


	UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA - BEJAÏA FACULTE DE TECHNOLOGIE DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE	 <p>Faculté de Technologie كلية التكنولوجيا Université de Béjaïa</p>
--	---	---

Pour l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Option : Automatisme industriel

Mémoire de Fin d'Etude

Thème :

Automatisation d'un Système Hybride d'Alimentation

D'une Station de Pompage

Présenté par :

HAMITOUCHE Nazim

AZIRI Yacine

Encadré par : **Mr ADJATI. A**

2019/2020

Remerciement

Nous remercions notre promoteur **Mr ADJATI. A** de nous avoir fait l'honneur d'assurer l'encadrement de notre travail, nous vous sommes très reconnaissants d'avoir veillé à son élaboration en ne ménageant aucunement votre temps et vos conseils.

Nos remerciements à nos parents qui nous ont aidés moralement, financièrement, et qui étaient toujours patients et compréhensifs envers nous.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les Automates Programmables Industriels	
I.1 Introduction.....	2
I.2 Automates programmables industriels.....	2
I.3 Objectif et structure d'un système automatisé.....	3
I.3.1 Partie opérative.....	3
I.3.2 Partie commande.....	4
I.3.3 Partie relation.....	4
I.4 Architecture d'un automate programmable.....	4
I.4.1 Suivant l'aspect extérieur.....	4
I.4.1.1 Automates de type compact.....	4
I.4.1.2 Automates de type modulaire.....	4
I.4.2 Structure intérieure.....	5
I.4.2.1 Microprocesseur (UCT, CPU)	5
I.4.2.2 Unité d'alimentation.....	7
I.4.2.3 Périphérique de programmation.....	7
I.4.2.4 Liaison électrique.....	7
I.4.2.5 Les mémoires.....	7
I.4.2.6 Modules d'entrées/sorties.....	8
I.4.2.7 Module de communication.....	8
I.5 Branchement des Entrées / Sorties.....	8
I.5.1 Branchement des Entrées.....	9
I.5.2 Branchement des sorties.....	9
I.6 Fonctionnement d'un API.....	10
I.7 Les langages de programmation d'un API.....	10
I.7.1 Les langages graphiques.....	10
I.7.2 Les langages textuels.....	11
I.8 Conclusion.....	12

Chapitre II : Présentation des sources d'énergie hybride

II.1 Introduction.....	13
II.2 Système d'énergie hybride.....	13
II.3 Architecture et composants d'un système hybride.....	14
II.3.1 Architecture d'un système hybride.....	14
II.3.2 Composants d'un système hybride.....	16
II.4 Différentes sources d'énergies renouvelables.....	17
II.4.1 Energie solaire photovoltaïque.....	17
II.4.1.1 Cellule photovoltaïque.....	17
II.4.1.2 Principe de conversion photovoltaïque.....	18
II.4.1.3 Générateur photovoltaïque.....	18
II.4.1.4 Modélisation d'un module photovoltaïque.....	20
II.4.1.5 Influence des conditions climatiques.....	20
II.4.2 Energie éolienne.....	22
II.4.2.1 Définition de l'énergie éolienne.....	22
II.4.2.2 Différent types d'éoliennes.....	22
II.4.2.3 Principe De Fonctionnement.....	24
II.4.2.4 Eléments constituant un Aérogénérateur (à axe horizontal)	24
II.4.2.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	25
II.4.3 Energie hydraulique.....	26
II.4.3.1 Différents types de centrales.....	27
II.4.3.2 Principe de fonctionnement des centrales hydrauliques.....	31
II.4.3.3 Turbine.....	32
II.4.4 Pile à combustible.....	34
II.4.4.1 Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.....	34
II.4.4.2 Types de piles à combustible.....	35
II.4.4.3 Modélisation des piles à combustible (PEMFC)	36
II.5 Conclusion.....	36

