissances, les tensions..) et possèdent plusieurs entrées analogiques pour communiquer avec les capteurs (température, rayonnement...).

- **La capacité de stockage :**

Le stockage d'un grand nombre de paramètres à long terme exige une grande capacité de stockage. Pour certains datalogger la capacité de stockage est un facteur limitatif, mais ils existent d'autres qui sont capables de stocker des millions de valeurs mesurées !

- **Option de connectivité :**

La plupart des dataloggers de nos jours utilise une liaison radio (Bluetooth, Wifi,..) pour connecter à PC centrale ou les mesures sont visualisées à l'aide d'un logiciel d'exploitation. Mais ceci ne veut pas dire que les liaisons câblées (RS232, RS422, RS485,..) sont inutilisables. Par contre, les liaisons câblées sont fiables surtout lorsque il s'agit d'une communication de courte distance. Parfois, le type de surveillance (locale, à distance) est le facteur majeur qui détermine la liaison appropriée.

III.4 - Etude théorique du datalogger réalisé :

III.4.1 - Composition du système :

- Le schéma synoptique du datalogger réalisé est représenté ci-dessous :

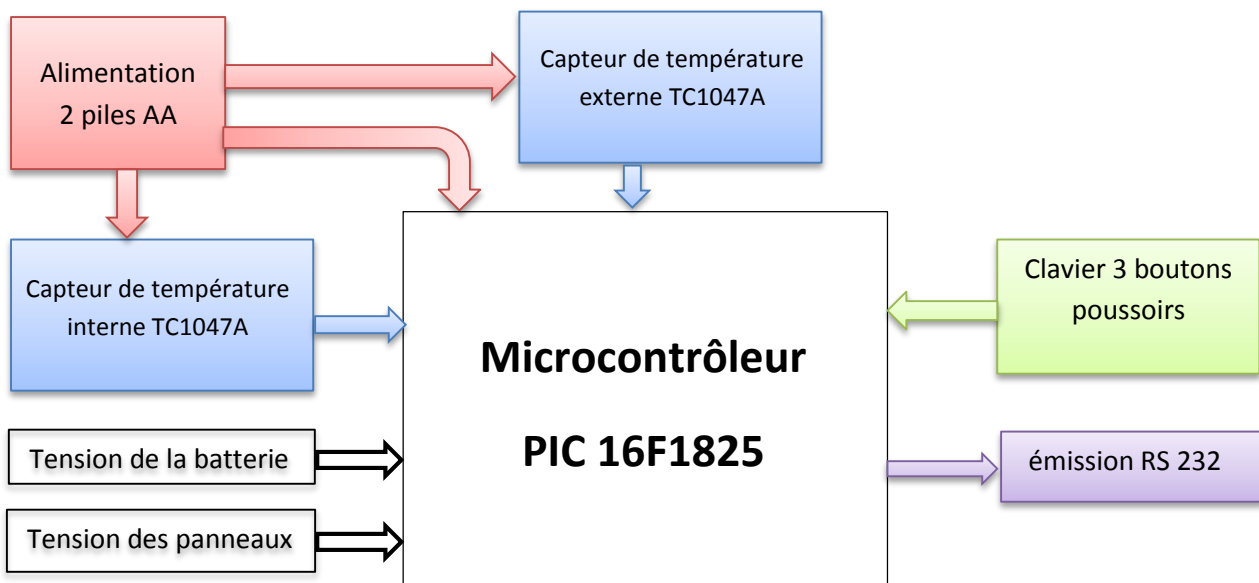


Figure III.6 : Synoptique du datalogger réalisé.

III.4.2 – Les microcontrôleurs :

Un microcontrôleur est un composant électronique pas tout à fait comme les autres : son boîtier est souvent doté de plusieurs dizaines de pattes, quand à son architecture interne, elle fait souvent fuir l'amateur électronicien par son apparente complexité. Toutefois, l'apparition des microcontrôleurs de la famille PIC (développée par la société américaine Arizona Microchip Technology), dès les années 90, a entamé une véritable révolution dans la conception et réalisation des montages électroniques. Grâce à leur puissance sans cesse accrue, ce qui, autrefois demandait une électronique digitale très complexe, est devenu de nos jours d'une simplicité déconcertante, et d'un coût imbattable, tout en offrant des performances supérieures. Le domaine de prédilection de ces microcontrôleurs est couramment dénommé M.C.R. (mesure, contrôle, régulation).

Un microcontrôleur, tout comme un microprocesseur, est un composant que l'on doit programmer (en assembleur ou en langage C, le plus souvent) pour qu'il exécute automatiquement des commandes (codes machines). 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. Avec l'évolution des microcontrôleurs, on trouve maintenant couramment d'autres modules importants, tels que des convertisseurs analogique numérique (CAN) de 8, 10 ou 12 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 I2C) 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.

III.4.3 – Le PIC16F1825 :

Le PIC16F1825 est un microcontrôleur 8 bits de la gamme *mid-range* de Microchip. Il est réalisé en technologie CMOS et peut être cadencé par une horloge de 0 à 20 MHz. Son alimentation se fait 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 usage multiple. Pour simplifier, le PIC16F616 dispose de deux ports d'entrées sorties, dénommés Port A et Port C. Le port A est manipulé à travers les 6 lignes (broches 11, 12, 13, 4, 3, 2), tandis que le port C

est manipulé à travers les 6 lignes (broches 5, 6, 7, 8, 9, 10). Deux broches (2 et 3) sont aussi réservées aux circuits de l'horloge à quartz ou RC ou de l'horloge externe, tandis que l'alimentation du composant se fait entre les broches Vdd (1) et Vss (14). Enfin, la broche MCLR (4) permet un reset manuel de ce composant.

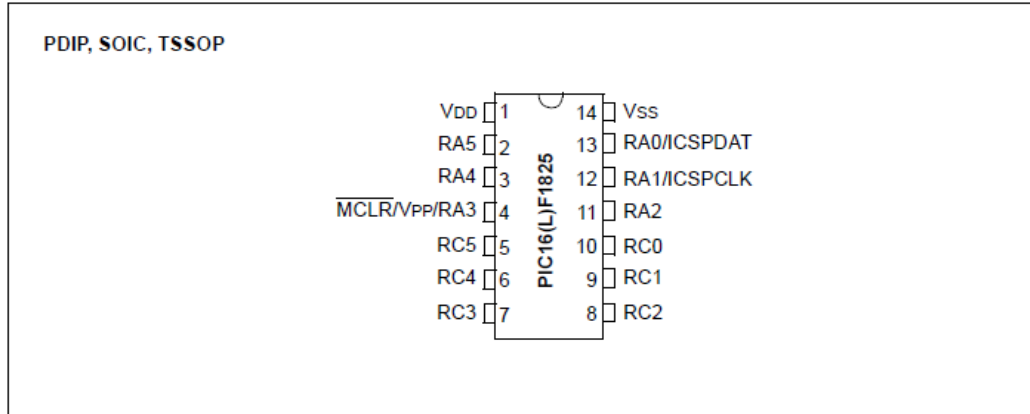


Figure III.7 : brochage du PIC16F1825.

Chaque broche des ports A et C peut débiter un courant de 20 mA (max.) ou absorber un courant de 25 mA (max.). Attention toutefois à retenir que la somme des intensités débitées par le port A ne doit pas dépasser 50 mA (ou 100 mA pour le port C), tandis que la somme des intensités absorbées par le port A ne doit pas dépasser 80 mA (ou 150 mA pour le port C).

- Trois types d'horloge peuvent être utilisés sur ce microcontrôleur :

(a)- un circuit à quartz.

(b)- un circuit RC.

(c)- horloge externe complète En mode RC, noté que la broche 3 délivre un signal de fréquence $F/4$.

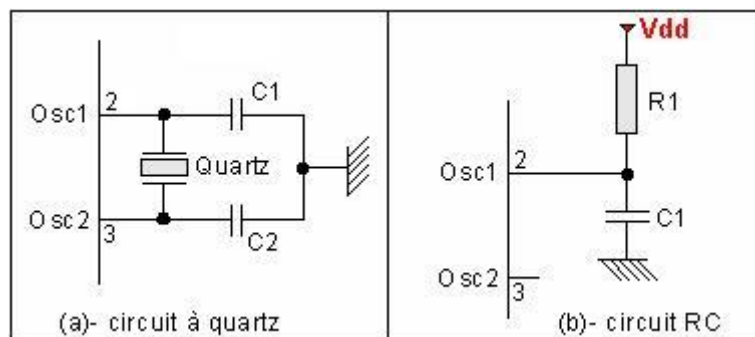


Figure III-8a : Circuits pour l'horloge interne du PIC16F1825.

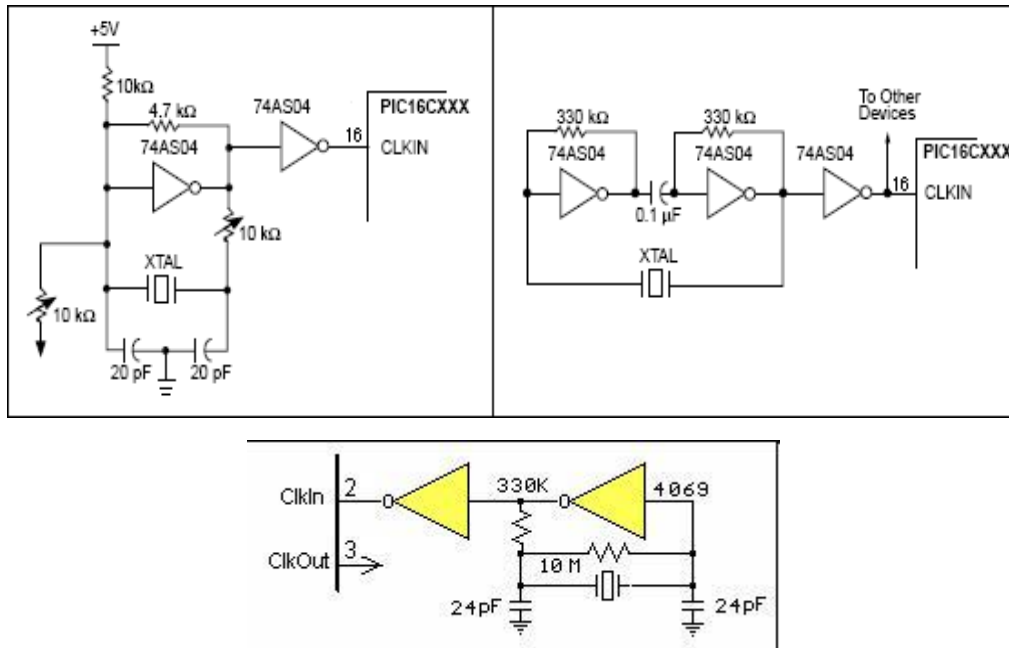


Figure III.8.b : Exemples d'horloges externes du PIC16F1825.

Le PIC16F1825 possède une fonction intéressante appelée "Power-on Reset". Son but est de provoquer un Reset du programme lors de la mise sous tension. Le microcontrôleur voit alors un front montant sur son alimentation Vdd. Sur d'autres microcontrôleurs, cette fonctionnalité n'existe pas. Microchip préconise d'ajouter le circuit suivant (figure III-9) au PIC16F1825 lorsque la mise sous tension est très lente. Ce circuit de Reset automatique est constitué, au minimum, de deux composants passifs : une résistance (à choisir entre 1k et 40k, le plus souvent on adopte 10k) et un condensateur (10n à 1000n, le plus souvent on adopte 10n) :

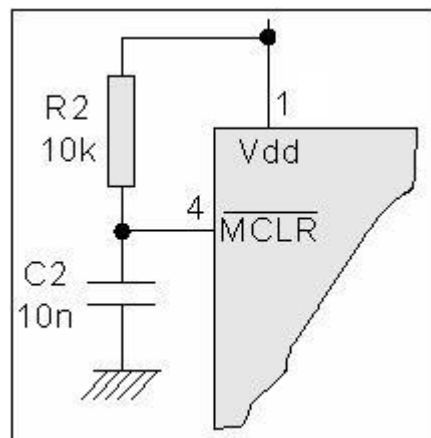


Figure III.9 : Reset automatique.