Chapitre III : Etude et dimensionnement d'une station de pompage

III.1 Introduction.....	37
III.2 Station de pompage.....	37
III.2.1 Installation immergée.....	38
III.2.2 Installation à l'abri des eaux.....	38
III.3 Types de pompes.....	39
III.3.1 Les pompes volumétriques.....	39
III.3.2 Les turbopompes.....	39
III.3 Hydraulique de pompage.....	40
III.3.1 Débit (Q)	40
III.3.2 Hauteur manométrique totale.....	40
III.3.3 Hauteur d'aspiration.....	41
III.3.4 Hauteur de refoulement.....	41
III.3.5 Pertes de charges.....	42
III.3.6 Hauteur totale de pompage.....	42
III.4 Dimensionnement d'une installation de pompage autonome.....	43
III.4.1 Besoins en eau.....	44
III.4.2 Puissance hydraulique (puissance de la pompe)	44
III.4.3 Diverses puissances.....	45
III.4.4 Dimensionnement de différentes sources d'énergie.....	46
III.4.4.1 Dimensionnement du générateur photovoltaïque.....	46
III.4.4.2 Dimensionnement de la pile à combustible.....	47
III.4.4.3 Dimensionnement d'une éolienne.....	48
III.5 Conclusion.....	49

Chapitre IV : Automatisation et supervision Du système De gestion

VI.1 Introduction.....	50
VI.2 Présentation de l'automate S7-300.....	50
VI.3 Gestion de la station de pompage.....	51
VI.4 Programmation avec logiciel STEP7.....	54

VI.5 Supervision avec logiciel SIMATIC WINCC flexible.....	58
VI.6 Conclusion	62
Conclusion générale.....	63



LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Quelques opérations courantes du langage IL.....11

Tableau II.1 : Taille de centrales électriques.....27

Tableau II.2 : Principaux type de pile à combustible.....35

Tableau III.1 : Panneau photovoltaïque de type SIEMENS SM 110-24.....46

Tableau IV.1 : table des variables d'entrées.....54

Tableau IV.2 : table des variables de sorties.....54

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralités sur les Automates Programmables Industriels

Figure I.1 : Structure d'un système automatisé.....3

Figure I.2 : Architecture interne d'un API.....5

Figure I.3 : Structure et principe de fonctionnement du microprocesseur (CPU) d'un API.....6

Figure I.4 : Branchement d'un bouton poussoir et d'un capteur avec logique positive et négative.....9

Figure I.5 : Branchement d'un contacteur et un distributeur aux sorties.....9

Figure I.6 : Quelques signes d'un langage à contact.....11

Chapitre II : Présentation des sources d'énergie hybride

Figure II.1 : Architecture d'un système hybride bus CC/CA.....14

Figure II.2 : Architecture d'un système hybride bus CC.....15

Figure II.3 : Architecture d'un système hybride bus CA.....15

Figure II.4 : Principe de la conversion photovoltaïque.....18

Figure II.5 : Structure d'un système photovoltaïque.....19

Figure II.6 : Modèle à une seule diode.....20

Figure II.7 : Modèle à deux diodes.....20

Figure II.8 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I = f(V)$ 21

Figure II.9 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P = f(V)$ 21

Figure II.10 : Influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$ 21

Figure II.11 : Influence de la température sur la caractéristique $P = f(V)$ 21

Figure II.12 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.....22

Figure II.13 : Configuration à axe horizontal.....22

Figure II.14 : Éolienne de type Savonius.....23

Figure II.15 : Éolienne de type Darrieus.....23

Figure II.16 : Composants d'un aérogénérateur.....24

Figure II.17 : Exemple de barrage.....26

Figure II.18 : Energie Hydrolienne.....26

Figure II.19 : Energie marémotrice.....	27
Figure II.20 : Barrages Hydraulique.....	27
Figure II.21 : Centrale de moyenne chute.....	28
Figure II.22 : Fonctionnement d'une centrale de haute chute.....	29
Figure II.23 : Fonctionnement d'une STEP.....	29
Figure II.24 : Centrale hydroélectrique de moyenne chute.....	30
Figure II.25 : Principe de fonctionnement des centrales hydrauliques.....	31
Figure II.26 : Composants d'une turbine Pelton.....	32
Figure II.27 : Turbine Francis.....	33
Figure II.28 : Turbine Kaplan.....	33
Figure II.29 : Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.....	35
Figure II.30 : Modèle électrique d'une pile à combustible.....	36

Chapitre III : Etude et dimensionnement d'une station de pompage

Figure III.1 : Installation de pompage immergée.....	38
Figure III.2 : Installation de pompage à l'abri des eaux (pompe en aspiration et pompe en charge).....	39
Figure III.3 : Schéma d'une station de pompage en aspiration.....	41
Figure III.4 : Données d'une station de pompage (source : puits ou forage)	43
Figure III.5 : Station de pompage hybride photovoltaïque/éolienne/pile à combustible.....	43