Le fonctionnement est simple : à la mise sous tension, le condensateur est déchargé et la broche MCLR est à zéro volt, ce qui est interprété comme un état logique 0, donc un reset pour la broche MCLR (4) ; le condensateur se charge progressivement à la constante de temps R_2C_2 , La broche MCLR (4) est une entrée dite ST (Schmitt Trigger), c'est-à-dire qu'une tension dépassant les $2/3$ de V_{dd} sera interprétée comme un état logique 1, donc fin de l'état du reset, le microcontrôleur entre dans un état de fonctionnement normal. Un reset manuel peut être ajouté si on met en parallèle au condensateur C_2 , un bouton poussoir. Enfin, Microchip recommande d'ajouter, en parallèle à la résistance R_2 , une diode, genre 1N4148, cathode reliée au V_{dd} , afin de décharger rapidement le condensateur C_2 , lorsque le montage est mis à l'arrêt.

Tous les microcontrôleurs PIC se distinguent des autres microcontrôleurs classiques (8051 ou 68HC11) par les deux aspects suivants :

-1- Ce sont des microcontrôleurs de structure Harvard :

C'est à dire que les commandes et les données sont stockées dans deux mémoires différentes, ce qui élimine radicalement le goulot d'étranglement classique dans les architectures CISC. De plus, le mode pipeline permet l'exécution d'une instruction pendant que la suivante est recherchée, tirant ainsi le maximum possible de chaque cycle d'horloge. Les commandes sont codées sur 12, 14 et 16 bits suivants les modèles (*baseline*, *mid-range*, *high-end*) et sont écrites dans une ROM interne non accessible de l'extérieur. Il en résulte que toutes les instructions peuvent être codées sur un seul mot d'où une exécution rapide, mais, en contrepartie, aucun fonctionnement avec une ROM extérieure n'est possible. L'utilisation d'un simulateur de ROM lors de la mise au point du programme n'est pas possible. Il n'existe pas de boîtiers ROMLESS (sans ROM interne) mais seulement des circuits avec PROM interne (dit OTP, *one time programmable*, ou programmables une seule fois par masque à la fabrication), UVPROM interne (effaçable par les UV, si une fenêtre est prévue pour l'irradiation de la puce) ou FEPROM (effaçable électriquement). Le PIC16F1825 est commercialisé avec une FEPROM et accepte un nombre de cycles d'effacement et de reprogrammation très élevé, tout en consommant un courant de fonctionnement très faible.

-2- Ce sont des microcontrôleurs RISC (*Reduced Instruction Set Computer*)

L'architecture RISC présente notamment les avantages suivants, par rapport à l'architecture CISC (8051, 6811, ...) :

- code machine plus compacte (d'un facteur de 2).
- rapidité d'exécution du code machine accrue (d'un facteur de 4).
- accélération du développement (de près de 30%).

Au lieu des 50 à 110 instructions à plusieurs octets et plusieurs cycles d'horloge des microcontrôleurs conventionnels (dits CISC), le langage des PIC se limite à seulement 33 instructions dans la gamme *baseline*, exécutables en un seul cycle d'horloge, et tenant sur un seul mot mémoire (de 12 bits dans la gamme *baseline*). Avec un jeu d'instructions réduit à l'essentiel, il devient paradoxalement plus facile et plus rapide d'écrire directement en assembleur des programmes très compacts et très efficaces.

Le PIC16F1825 possède 2 ports (A et C) ayant respectivement 6 lignes chacun, accessibles, nommées respectivement RA0 à RA5 (du Port A) et RC0 à RC5 (du Port C). Le sens de transfert de chaque ligne RAx ou RCx est déterminé par un bit situé dans le registre TRIS correspondant (TRISA ou TRISC) (bit = 0 pour configurer une ligne en sortie, ou bit = 1 pour configurer une ligne en entrée). La figure suivante indique la structure interne de la broche RA3 du port A (figure III-10) :

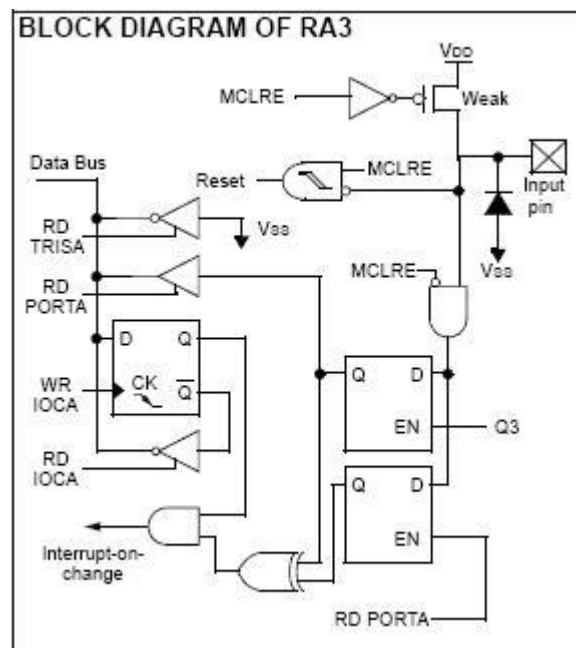


Figure III.10 : synoptique interne de la broche RA3.

Dans la structure des broches RA0 à RA3, les bascules B1 et B2 correspondent respectivement à l'un des bits des registres PORTA et TRISA. Lorsque la broche RAx est programmée en entrée, la sortie QT de B2 est à l'état logique 1, les deux MOS canal P et N voient leur grille portée respectivement à 1 et 0, ils sont bloqués et l'état de la borne lue par le buffer TTL est déterminée par le circuit extérieur relié à cette borne. En sortie, au contraire, QT=0 et la tension sur les grilles des MOS est entièrement déterminée par l'état de la bascule B1. Si, par exemple, QD=1, le MOS P est conducteur (0 sur sa grille) et le MOS N bloqué, la broche de sortie est portée au niveau logique 1.

Le port C a une structure différente. En plus des entrées analogiques du convertisseur ADC, il comporte un module EUSART pour permettre une liaison série synchrone ou asynchrone. La figure suivante indique la structure interne des broches RC0 et RC1 du port C (figure III-11) :

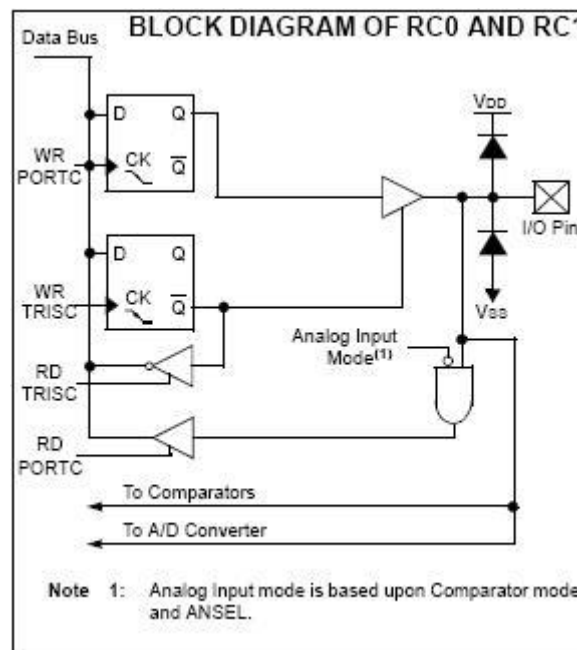


Figure III.11 : synoptique interne des broches RC0 et RC1.

Attention, les registres systèmes ANSEL (91h) et CMCON0 (19h) doivent être correctement initialisés pour configurer les broches comportant une entrée analogique, en broches digitales.

Le PIC16F1825 possède un compteur interne (ou timer, dit TMR0, figure III-11) dont le fonctionnement est déterminé par le contenu du registre OPTION_REG et qui active une interruption (bit N°2, dit TOIF, du registre INTCON, notation : INTCON<2>) à chaque dépassement (*overflow*). Les événements qui font avancer le compteur TMR0 sont soit :

-1- un signal synchrone du compteur interne et de fréquence $F_{osc}/4$, si le bit N°5 (dit T0CS) du registre OPTION_REG, est à 0. On dit dans ce cas qu'on est en mode « timer ».

-2- une transition sur la broche RA4/T0CKI. (3), si le bit N°5 (dit T0CS) du registre OPTION_REG, est à 1. On dit dans ce cas qu'on est en mode « compteur ». Dans ce cas, le bit N°4 (dit T0SE) du registre OPTION_REG permet de préciser lors de quelle transition (montante si T0SE=0, ou descendante si T0SE=1) le comptage est effectué.

Le bit N°3 (dit PSA) du registre OPTION_REG permet ce faire intervenir ou non un diviseur supplémentaire (*prescaler*) dont le taux de division est déterminé par les bits N°2, 1,0 (dits PS2, PS1, PS0). Ce prédiviseur est utilisé également par le chien de garde intégré.

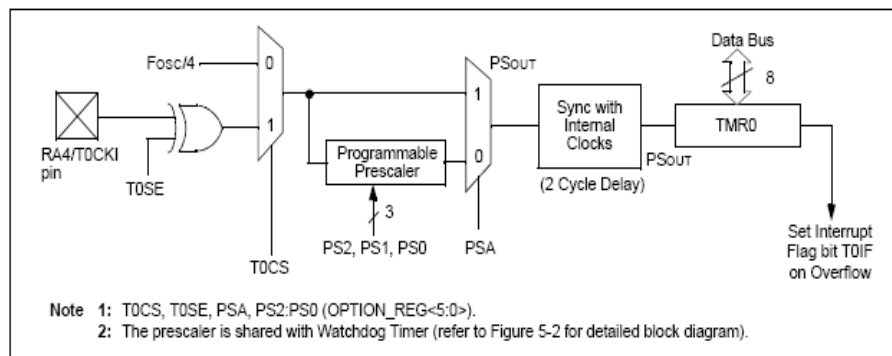


Figure III.12 : synoptique interne du compteur TMR0.

Ce compteur TMR0 est associé à un registre (noté aussi TMR0) qui contient la valeur codée 8 bits de ce compteur. Ce registre peut être lu ou écrit. Cependant, l'écriture dans ce registre remet à zéro les bits PS2, PS1, PS0 du prédiviseur, et de plus, le comptage ne redémarre que 2 cycles plus tard (2 μ s pour un quartz de 4 MHz). Le tableau III-1 indique les registres associés au compteur TMR0, leurs adresses, la signification de chaque bit et enfin leurs valeurs initiales, suite à un reset quelconque (de type POR, power on reset, à la mise en marche, ou autres ...).

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on POR, BOR	Value on all other RESETS
01h	TMR0	Timer0 Module Register								xxxx xxxx	uuuu uuuu
0Bh,8Bh	INTCON	GIE	EEIE	TOIE	INTE	RBIE	TOIF	INTF	RBIF	0000 000x	0000 000u
81h	OPTION_REG	RBPU	INTEDG	TOCS	TOSE	PSA	PS2	PS1	PS0	1111 1111	1111 1111
85h	TRISA	-	-	-	PORTA Data Direction Register				---1 1111	---1 1111	

Legend: x = unknown, u = unchanged, - = unimplemented locations read as '0'. Shaded cells are not used by Timer0.

Tableau III.1 : registres associés au compteur TMR0.

PSA	PS2	PS1	PS0	/tmr0	/WD	Temps tmr0	Temps typique Watchdog (minimal)
0	0	0	0	2	1	512 μ s	18 ms (7ms)
0	0	0	1	4	1	1024 μ s	18 ms (7ms)
0	0	1	0	8	1	2048 μ s	18 ms (7ms)
0	0	1	1	16	1	4096 μ s	18 ms (7ms)
0	1	0	0	32	1	8192 μ s	18 ms (7ms)
0	1	0	1	64	1	16384 μ s	18 ms (7ms)
0	1	1	0	128	1	32768 μ s	18 ms (7ms)
0	1	1	1	256	1	65536 μ s	18 ms (7ms)
1	0	0	0	1	1	256 μ s	18 ms (7ms)
1	0	0	1	1	2	256 μ s	36 ms (14 ms)
1	0	1	0	1	4	256 μ s	72 ms (28 ms)
1	0	1	1	1	8	256 μ s	144 ms (56 ms)
1	1	0	0	1	16	256 μ s	288 ms (112 ms)
1	1	0	1	1	32	256 μ s	576 ms (224 ms)
1	1	1	0	1	64	256 μ s	1,152 Sec (448 ms)
1	1	1	1	1	128	256 μ s	2,304 Sec (996 ms)

Tableau III.2 : paramétrage du bit PSA, et des 3 bits PS2, PS1, PS0.

- **PSA à PS0** sont les bits de configuration du prédiviseur.
- **/tmr0** indique la valeur du prédiviseur résultante sur le timer0.
- **/WD** indique la valeur du prédiviseur résultante sur le Watchdog.
- **Temps tmr0** indique le temps max entre 2 interruptions tmr0 avec quartz de 4MHz.
- **Temps watchdog** indique le temps typique disponible entre 2 reset watchdog (indépendant du quartz utilisé). La valeur entre parenthèses indique le temps minimal, qui est celui à utiliser pour faire face à toutes les circonstances.

Attention, choisir un prédiviseur=1 pour TMR0, revient en réalité à assigner le prédiviseur au Watchdog (PSA=1). Par ailleurs, la valeur contenue dans le prédiviseur n'est pas accessible en lecture.

III.4.4 - Le capteur de température TC1047A :

Le capteur de température TC1047A est un capteur de température linéaire ou la tension de sortie de ce capteur est proportionnelle à la température mesurée.

Le TC1047A possède une grande plage de mesure qui varie de -40°C jusqu'à $+125^{\circ}\text{C}$.

La tension d'alimentation de ce capteur peut varier entre 2.5V et 5.5V. Le TC1047A offre une sensibilité de $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$. La figure III.12 présente le schéma block de TC1047A.

La figure III.13 présente la variation de la tension de sortie V_{out} en fonction de la température.

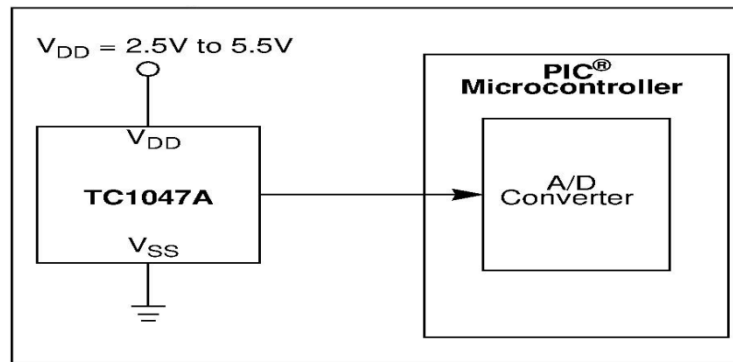


Figure III.13 : Schéma block de TC1047A[8].

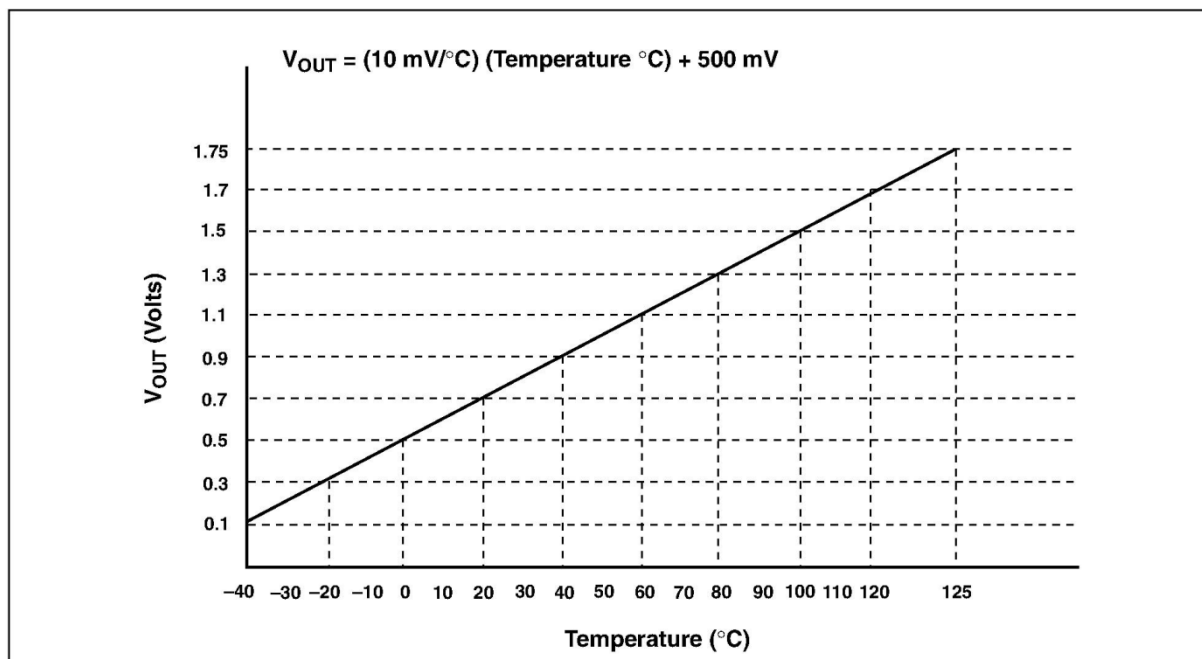


Figure III.14 : Courbe représentative $V_{\text{out}}=f(T \text{ } ^{\circ}\text{C})$ [8].

III.5 - Conclusion :

En conclusion, l'étude comparative des datalogger nous a permis de relever les meilleurs critères que doit notre datalogger les répons. Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter en détail une description complète de la conception et la réalisation de ce datalogger.

Chapitre IV : Réalisation pratique du datalogger

IV.1 – Introduction :

Les dataloggers sont des instruments largement utilisés dans différents domaines pour la surveillance et le contrôle.

Dans ce chapitre, nous allons décrire en détail la conception et la réalisation d'un dispositif expérimental dédié à l'enregistrement automatique d'un ensemble de mesures et de contrôles concernant plusieurs paramètres physiques important dans la gestion et le suivi du bon fonctionnement d'une mini centrale de production d'électricité à partir de panneaux photovoltaïques. Il est basé sur l'utilisation d'un microcontrôleur 8-bit chargé d'assurer toutes les fonctions prévues dans ce dispositif (mesures, contrôles et enregistrement), grâce à des modules intégrés spécialisés tels qu'un convertisseur analogique numérique 10-bit à quatre canaux de mesures, deux timers (8-bit et 16-bit) pour gérer une horloge-calendrier en temps réel RTCC, un module UART pour gérer automatiquement la liaison RS232 avec un PC, et enfin, un clavier minimaliste limité à seulement trois boutons poussoirs. La caractéristique la plus importante de ce dispositif est sa consommation propre qui est très infime (129 μ A), ce qui lui confère une autonomie fonctionnelle de plusieurs mois, à partir simplement de 2 piles LR6 (ou AA). La seconde caractéristique importante est la fonction enregistrement : elle est confiée à la mémoire flash interne du microcontrôleur lui-même, au lieu d'utiliser une mémoire EEPROM externe, ce qui nous a permis de réaliser un prototype très compacte, à très faible densité de composants, et donc de coût très réduit.

IV.2- Présentation :

Ce dispositif utilise 4 entrées analogiques du microcontrôleur pour la mesure automatique de (quatre + un) paramètres importants à surveiller dans une centrale solaire, à savoir : le courant de charge de l'accumulateur d'énergie (ensemble de batteries 12V), son courant de décharge, sa tension de charge, la température externe (celle des panneaux photovoltaïques 12V) et la température interne (celle des batteries). Ces mesures sont acquises périodiquement (une mesure par seconde) et immédiatement envoyées (en temps réel) vers un PC à travers la liaison RS232 pour être visualisées par l'application HyperTerminal de Windows, réglée à 115200 bauds, 8N1.

Chaque ligne affiche le format suivant :

Tpv Vbat Vpv Tbat HH :MM :SS JJ / MM / AA

où : Tpv : température au niveau des panneaux photovoltaïques.
Vbat : tension mesurée sur la batterie.
Vpv : tension mesurée sur les panneaux photovoltaïques.
Tbat: température au niveau des batteries.
HH :MM :SS horaire (heure, minute, seconde)
JJ / MM / AA date (jour, mois, année:00 à 99)

Au bout de 24h, les valeurs maximales et minimales des températures mesurées au niveau des panneaux photovoltaïques et des batteries sont mémorisées en RAM statique, ainsi que les quantités d'électricités accumulées et consommées. Le format de données suivant a été adopté :

TpvMAX : (7 bits) température MAXIMALE au niveau des panneaux photovoltaïques.
TpvMIN : (7 bits) température MINIMALE au niveau des panneaux photovoltaïques.
TbatMAX : (7 bits) température MAXIMALE au niveau des batteries.
TbatMIN : (7 bits) température MINIMALE au niveau des batteries.
Qcharge : (14 bits) quantité d'électricité accumulée en 24h.
Qcons : (14 bits) quantité d'électricité consommée en 24h.

Ainsi, 56 bits sont nécessaires pour l'enregistrement d'un paquet de données utiles par 24h. Ces 56 bits correspondent à la réservation de 4 mots mémoire (de 14 bits) dans la mémoire flash du PICmicro. Pour un relevé annuel (cas max. d'une année bissextile) on doit réserver un espace de $4 \times 366 = 1464$ mots dans la mémoire flash du PICmicro. Enfin, pour le réglage initial de l'horloge calendrier RTCC (Real Time Clock and Calendar) de ce dispositif, un petit clavier composé seulement de 3 boutons poussoirs est proposé. L'alimentation de l'ensemble est assurée simplement par 2 piles type LR6 (ou AA) mises en série pour disposer d'une tension continue de 3,0V. Ce dispositif restera fonctionnel jusqu'à 2,5V, cette tension étant la valeur minimale requise par les deux capteurs de températures (TC1047A, voir datasheet).

Un calcul estimatif de la durée fonctionnelle de ce montage consiste à connaître la capacité du bloc alimentation (2 piles AA de 1200 mAh) et la consommation du montage (129 μ A) : $1200 / 0,129 = 9302$ heures, soit 387 jours (donc plus d'une année !). L'application suivante (Microchip XLP Battery Life Estimator) nous indique une durée de 1 an et 210 jours pour 2 piles AA Alkaline Energizer de 2850 mAh.

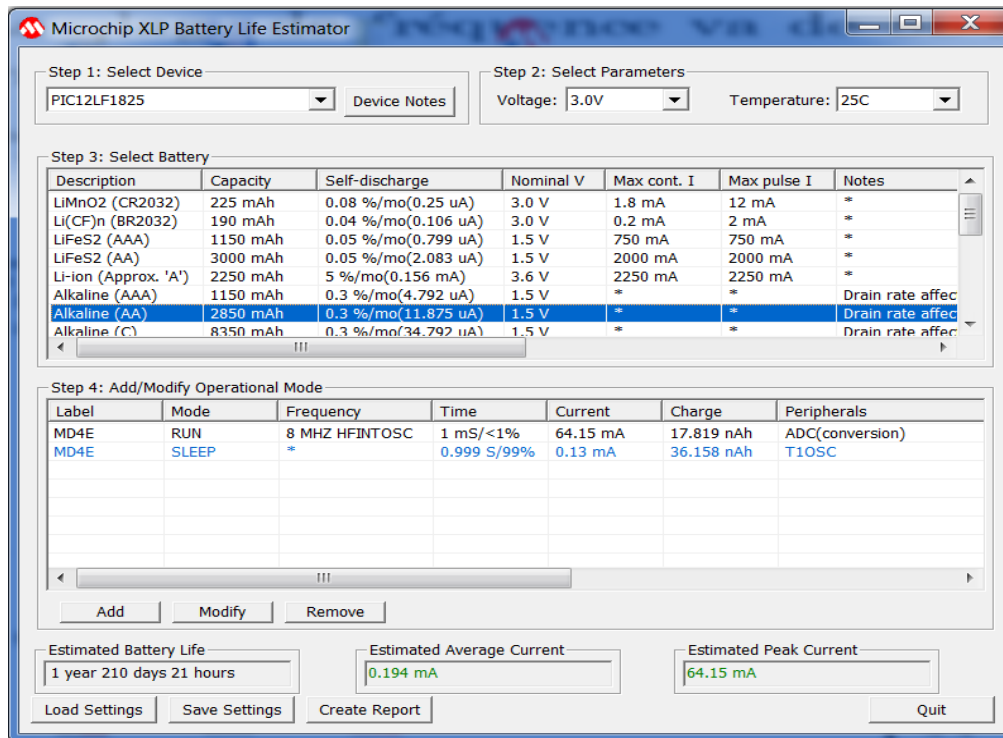


Figure IV.1 : Fenêtre de l'application Microchip XLP Battery Life Estimator.