Chapitre IV : Automatisation et supervision Du système De gestion

Figure IV.1 : Modules de l'automate S7-300.....	51
Figure IV .2 : Grafcet de remplissage du château d'eau.....	52
Figure IV .3 : Grafcets des refroidissement.....	52
Figure IV .4 : Grafcet de gestion des sources.....	53
Figure IV .5 : Programme de mesure et de calcul de la puissance délivrée par les GPV.....	55
Figure IV .6 : Programme de mesure de la vitesse du vent et de calcul de la puissance de l'éolienne.....	56

Figure IV .7 : Programme de mesures de la tension, du courant et de la puissance de la pile à combustible.....	56
Figure IV .8 : Programme de mesure de température et du codage du grafcet de refroidissement.....	57
Figure IV. 9 : Programme de remplissage du château d'eau.....	57
Figure IV .10 : Programme du codage du grafcet de remplissage du château d'eau.....	58
Figure IV .11 : Programme des grafcets de gestion des sources pour l'alimentation de la pompe.....	58
Figure IV .12 : Programme l'alimentation de pompage PV & PAC.....	59
Figure IV .13 : Vue principale.....	59
Figure IV .14 : Schéma synoptique du système de pompage.....	60
Figure IV .15 : Données concernant les panneaux photovoltaïques.....	61
Figure IV .16 : Données concernant l'éolienne.....	61
Figure IV .17 : Données concernant la pile à combustible.....	61
Figure IV .18 : Vue du circuit hydraulique.....	62
Figure IV .19 : Vue du circuit de refroidissement.....	62

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La généralisation de l'utilisation de l'énergie électrique a poussé l'homme à puiser les principales ressources provenant des combustibles fossiles.

Les déchets engendrés des combustibles fossiles ont conduit au développement de nouvelles sources dites renouvelables.

L'inconvénient de la production d'électricité à base d'énergie renouvelable, c'est la production non continue, en plus de la puissance variable et non garantie. Ce problème peut être résolu par un couplage entre les sources d'énergies et la formation d'un système dit hybride.

Les systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelable peuvent être une solution pour les sites isolés non connectés aux réseaux électriques pour garantir les différents besoins de la population, parmi ces besoins, l'eau qui est une source vitale pour l'homme, la faune et la flore.

Afin de puiser ce liquide précieux, un système hybride composé de trois sources d'énergie renouvelable (photovoltaïque, éolienne, pile à combustible) alimente une station de pompage pour remplir un château d'eau.

La gestion et le contrôle des systèmes hybrides de pompage sont nécessaires pour avoir une énergie électrique continue pour l'alimentation de la station de pompage, parmi les contrôleurs électroniques qui opposent aux différentes contraintes du site du travail, il existe les automates programmables industriels (API), qui représentent une structure permettant d'automatiser les procédés, avoir un bon rendement et une maintenance rapide.

Dans le premier chapitre, nous étalerons des généralités sur les automates programmables, leur structure, leur fonctionnement et leur langage de programmation et le deuxième chapitre traite les différentes architectures d'un système hybride et les différentes alternatives de ressources renouvelables, telles que l'énergie solaire photovoltaïque, l'éolienne, l'hydraulique et la pile à combustible.

Le troisième chapitre est consacré pour l'étude et le dimensionnement d'une station de pompage et le dimensionnement des différents générateurs d'énergie renouvelable (panneaux photovoltaïques, éolienne, pile à combustible) par rapport aux besoins en eaux de la population et au site (hauteur manométrique totale).

Finalement, nous avons élaboré au chapitre 4, l'automatisation et la supervision de la gestion du système en utilisant le logiciel STEP7 de l'automate S7-300 pour la programmation, et le SIMATIC WINCC flexible pour la supervision du système.

CHAPITRE I :

GÉNÉRALITÉS SUR LES AUTOMATES PROGRAMMABLES INDUSTRIELS

I.1 Introduction

Au début des années 50, les ingénieurs étaient déjà confrontés à des problèmes d'automatismes, les composants de base de la partie commande de l'époque étaient des relais électromagnétiques à un ou plusieurs contact (la logique câblée). Les circuits conçus comportaient des centaines voire des milliers de relais, ce qui rend les coûts de l'utilisation de cette technologie très cher avec une flexibilité désirée des installations et une absence de communication [1].