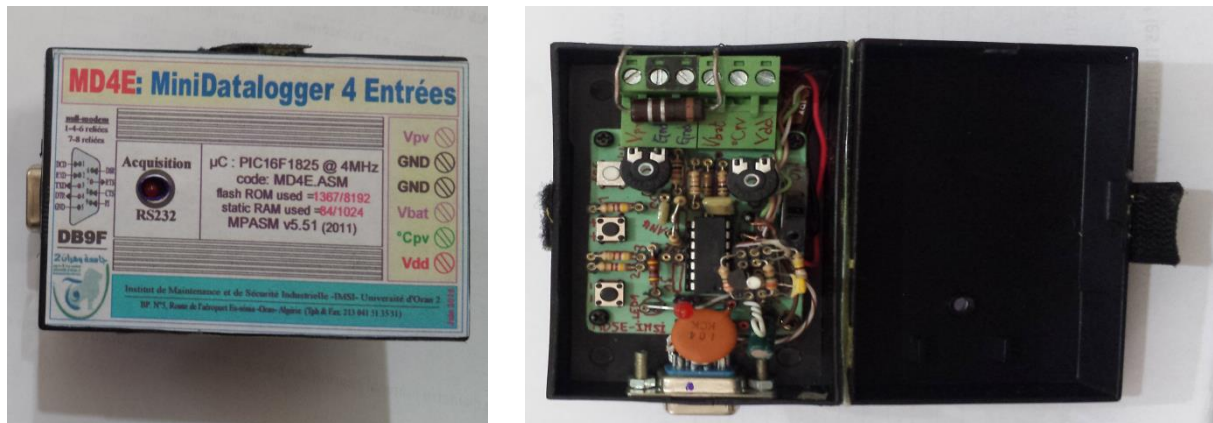


Figure IV.2 : Aperçu du dispositif réalisé.

IV.3 - Description Hardware :

Le synoptique suivant indique les principaux modules de ce montage : le microcontrôleur 8-bit (un PIC16F1825) [9], le module émission RS232, un clavier de 3 boutons poussoirs et enfin la circuiterie pour 4 voies de mesures (température PV, température batterie, tension PV, tension de batterie). Ce synoptique montre aussi l'usage partiel de la mémoire flash du PIC pour l'enregistrement quotidien de paramètres physiques importants, précédemment cités.

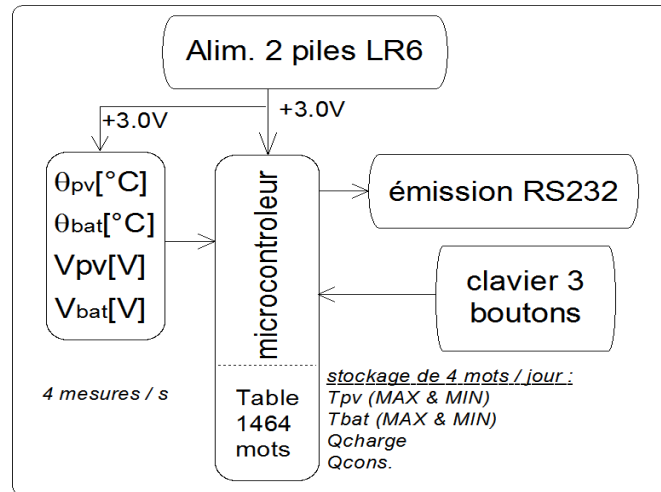


Figure IV.3 : Synoptique du dispositif réalisé.

IV.4 - Le microcontrôleur 8-bit (PIC16F1825) :

Le PIC16F1825 fait partie d'une nouvelle série de microcontrôleurs dite XLP (*Extreme Low Power*) figurant dans la gamme *mid-range* 8-bit de la société américaine Microchip, devenu leader mondial dans cette catégorie de composants numériques programmables. Il est doté d'une architecture RISC, 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 peut être alimenté par une tension continue stabilisée pouvant aller de 1.8V à 5.5V, tout en consommant un courant typique très faible : $165\mu\text{A}@4\text{MHz}$ (1.8V) ce qui le prédestine à l'usage de dataloggers et autres dispositifs portables. Il est doté d'un module interne de conversion analogique numérique ADC de résolution 10-bit ainsi que d'une tension de référence interne de précision (2.048V) qui nous a offert la possibilité d'effectuer des mesures analogiques avec une sensibilité de 2 mV seulement. En effet, avec une résolution de 10-bit, on dispose de 1024 pas de mesures, qui, étalés sur une marge de 2.048V, nous offre alors une sensibilité de $2048 / 1024 = 2\text{mV}$.

Enfin, ce PIC16F1825 est cadencé par deux horloges :

- Une horloge système interne de 4 MHz (donnant lieu à une durée d'une microseconde par instruction, sauf les instructions de sauts qui nécessitent 2 μs),
- et par une horloge secondaire externe, à quartz de 32768 Hz, nécessaire pour gérer en temps réel l'horloge calendrier RTCC avec une grande précision (grâce au module interne Timer1 de 16-bit). Attention, il faut choisir un transistor ayant un Béta élevé (un BC547A, ni un BC547B ne conviennent) sinon cet oscillateur ne démarre pas ! Par ailleurs, nous avons

aussi constaté un démarrage très lent (48 secondes !) en choisissant $C3=12\text{pF}$; en augmentant cette valeur à 33pF , le démarrage a lieu au bout de 2 secondes seulement !

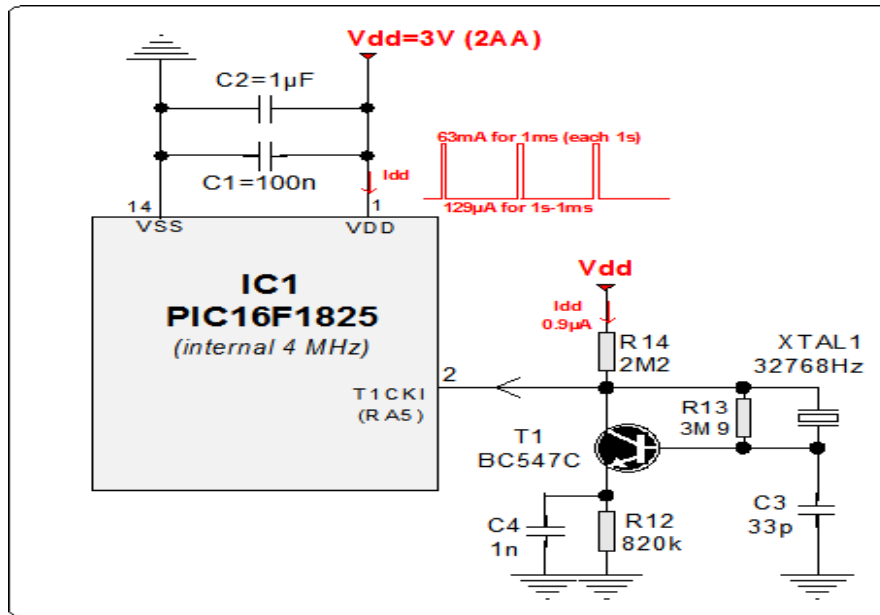


Figure IV.4 : Circuit du PIC16F1825, avec horloge interne de 4 MHz et horloge externe de 32768 Hz.

Les deux oscillogrammes suivants, relevé sur un oscilloscope numérique EM120, montre le signal fourni par cette horloge secondaire (à vide, c-à-d sans être reliée à l'entrée TICKI du PIC16F1825, et en charge) :

- La figure IV.5, relevé à vide, montre un signal carré déformé, ayant une fréquence de l'ordre de 32.89 kHz, un rapport cyclique de l'ordre de $\frac{1}{2}$, et une amplitude peak-to-peak de 792 mV, centré sur une tension moyenne de l'ordre de 1,1 mV,
- tandis que la figure IV.6, relevé en charge, montre un signal carré encore déformé, ayant une fréquence de l'ordre de 32.46 kHz, un rapport cyclique de l'ordre de $\frac{1}{2}$, et une amplitude peak-to-peak de 584 mV, centré sur une même tension moyenne de l'ordre de 1,1 mV.

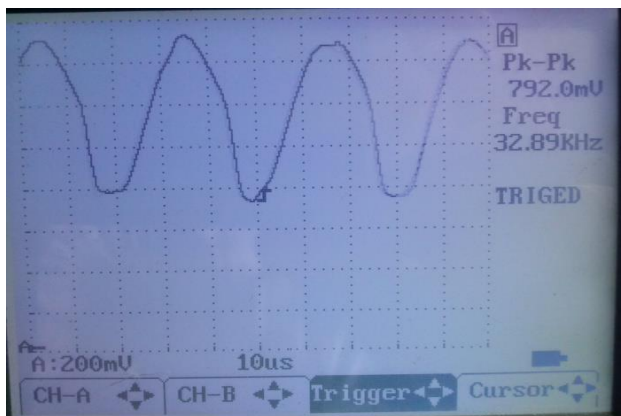


Figure IV.5 : Sortie de l'horloge secondaire 32768 Hz, à vide.

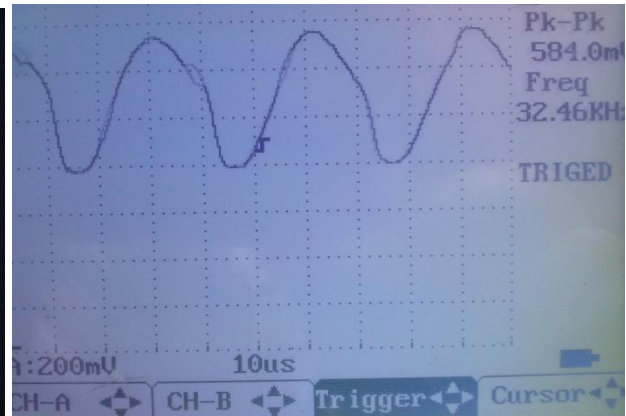


Figure IV.6 : Sortie de l'horloge secondaire 32768 Hz, en charge.

IV.5 - Le clavier de 3 boutons poussoirs :

Le clavier est composé seulement de trois mini boutons poussoirs: BP1 pour incrémenter, BP2 pour décrémenter, et BP3 pour passer à la fonction suivante, respectivement connectés aux broches RA1, RA0 et RC5 configurées en entrées digitales. Ce minimum indispensable est prévu essentiellement pour le réglage de l'horloge-calendrier RTCC (*Real Time Clock and Calendar*) ; ce programme supplémentaire a été rajouté pour le suivi en temps réel des tâches périodiques d'acquisition (à la seconde, pour mesurer T_{pv} , T_{bat} , V_{pv} et V_{bat} , et, au bout de 24h, pour stocker T_{pv} (MAX & MIN), T_{bat} (MAX & MIN), Q_{charge} et $Q_{consommée}$ quotidiennement.

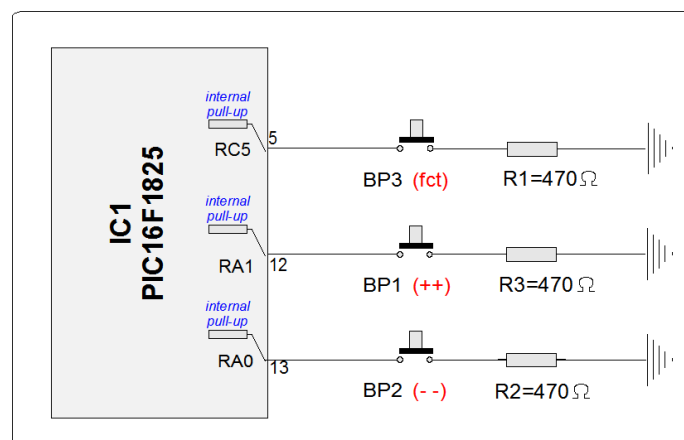


Figure IV.7 : Clavier 3 boutons poussoirs.

IV.6 - La circuiterie pour les 4 voies de mesures :

Quatre entrées analogiques du PIC16F1825 ont été consacrées à la mesure des paramètres physiques importants suivants: le courant de charge de l'accumulateur d'énergie (une batterie 12V), son courant de décharge, sa tension de charge, la température externe (celle des panneaux photovoltaïques 12V) et la température interne (celle des batteries). Le capteur de température utilisé est un TC1047A [8] dont la sensibilité est de 10 mV/°C avec une précision de +/- 0.5°C à 25°C. Sa gamme de température va de -40°C à +125°C. Enfin, ce capteur peut être alimenté par une tension continue allant de +2.5V à +5.5V, avec un courant propre infime de 35 μ A seulement ! Le courant de charge (et de décharge) de la batterie se fait par mesure d'une chute de tension à travers une très faible résistance (0.1 Ohm) mise en série sur le pôle positif de la batterie à recharger. Le calcul de la puissance maximale dissipée par cette résistance dépend du courant maximum pouvant être délivré par les panneaux solaires en service, et du courant maximum autorisé pour la consommation utilisateur. Enfin, la tension de charge à mesurer est prélevée à partir d'un diviseur de tension classique.

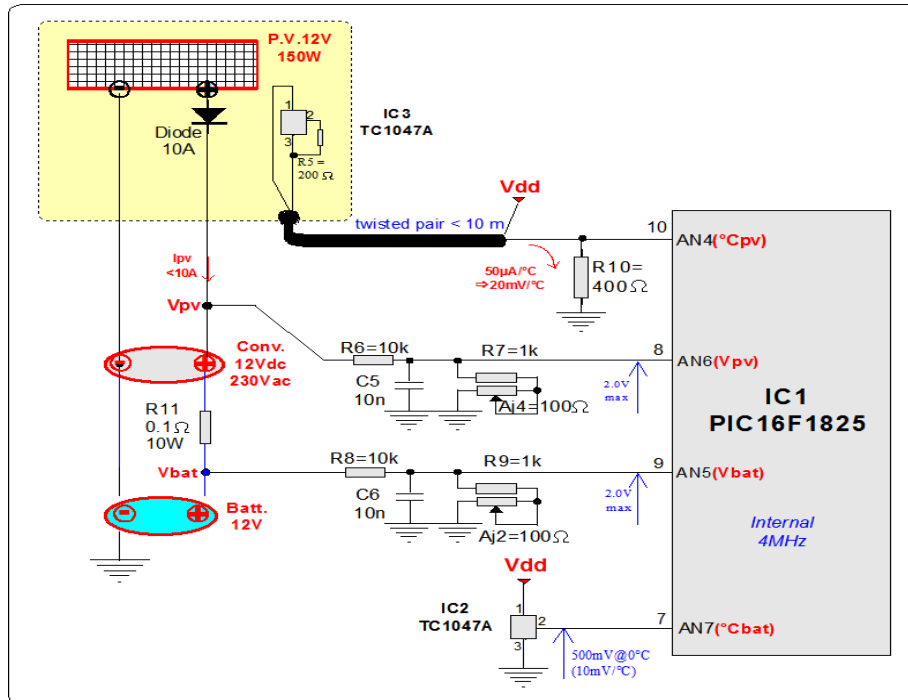


Figure IV.8 : Circuiterie pour les 4 voies de mesures analogiques.

IV.7 - Le connecteur I.C.S.P :

In-Circuit Serial Programming (ICSP) est une technique où un dispositif programmable est programmé après que le dispositif est placé dans une carte de circuit imprimé.

In-Circuit Serial Programming (ICSP) est un renforcement de technique ISP mis en œuvre dans PICmicro® de Microchip One-Time-Programmable (OTP) et les microcontrôleurs FLASH dotés de l'architecture RISC[10]. L'utilisation de deux broches E/S seulement, rend le ICSP facile à utiliser et moins intrusive sur le fonctionnement normal de notre PIC 16F1825. L'intérêt d'utiliser l'ICSP pour ce montage, est d'avoir la possibilité de reprogrammer le PIC en cas d'erreurs sans le démonter du circuit.

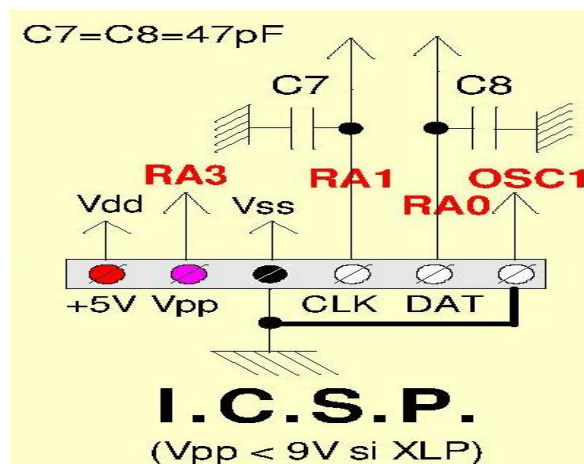


Figure IV.9 : Schéma de branchement du connecteur ICSP.

IV.8 - La section émission RS232 :

Ce dispositif peut être connecté à un PC à travers la liaison série [11] en utilisant le protocole RS232 à 115200 bauds, 8N1 et cela, sans circuit convertisseur classique type MAX232. En effet, les lignes d'entrées/sorties séries des PC modernes sont sensibles jusqu'à des niveaux de tensions légèrement inférieurs à 3V (en valeur absolue). Le connecteur femelle DB9F doit être câblé en null-modem. Du côté PC, il suffit d'utiliser l'application Hyper terminal de Windows pour visualiser l'acquisition des mesures en temps réel (chaque seconde) ainsi que de récupérer toute la table des données enregistrées au bout d'une année. Enfin, la LED1 sert un double usage : c'est une LED témoin du fonctionnement du montage, et c'est aussi une LED témoin d'activité de transfert de l'acquisition périodique des données vers la sortie RS232, en offrant de brèves impulsions lumineuses, à chaque seconde.

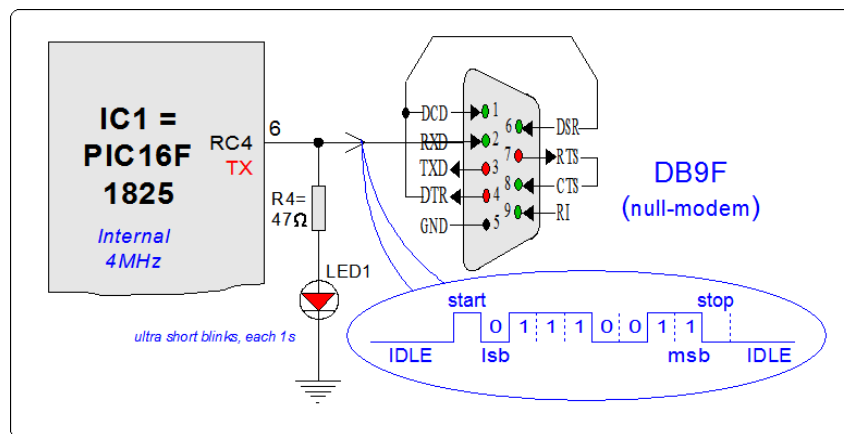


Figure IV.10 : Section émission RS232.

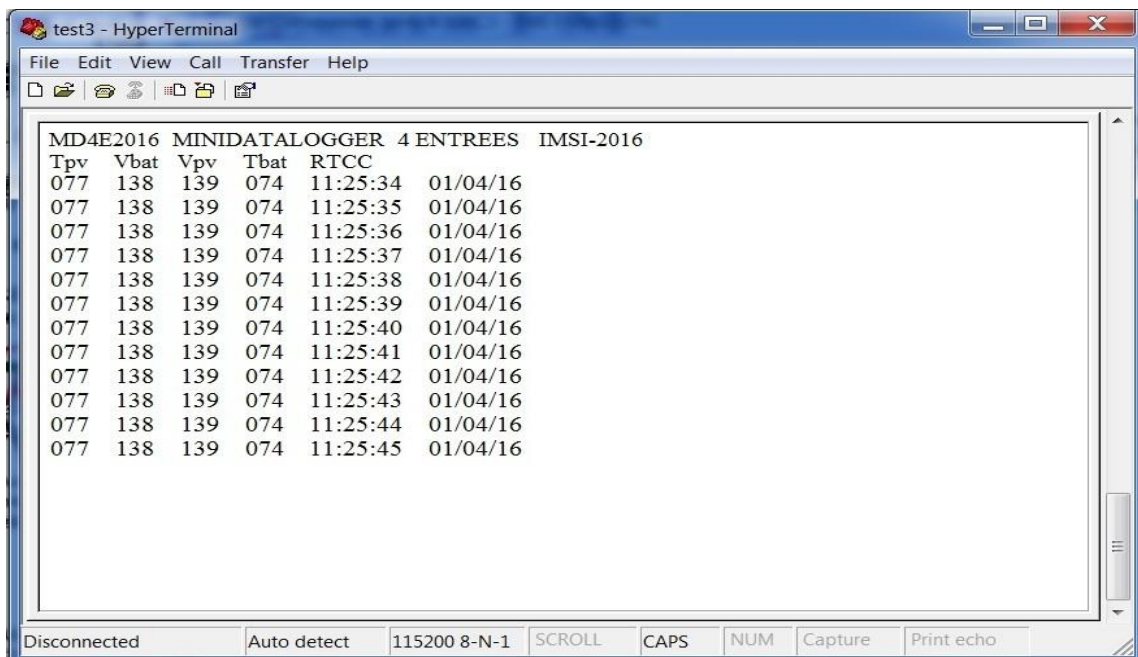


Figure IV.11 : Interface Hyper terminal pour la visualisation des mesures en temps réel.

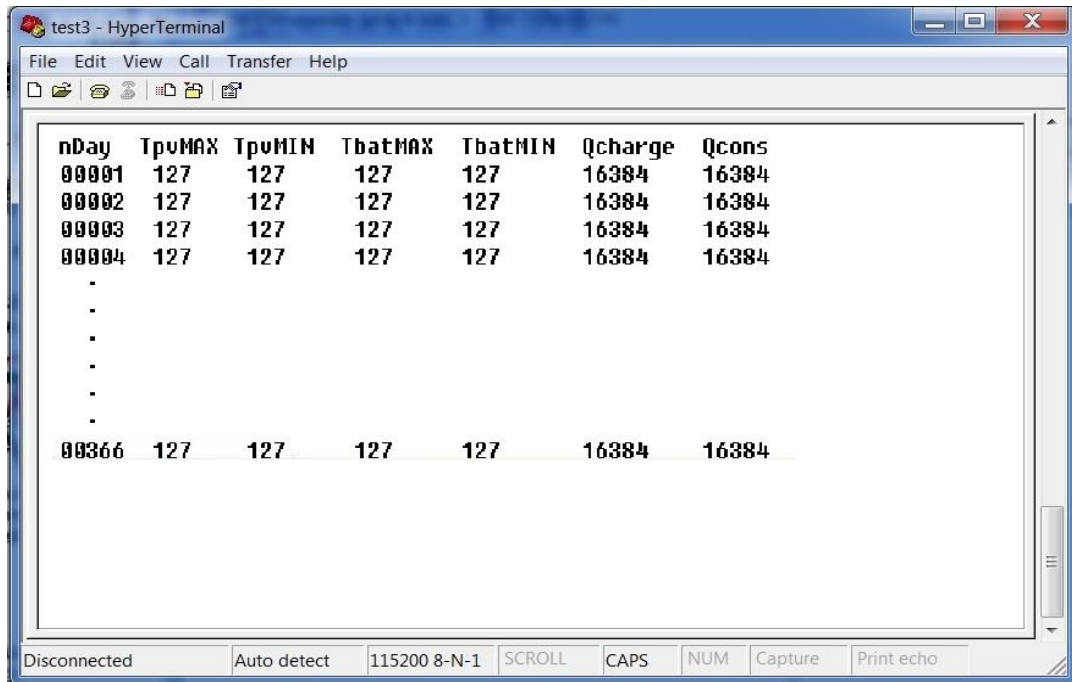


Figure IV.12 : Visualisation des données stockées sur 1 année.