C'est en 1969 que les constructeurs américains d'automobiles exigeaient des firmes, un matériel d'automatisme plus évolués et plus souples pouvant être modifiés simplement sans coût exorbitant. Les ingénieurs créent alors, un nouveau type de produit nommé « automate programmable » à base de microprocesseurs, c'est alors la naissance de la logique programmée [1] [2].

Les premiers produits des API sont de marque MODICON et ALLEN-BRADLEY fabriqués aux USA en 1969 et en France en 1971, par EDF, MERLIN-GERIN et ALSPA [3].

Ce chapitre est consacré à l'étude de la structure d'un API, son fonctionnement et les langages de programmation associés.

I.2 Automates programmables industriels

L'Automate Programmable Industriel (API) est un appareil électronique programmable, adapté à l'environnement industriel, spécialisé dans la conduite et la surveillance en temps réel de processus industriels et tertiaires. Il exécute une suite d'instructions introduites dans ses mémoires sous forme de programme, et donne des ordres à des actionneurs via des pré-actionneurs à partir des informations logique, analogique ou numérique (capteurs, bouton poussoir...) [2].

Trois caractéristiques fondamentales le distinguent des outils informatiques, à savoir, qu'il peut être directement connecté aux capteurs et aux pré-actionneurs grâce à ses entrées/sorties. L'API est conçue pour fonctionner dans des ambiances industrielles sévères

de température et supporte les vibrations, les microcoupures de la tension d'alimentation, les parasites. A noter aussi que sa programmation s'effectue à partir des langages spécialement développés pour le traitement des fonctions d'automatismes, ceux qui facilitent son exploitation et sa mise en œuvre [1].

I.3 Objectif et structure d'un système automatisé

L'objectif de l'automatisation des systèmes est de produire des produits de qualité, par action sur une matière d'œuvre pour lui donner une valeur ajoutée, et ce avec un coût le plus faible possible en ayant recours le moins possible à l'homme [2].

Un système automatisé peut se décomposer en trois parties à savoir :

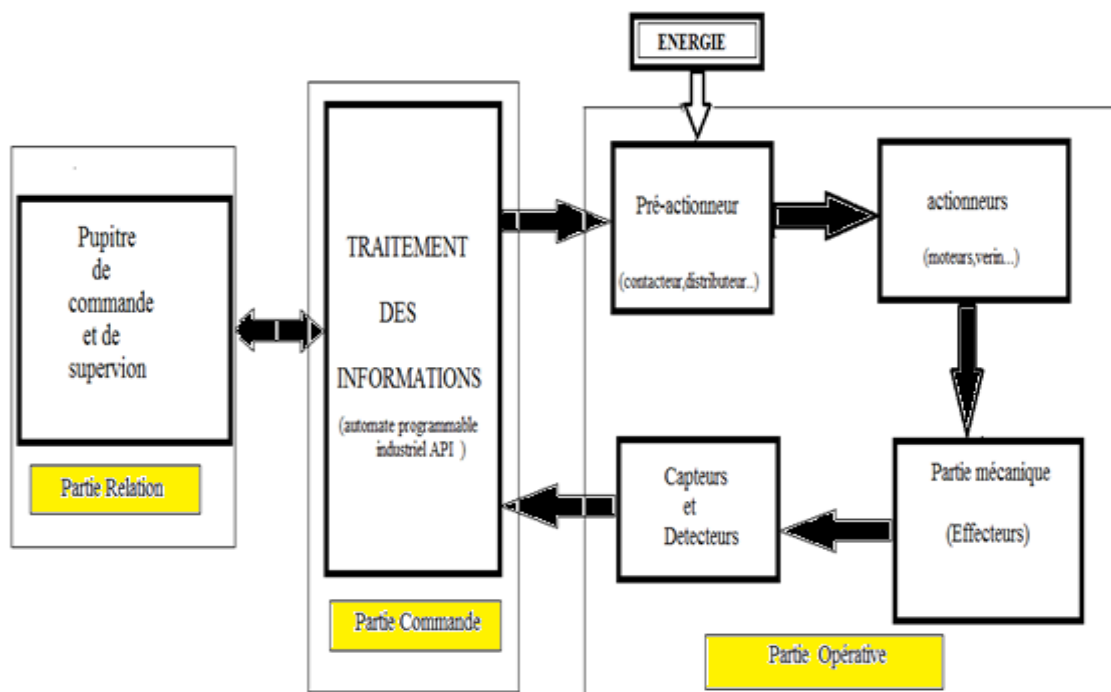


Figure I.1 : Structure d'un système automatisé

I.3.1 Partie opérative [1] [4]

Elle agit sur la matière d'œuvre afin de lui donner sa valeur ajoutée et elle regroupe :

- Les effecteurs qui sont des dispositifs terminaux qui agissent directement sur la matière d'œuvre pour lui donner sa valeur ajoutée, comme exemple les outils de coupe, les pompes, les têtes de soudure, etc.).
- Les actionneurs comme les moteurs et les vérins qui agissent sur l'effecteur qui agit à son tour sur la matière d'œuvre.

- Les pré-actionneurs qui sont des éléments chargés d'adapter entre les deux niveaux d'énergie de la partie opérative et de la partie commande et de distribuer l'énergie délivrée aux actionneurs.
- Les capteurs et détecteurs qui permettent d'acquérir les divers états du système.

I.3.2 Partie commande

C'est l'automate programmable industriel (API) dans les systèmes de production qui se veut être le cerveau du système qui gère et donne des ordres à la partie opérative et offre des informations sur l'état du système à la partie relation (pupitre) à partir des informations reçues des capteurs et des détecteurs.

I.3.3 Partie relation

C'est une partie composée des pupitres de commande et de signalisation, elle permet à l'opérateur de commander le système (marche, arrêt, départ cycle ...). Il permet également de visualiser les différents états du système à l'aide de voyants, de terminal de dialogue ou d'interface homme-machine (IHM) [2] [4].

I.4 Architecture d'un automate programmable

I.4.1 Suivant l'aspect extérieur

Les automates peuvent être de type compact ou modulaire :

I.4.1.1 Automates de type compact

Ces automates, de fonctionnement simple, sont généralement destinés à la commande de petits automatismes. Ils existent des modules de programmation de type Siemens, ZELIO de Schneider, MILLENIUM de Crouzet, pour ne citer que ceux-là.

Le processeur, l'alimentation et les entrées et les sorties sont intégrés. Selon les modèles et les fabricants, il pourra réaliser certaines fonctions supplémentaires (comptage rapide, E/S analogiques, etc. ...) et recevoir des extensions en nombre limité [1] [2].

I.4.1.2 Automates de type modulaire

Le processeur, l'alimentation et les interfaces d'entrées/sorties résident dans des unités séparées (modules) et sont fixées sur un ou plusieurs racks.

Ces automates sont intégrés dans les automatismes complexes où puissance, capacité de traitement et flexibilité sont nécessaires [1] [2].

I.4.2 Structure intérieure

La structure interne d'un API est assez voisine de celle d'un système informatique simple, l'unité centrale est le regroupement du processeur et de la mémoire centrale. Elle commande l'interprétation et l'exécution des instructions programme. Les instructions sont effectuées les unes après les autres, séquencées par une horloge [3].

D'une manière générale, un API est structuré autour de plusieurs éléments de base qui sont l'unité centrale de traitement (UCT), l'unité d'alimentation, les interfaces d'entrées/sorties, l'interface de communication et le périphérique de programmation [3].