IV.9 - Organisation de la mémoire flash du PIC16F1825 :

Le PIC16F1825 dispose d'une mémoire flash de 8192 mots (de 14-bit) réinscriptible. Cette mémoire est prévue pour le programme de fonctionnement du microcontrôleur, mais peut aussi contenir des données si nécessaires, ce qui a été intéressant pour stocker les données quotidiennes, étalées sur une année complète. Le format suivant a été adopté:

Nbr bits	Variable	Signification
7	TpvMAX	Température maximale des panneaux photovoltaïques
7	TpvMIN	Température minimale des panneaux photovoltaïques
7	TbatMAX	Température maximale des batteries
7	TbatMIN	Température minimale des batteries
14	Qcharge	Quantité d'électricité accumulée pour 1 jour
14	Qcons	Quantité d'électricité consommée pour 1 jour

Tableau IV.1 : Format d'enregistrement d'un paquet de mesures par jour

Un paquet de mesures nécessite donc 56 bits, soit 4 mots, par jour, ou $4 * 366 = 1464$ mots sur une année (bissextile). L'enregistrement dans cette mémoire flash se fait par bloc de 8 mots, après avoir dégagé un espace de 32 mots. Cette contrainte, imposée par le PIC, nous a conduit à la procédure suivante :

- 1- Chaque jour, mémoriser 4 mots en RAM statique, qui occupera donc 8 octets dans la table **space64B**, de 64 octets au total.

- 2- Au bout de 8 jours, la table **space64B** est saturée ; elle est donc transférée dans la mémoire flash du PIC, occupant ainsi un bloc de 32 mots à partir de l'adresse 0X0800. (cette écriture se fera après avoir effacé un espace de 32 mots)
- 3- Au bout de 366 jours (année bissextile), la mémoire flash contiendra 1464 mots de données utiles.

-Voici enfin le schéma détaillé et complet du dispositif réalisé :

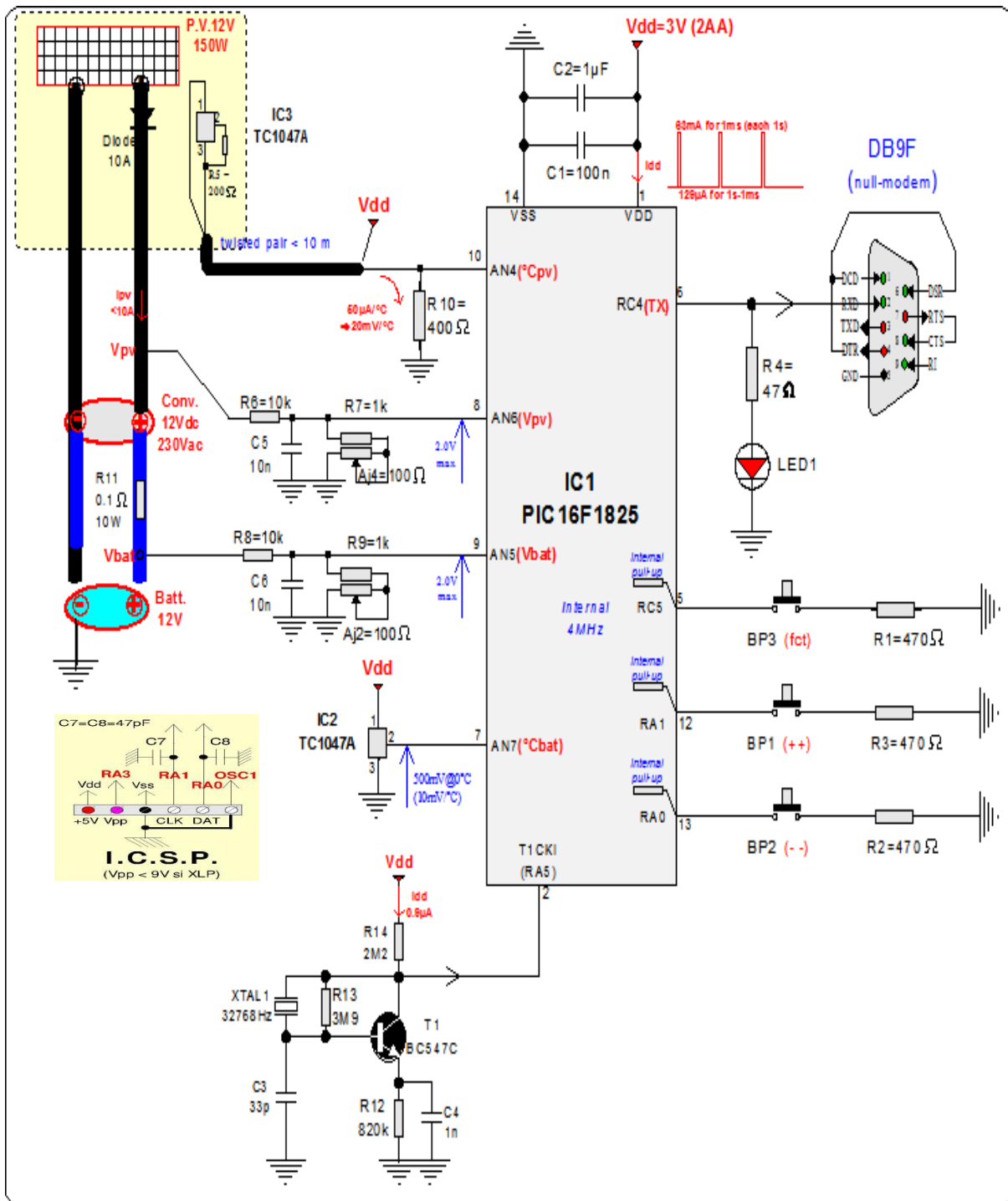


Figure VI.13 : Schéma détaillé et complet du dispositif réalisé.

IV.10 - Description Firmware :

Le microcontrôleur PIC16F1825 a été programmé en assembleur, en utilisant l'environnement intégré MPLAB v8.92 (année 2013) [12] disponible gratuitement sur le site de Microchip. Ensuite, la gravure dans la puce a été assurée par le logiciel PicPgm version 1.7.8.0 (année 2012) de l'auteur Christian Stadler [13], également gratuit, à travers le port série d'une plateforme PC/Windows. Enfin, le programmeur utilisé est un circuit relativement simple, dit programmeur JDM2 pour microcontrôleurs PIC [14].

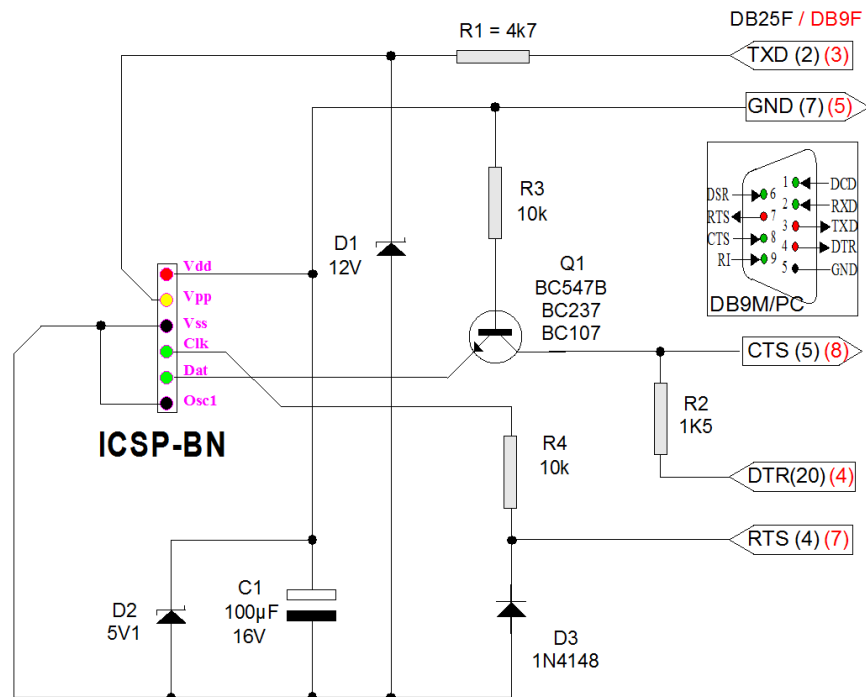


Figure IV.14 : Programmeur JDM2 pour PIC sur port série d'un PC

Paramétrage du logiciel pour programmeur de PIC sur port série :

- Programmeur = JDM2 Programmer.
- Port = COM1 (ou COM2)
- Interface = Direct I/O



Figure IV.15 : Aperçu du programmeur utilisé.

Le code source en assembleur respecte une logique de programmation modulaire : un fichier principal (**MD4E.ASM**) suivi de 15 fichiers secondaires associés :

- **txRS232c.INC**: pour la liaison RS232 à 115200 bauds, 8N1.
- **UTIL1825.INC**: macros et routines d'utilités générales.
- **IF8B16B3.INC**: macros de tests divers (équivalent de l'instruction IF du langage C).
- **FLASH1825.INC**: gestion de la mémoire flash (lecture / écriture / effacement).
- **int_TMR1.INC**: routine d'interruption (réglée à 1 seconde).
- **buttons.INC**: gestion du clavier 3 boutons poussoirs.
- **rtcc1825.INC**: gestion de l'horloge calendrier RTCC.
- **F1825ADC.INC**: acquisition des mesures 10-bit.
- **ADDSUB16.INC**: addition / soustraction 16-bit.
- **DIV16BY8.INC**: division 16-bit par 8-bit.
- **MUL16x8.INC**: multiplication 16-bit par 8-bit.
- **CALCULUS.INC**: calcul de conversion des comptes 10-bit en paramètre physiques.
- **BIN8DGT3.INC**: conversion binaire 8-bit en valeur décimale 3 digits.
- **BIN16DGT5.INC**: conversion binaire 16-bit en valeur décimale 5 digits.
- **TABLE.INC** : table réservée au stockage des mesures quotidiennes.

IV.10 -1 - Le fichier principal MD4E.ASM :

Le programme principal (**MD4E.ASM**) a plusieurs tâches, dont la principale est de configurer les registres systèmes des modules internes qui seront sollicités par la suite :

- Configuration de chaque broche des PORTA et PORTC en entrée ou sortie.
- Réglage de la fréquence de l'horloge système interne à 4 MHz +/- 1%
- Configuration du registre system OPTION_REG.
- Activation des résistances de rappel internes (pullup) pour les boutons poussoirs.
- Configuration des entrées analogiques (4 entrées seulement : AN4, AN5, AN6 & AN7).
- Désactiver les 2 comparateurs internes (pour économiser la consommation en courant).
- Configuration de l'interruption du timer1 pour un débordement d'une seconde précise.
- Initialiser à zéro toute la zone mémoire consacrée aux variables.
- Initialiser les variables réservées à l'horloge calendrier RTCC.

Après cette phase d'initialisation, le programme principal entre en mode veilleuse, pour minimiser la consommation du dispositif (courant consommé réduit à 129 μ A). A chaque seconde, le microcontrôleur est réactivé pour une durée très brève (1ms) afin de scruter le clavier des 3 boutons poussoirs, ainsi que d'effectuer successivement les mesures des tensions Vpv (des panneaux photovoltaïques) et Vbat (des batteries) ainsi que des températures Tpv et Tbat. Cette phase active est visualisée par la LED1.

L'organigramme de la figure IV.16 montre plus de détails concernant le programme principal. La figure IV.17 concerne le fichier **int_TMR1.INC** qui comporte la routine d'interruption du Timer1 (appelée chaque seconde) et qui est chargée de mettre à jour l'horloge calendrier RTCC ainsi que de procéder aux mesures périodiques de Tpv, Vbat, Vpv et Tbat.

Ces mesures sont envoyées en temps réel vers un PC à travers la liaison série RS232 à 115200 bauds, 8N1, pouvant être visualisées par l'application hyperterminal de Windows.

Enfin, la figure IV.18 concerne le fichier **buttons.INC** qui permet la gestion du clavier 3 boutons poussoirs.

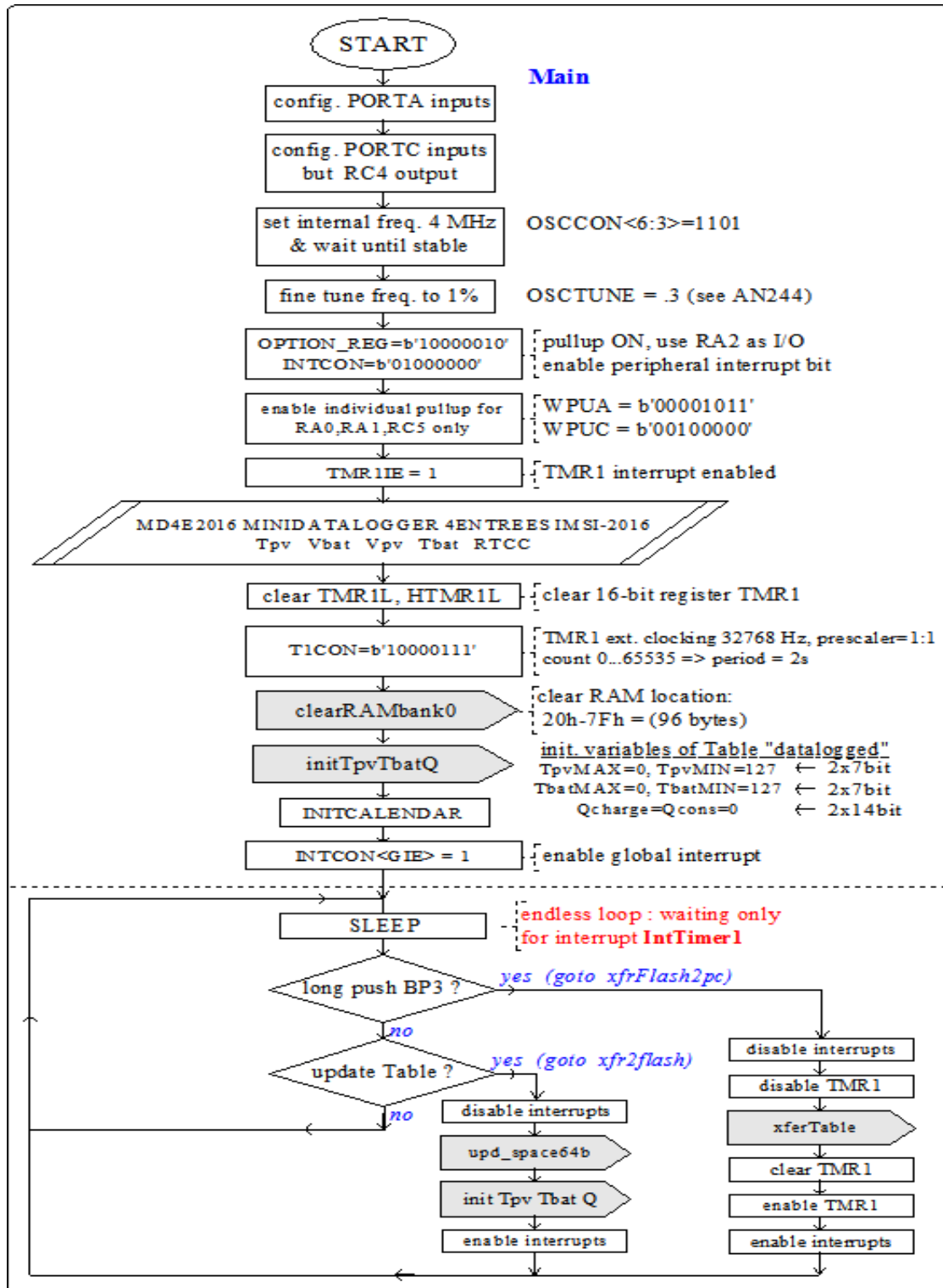


Figure IV.16 : Organigramme du programme principal.

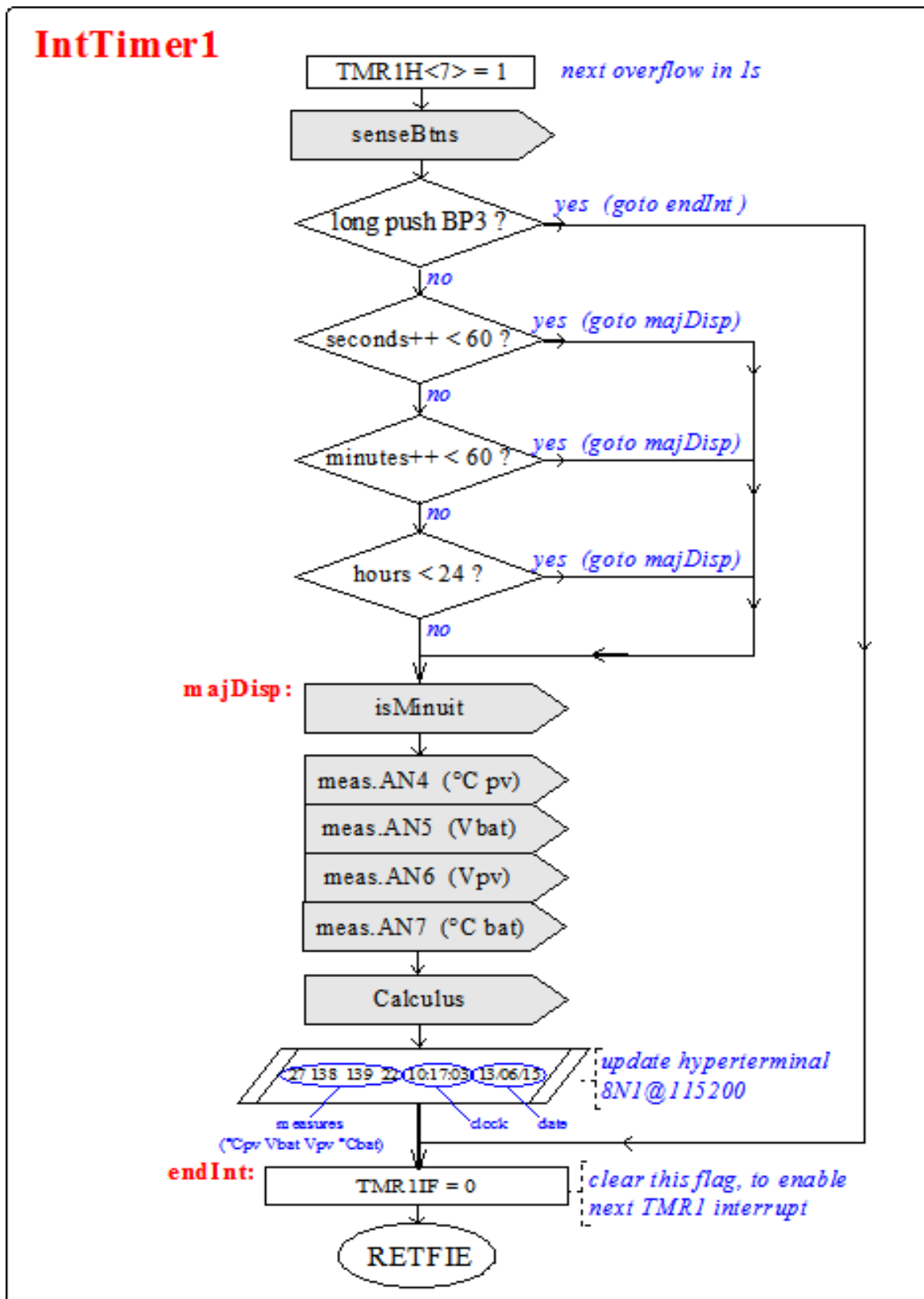


Figure IV.17: Organigramme de l'interruption du Timer1.

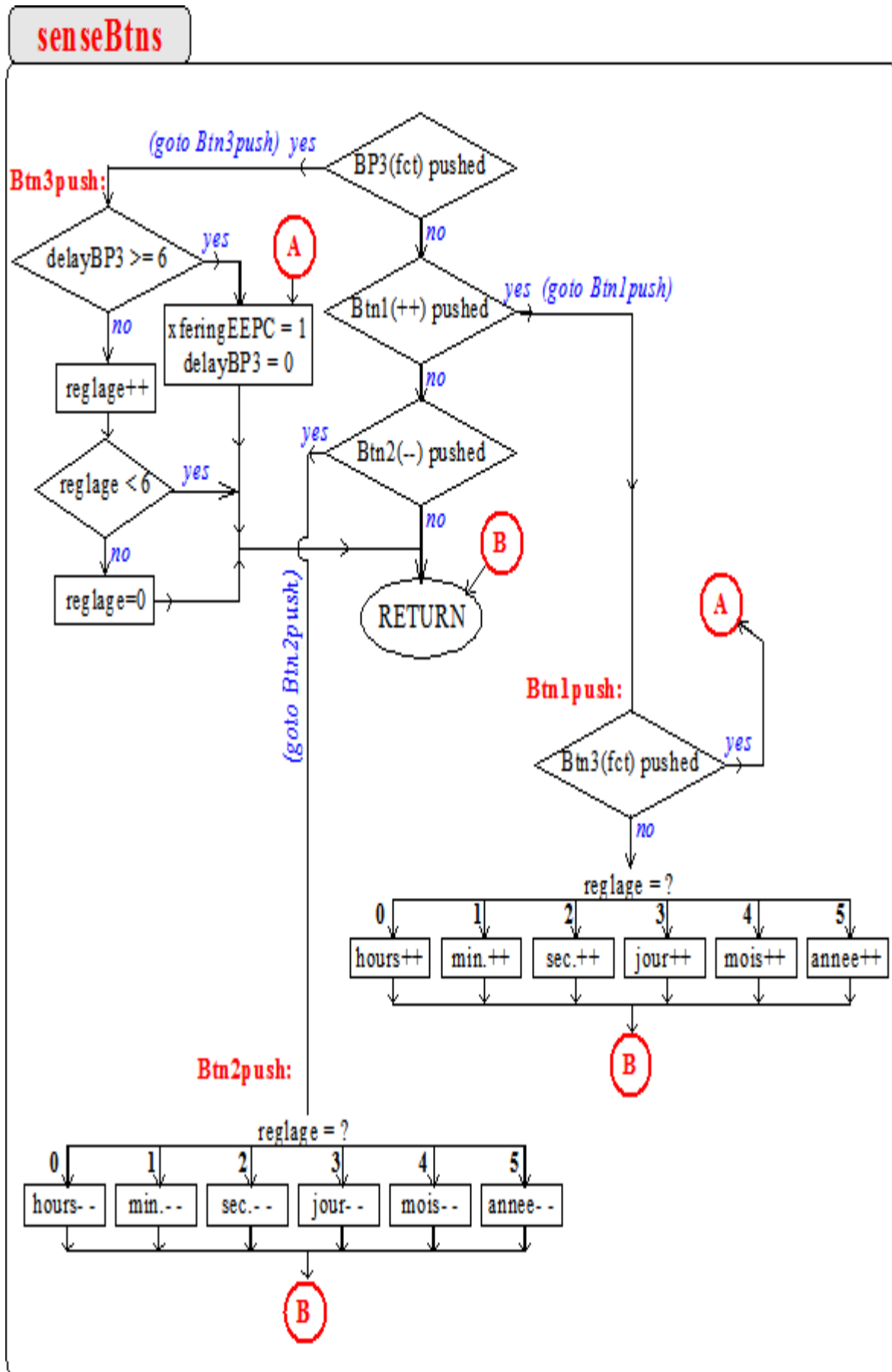


Figure IV.18 : Organigramme de gestion des 3 boutons poussoirs.