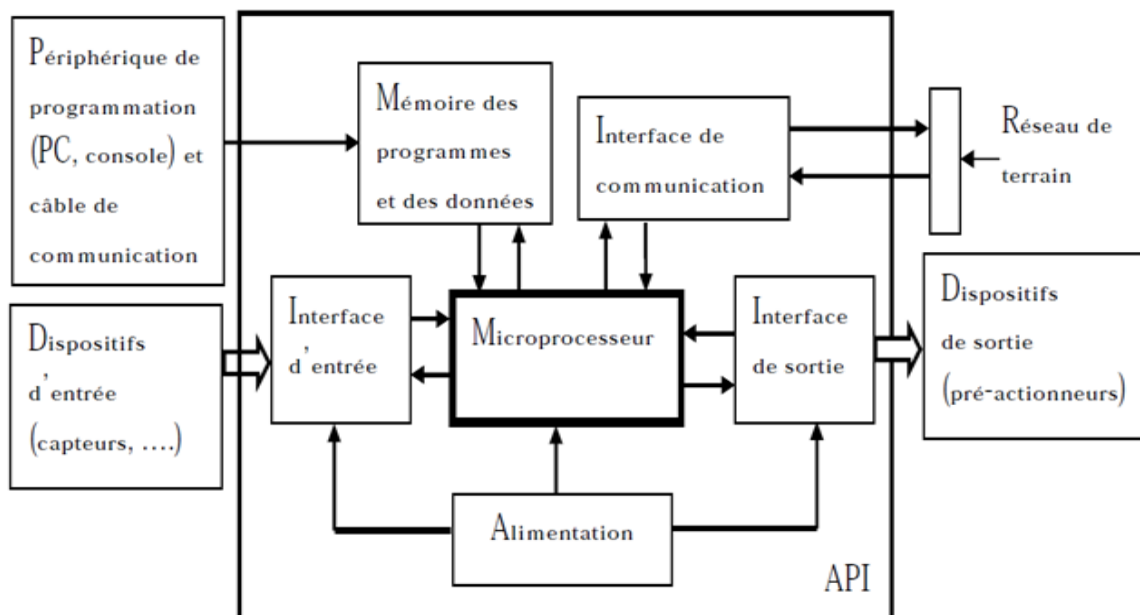


Figure I.2 : Architecture interne d'un API [3]

I.4.2.1 Microprocesseur (UCT, CPU)

C'est le cœur de l'API. Il interprète les signaux d'entrées et effectue les actions de commande conformément au programme stocké en mémoire, en communiquant aux sorties les décisions sous forme de signaux d'actions. L'UCT est composé d'une unité arithmétique et logique, de l'unité de commande et d'un ensemble de registre [3].

Les principaux registres existants dans un processeur sont [1] :

- **L'accumulateur** : C'est le registre où s'effectuent les opérations du jeu d'instruction, les résultats sont contenus dans ce registre spécial.

- **Le registre d'instruction :** Il reçoit l'instruction à exécuter et décode le code opération. Cette instruction est désignée par le pointeur.
- **Le registre d'adresse :** Ce registre reçoit, parallèlement au registre d'instruction, la partie opérande de l'instruction. Il désigne le chemin par lequel circulera l'information lorsque le registre d'instruction validera le sens et ordonnera le transfert.
- **Le registre d'état :** C'est un ensemble de positions binaires décrivant, à chaque instant, la situation dans laquelle se trouve précisément la machine.
- **La pile :** Une organisation spéciale de registres constitue une pile, ses mémoires sont utilisées pour contenir le résultat de chaque instruction après son exécution. Ce résultat sera utilisé ensuite par d'autres instructions, et cela pour faire place à la nouvelle information dans l'accumulateur.