IV.11 - Conclusion :

La réalisation pratique de ce mini-datalogger m'a enrichie beaucoup mes connaissances dans le domaine d'électronique, surtout ce qui concerne la programmation des microcontrôleurs d'une part, et la manipulation des différents composants électroniques d'autre part.

Conclusion générale

Conclusion générale et perspectives :

Ce projet de fin d'étude a été très bénéfique et il m'a énormément appris. En premier lieu, j'ai appris des nouvelles connaissances sur l'énergie solaire photovoltaïque et l'importance de cette source d'énergie renouvelable qui a connu un développement remarquable pendant ces dernières années. Ainsi, j'ai enrichi mes connaissances sur les différents types d'installations photovoltaïques et notamment sur les dispositifs utilisés pour la surveillance, le contrôle et la gestion de bon fonctionnement de ces dernières qui sont les enregistreurs automatique des données (dataloggers). Ensuite, la comparaison entre les différents dataloggers m'a permis de relever les meilleurs critères et les employés dans la conception du mini datalogger. Enfin, cette réalisation m'a beaucoup développé l'esprit de la recherche d'une part, et mes capacités dans la pratique d'autre part.

Ce travail reste, comme toute œuvre humaine, incomplet et perfectible, je recommande d'en améliorer la conception et pour cela je propose ci-dessous des améliorations pour les futurs développements :

- ✓ Ajouter des capteurs (par exemple un capteur de rayonnement) pour mieux surveiller le système, puisque il reste trois entrés libres.
- ✓ Garder les mêmes paramètres à mesurés et changer le PIC16F1825 par un PIC12Fxx afin de réduire l'encombrement et la consommation propre du circuit.

Bibliographie

[1] Solar Power Europe, GLOBALE MARKET OUTLOOK FOR PHOTOVOLTAICS until 2019, Edition **2015**.

[2] **Louis-Paul Hayoun & Aurian Arrigoni**, « Les installation photovoltaïques Conception et dimensionnement des installations raccordées au réseau », Edition **2011**.

[3] Document, « L'Electricité Photovoltaïque : Principes et Applications », Rapport Technique, Total Société, Edition Juin **2006**.

[4] **A. Mefti; M.Y Bouroubi; H. Mimouni**, « Evaluation du potentiel énergétique solaire », Bulletin des Energies Renouvelables, N° 2, P12, décembre **2002**.

[5] **B. CHAOUKI** ; « Mémoire de fin d'étude Production et performance des capteurs hybrides (PV/T) à eau intégrés dans le bâtiment 'cas de l'Algérie' », Juin **2014**

[6] **L. Chang**, « Systèmes de Conversion de l'Energie Eolienne », IEEE Canadian Review, pp. 1 – 5, **2002**.

[7] **Anne Labouret, Michel Viloz**, « Energie solaire photovoltaïque ». Le manuel du professionnel. Dunod 3^{ème} édition **2003**.

[8] TC1047A datasheet, DS21498C: Precision temperature to voltage converter, Microchip Technology Inc., **2005**

[9] PIC16F1825/1029 datasheet, DS40001440D: 14/20-pin flash microcontrollers with nanoWatt XLP technology, Microchip Technology Inc., **2014**.

[10] In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) Guide, DS 30277D, Microchip Technology Inc, **2003**.

[11] **Philippe André**, La liaison RS232, Edition ETSF, Paris, **1998**

[12] MPLAB v8.92, integrated development environment assembler software, Microchip Technology Inc., **2013**

[13] PicPgm : a free and simple PIC development programmer software for Windows, Linux & MacOS X, version 1.7.8.0, année **2012**, <http://picpgm.picprojects.net/>

[14] Programmeur JDM2 pour microcontrôleurs PIC :
<http://www.jdm.homepage.dk/newpics.htm>.

Webographie :

Christophe Magdelaine, « La plus grande centrale solaire du monde vient d'être mise en service en Californie », notre-planete.info, consulté le 15/04/2016.

<http://www.notre-planete.info/actualites/4176-plus-grande-centrale-solaire-Californie>.

L'équipe d'énergie facteur 4, « Cellules photovoltaïques », énergie facteur 4, consulté le 10/02/2016.

<http://www.ef4.be/fr/photovoltaique/aspects-techniques/cellules-photovoltaiques.html>.

Sonia Laurent, « Solaire hybride : le « deux-en-un » du futur ? », consulté le 25/03/2016.

<http://www.quelleenergie.fr/magazine/energie-solaire/solaire-hybride-deux-en-un-du-futur/>.

« Schéma d'une installation photovoltaïque résidentielle raccordée au réseau », Tunisie système solaire, consulté le 04/04/2016.

<http://tunisie-systeme-solaire.com/features/residentiel/>.

« Les onduleurs photovoltaïques », consulté le 06/03/2016.

<http://www.solaire-guide.fr/onduleurs-photovoltaiques/>

« Qu'est-ce que sait l'effet photovoltaïque », consulter le 13/01/2016.

<http://www.photovoltaique-energie.fr/l-effet-photovoltaique.html>.

« L'énergie solaire », Septembre 2011, consulté le 27/02/2016

<http://www.photovoltaique.info/-De-la-lumiere-a-l-electricite-.html>.

« Enregistreur de données », consulté le 02/01/2016

https://fr.wikipedia.org/wiki/Enregistreur_de_données.

Annexe I



PIC16F/LF1825/1829

14/20-Pin Flash Microcontrollers with nanoWatt Technology

High-Performance RISC CPU:

- Only 49 Instructions to Learn:
 - All single-cycle instructions except branches
- Operating Speed:
 - DC – 32 MHz oscillator/clock input
 - DC – 125 ns instruction cycle
- Up to 8 Kbytes Linear Program Memory Addressing
- Up to 1024 bytes Linear Data Memory Addressing
- Interrupt Capability with automatic context saving
- 16-Level Deep Hardware Stack with Optional Overflow/Underflow Reset
- Direct, Indirect and Relative Addressing modes:
 - Two full 16-bit File Select Registers (FSRs)
 - FSRs can read program and data memory

Flexible Oscillator Structure:

- Precision 32 MHz Internal Oscillator Block:
 - Factory calibrated to $\pm 1\%$, typical
 - Software selectable frequencies range of 31 kHz to 32 MHz
- 31 kHz Low-Power Internal Oscillator
- Four Crystal modes up to 32 MHz
- Three External Clock modes up to 32 MHz
- 4X Phase Lock Loop (PLL)
- Fail-Safe Clock Monitor:
 - Allows for safe shutdown if peripheral clock stops
- Two-Speed Oscillator Start-up
- Reference Clock Module:
 - Programmable clock output frequency and duty-cycle

Special Microcontroller Features:

- 1.8V-5.5V Operation – PIC16F1825/1829
- 1.8V-3.6V Operation – PIC16LF1825/1829
- Self-Programmable under Software Control
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Programmable Brown-out Reset (BOR)
- Extended Watchdog Timer (WDT)
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) via two pins
- In-Circuit Debug (ICD) via Two Pins
- Enhanced Low-Voltage Programming (LVP)
- Operating Voltage Range:
 - 1.8V-5.5V (PIC16F1825/1829)
 - 1.8V-3.6V (PIC16LF1825/1829)
- Programmable Code Protection
- Power-Saving Sleep mode

Extreme Low-Power Management PIC16LF1825/1829 with nanoWatt XLP:

- Sleep mode: 20 nA
- Watchdog Timer: 500 nA
- Timer1 Oscillator: 600 nA @ 32 kHz

Analog Features:

- Analog-to-Digital Converter (ADC) Module:
 - 10-bit resolution, up to 12 channels
 - Auto acquisition capability
 - Conversion available during Sleep
- Analog Comparator Module:
 - Two rail-to-rail analog comparators
 - Power mode control
 - Software controllable hysteresis
- Voltage Reference Module:
 - Fixed Voltage Reference (FVR) with 1.024V, 2.048V and 4.096V output levels
 - 5-bit rail-to-rail resistive DAC with positive and negative reference selection

Peripheral Highlights:

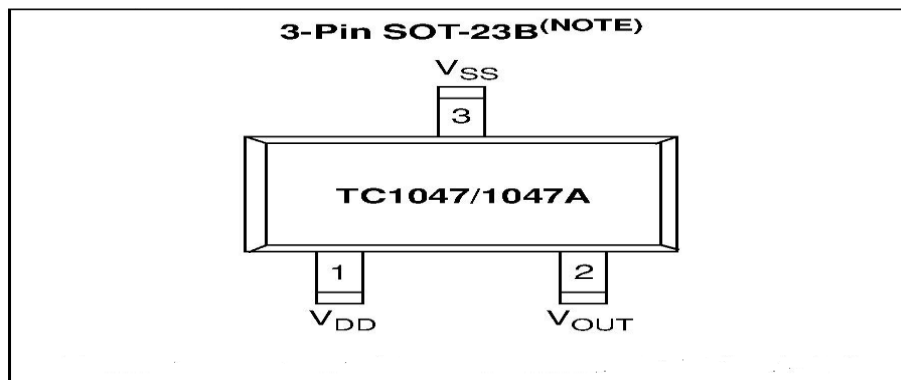
- Up to 17 I/O Pins and 1 Input Only Pin:
 - High current sink/source 25 mA/25 mA
 - Programmable weak pull-ups
 - Programmable interrupt-on-change pins
- Timer0: 8-Bit Timer/Counter with 8-Bit Prescaler
- Enhanced Timer1:
 - 16-bit timer/counter with prescaler
 - External Gate Input mode
 - Dedicated, low-power 32 kHz oscillator driver
- Three Timer2-types: 8-Bit Timer/Counter with 8-Bit Period Register, Prescaler and Postscaler
- Two Capture, Compare, PWM (CCP) Modules
- Two Enhanced CCP (ECCP) Modules:
 - Software selectable time bases
 - Auto-shutdown and auto-restart
 - PWM steering
- Up to two Master Synchronous Serial Port (MSSP) with SPI and I²C™ with:
 - 7-bit address masking
 - SMBus/PMBus™ compatibility
- Enhanced Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter (EUSART) Module
- mTouch™ Sensing Oscillator Module:
 - Up to 12 input channels
- Data Signal Modulator Module:
 - Selectable modulator and carrier sources
- SR Latch:
 - Multiple Set/Reset input options
 - Emulates 555 Timer applications

Annexe II

Fonction des pins du capteur TC1047A :

Pin No.	Symbol	Description
1	V_{DD}	Input Supply Voltage
2	V_{OUT}	Temperature Sensor Output Terminal
3	V_{SS}	Ground Terminal

Description des pins du capteur TC1047A :



Caractéristiques électriques du capteur TC1047A :

Electrical Specifications: Unless otherwise indicated, these specifications apply for the entire supply voltage range and for $T_A = -40^\circ\text{C}$ to $+125^\circ\text{C}$.						
Parameters	Sym	Min	Typ	Max	Units	Conditions
Supply Voltage	V_{DD}	2.7	—	4.4	V	TC1047
		2.5	—	5.5	V	TC1047A
Supply Current, Operating	I_Q	—	35	60	μA	
Average Slope of Output Voltage	A_V	—	10	—	$\text{mV}/^\circ\text{C}$	
Temperature Accuracy	TMP_{ACy}	-2	± 0.5	+2	$^\circ\text{C}$	$T_A = 25^\circ\text{C}$
		-3	± 0.5	+3	$^\circ\text{C}$	$T_A = +125^\circ\text{C}$
		—	1.0	—	$^\circ\text{C}$	$T_A = -40^\circ\text{C}$
Output Voltage	V_{OUT}	—	100	—	mV	$T_A = -40^\circ\text{C}$
		730	750	770	mV	$T_A = 25^\circ\text{C}$
		1720	1750	1780	mV	$T_A = +125^\circ\text{C}$
Output Source and Sink Current	I_{OUT}	100	—	—	μA	