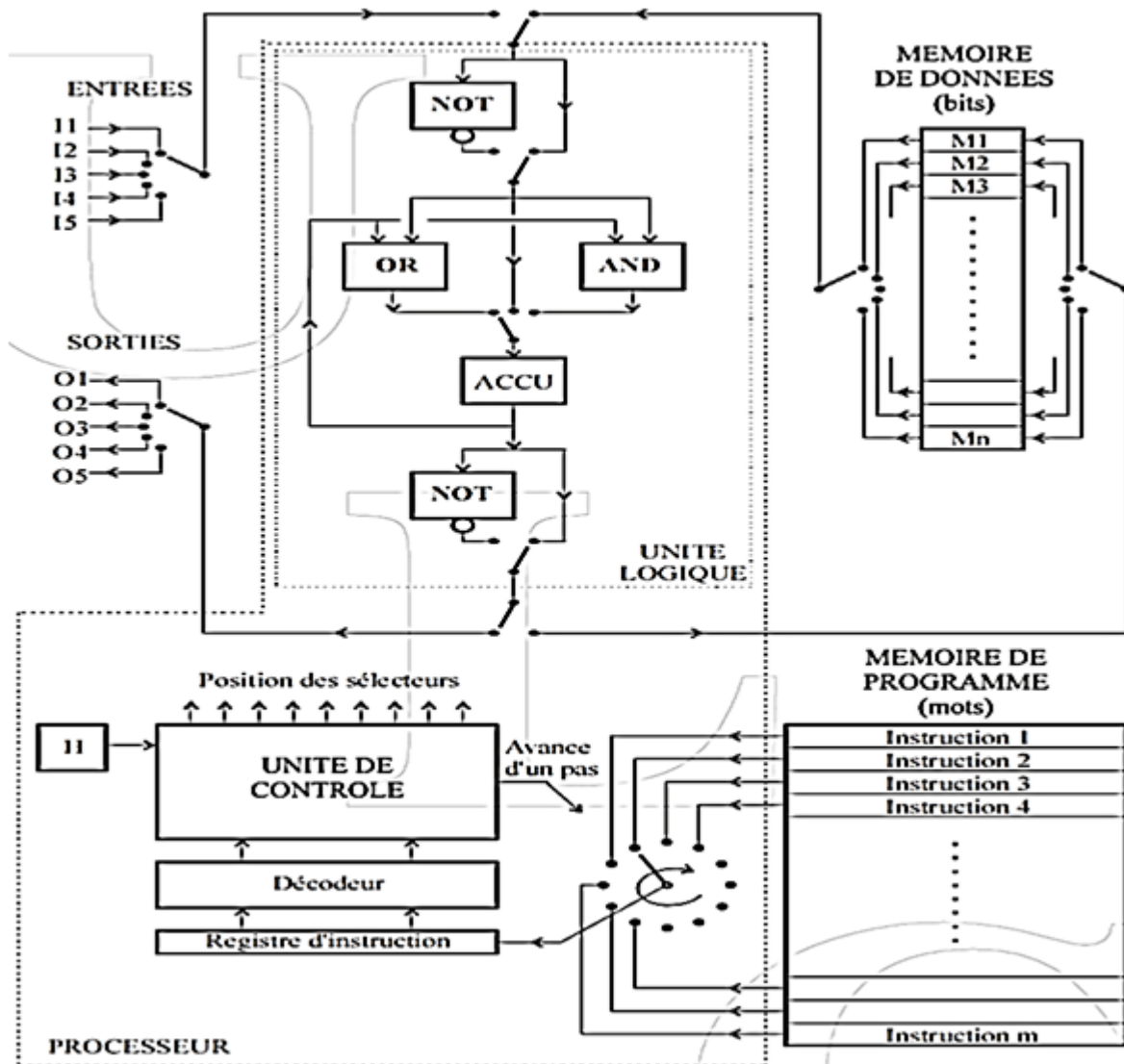


Figure I.3 : Structure et principe de fonctionnement du microprocesseur (CPU) d'un API [5]

I.4.2.2 Unité d'alimentation

Elle est indispensable à l'ensemble des systèmes puisqu'elle convertit une tension alternative en une basse tension continue (en général de 5 V) nécessaire au microprocesseur et aux modules d'entrées-sorties (12V, 24V, 48V, 110V, 240V) continu ou alternative [3].

I.4.2.3 Périphérique de programmation

Il est composé d'une console ou d'un PC avec dans les deux cas d'un câble spécial et il est indispensable pour le transfert du programme dans l'API. La programmation des premier API utilise exclusivement une console, les API récents sont programmées en plus d'une console avec des PC. Une fois le programme est développé alors il est transféré dans la mémoire de l'API avec un câble spécial basé sur la transmission série [3].

I.4.2.4 Liaison électrique

Avec l'extérieur, les liaisons sont assurées par des bornes (à vis, à clasper...etc.), sur lesquelles arrivent des câbles et à l'intérieur avec des bus internes qui permettent la communication de l'ensemble des blocs de l'automate, avec une liaison parallèle entre eux [1].

Il existe plusieurs types de bus, car on doit transmettre des données, des états des adresses.

I.4.2.5 Les mémoires

Elles permettent de stocker le système d'exploitation, le programme et les données système lors du fonctionnement [2]. Il existe dans les API deux types de mémoires qui remplissent des fonctions différentes :

- La mémoire Langage où est stocké le langage de programmation. Elle est en général figée, c'est à dire en lecture seulement (ROM : mémoire morte). Elle sauvegarde son contenu même après coupure de l'alimentation [3] [5].

- La mémoire Travail utilisable en lecture-écriture pendant le fonctionnement c'est la RAM (mémoire vive). Elle s'efface automatiquement à l'arrêt de l'automate. Elle est partagée en une zone mémoire des données qui contient les variables d'entrées, les variables de sorties, les variables internes (temporisations, compteurs, ...) et une zone mémoire programme qui contient le programme développé par l'utilisateur et qui traite les données de la zone mémoire des données [3] [5].

I.4.2.6 Modules d'entrées/sorties

Elles permettent au microprocesseur de recevoir et d'envoyer des informations aux dispositifs extérieurs, chaque entrée/sortie comporte une adresse d'entrée ou de sortie. Les interfaces E/S peuvent être de trois types :

a) Entrées / Sorties TOR (Tout ou Rien) : Ce sont des E/S à deux états, présence ou absence d'énergie (tension). Elles sont représentées par un seul bit. Les entrées de ce type sont bouton poussoir, interrupteur, fin de course, capteur de présence ou d'absence d'objet, ... et les sorties de cette nature sont les relais électriques, distributeurs, Leurs nombres est en générale de 8, 16, 24 ou 32 entrées/sorties, qui peuvent fonctionner en continue 24V, 48V ou en alternative 24V, 48V, 100/120V, 200/240V [3] [1].

b) Entrées / Sorties numériques (TOR) : Elles peuvent être vues comme une suite d'E/S (signaux) discrète (TOR) qui produisent des E/S (signaux) numériques. Elles sont représentées par au moins deux bits [3].

c) Entrées analogiques : Les signaux transmit par les broches entrées analogiques à l'API sont l'équivalent numérique des signaux continus des grandeurs surveillées par des capteurs. Ces variables physiques peuvent être une température, une pression, un niveau, une tension, un courant, une vitesse, Elles sont équipées de convertisseur analogique-numérique (CAN) qui permet de convertir les signaux analogiques en signaux numériques sur plusieurs bits que la CPU de l'API peut traiter. Chaque niveau de tension à l'entrée analogique est codé sur un signal numérique de n bits que peut traiter la CPU en faisant des opérations logiques, arithmétiques [3].

d) Sorties analogiques : la CPU donne les ordres sous forme d'un signal numérique, si l'une des sorties fonctionnent en signal analogique, alors il est impératif de convertir les signaux numériques en signaux analogiques. Cette tâche est réalisée par des sorties analogiques équipées de convertisseurs numérique-analogique (CNA). Le CNA convertit un signal numérique sur n bits transmit par la CPU en un signal analogique continue.

I.4.2.7 Module de communication

Il permet la communication entre l'API et d'autres périphériques (pupitre de supervision ...) à l'aide d'un protocole de communication (RS232, Ethernet...).

I.5 Branchement des Entrées / Sorties

I.5.1 Branchement des Entrées

Le principe de raccordement consiste à envoyer un signal électrique vers l'entrée choisie sur l'automate dès que l'information est présente. L'alimentation électrique peut être fournie par l'automate (en général 24V continu) ou par une source extérieure. Un automate programmable peut être à logique positive ou négative [3] [6].

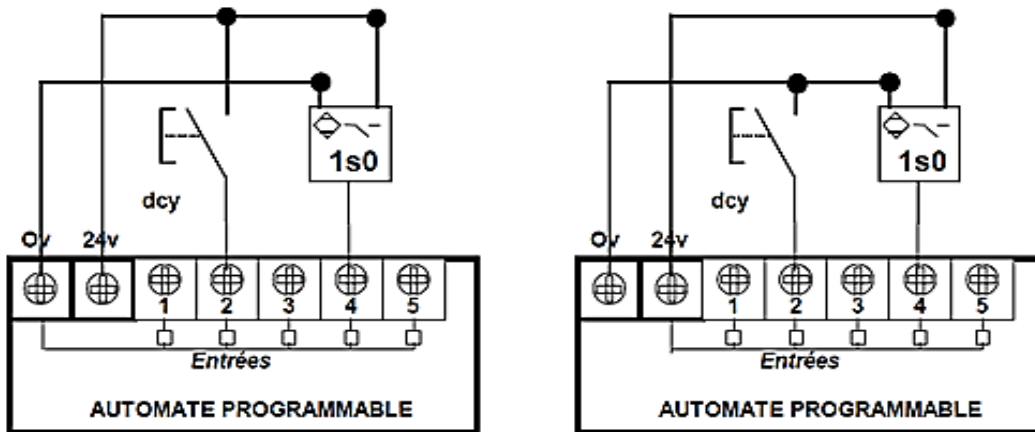


Figure I.4 : Branchement d'un bouton poussoir et d'un capteur avec logique positive et négative

Le commun interne des entrées est relié au 0v dans la logique positive, et relié au 24v dans la logique négative.

I.5.2 Branchement des sorties

Le principe de raccordement consiste à envoyer un signal électrique vers le pré-actionneur connecté à la sortie choisie de l'automate dès que l'ordre est émis [3] [6].

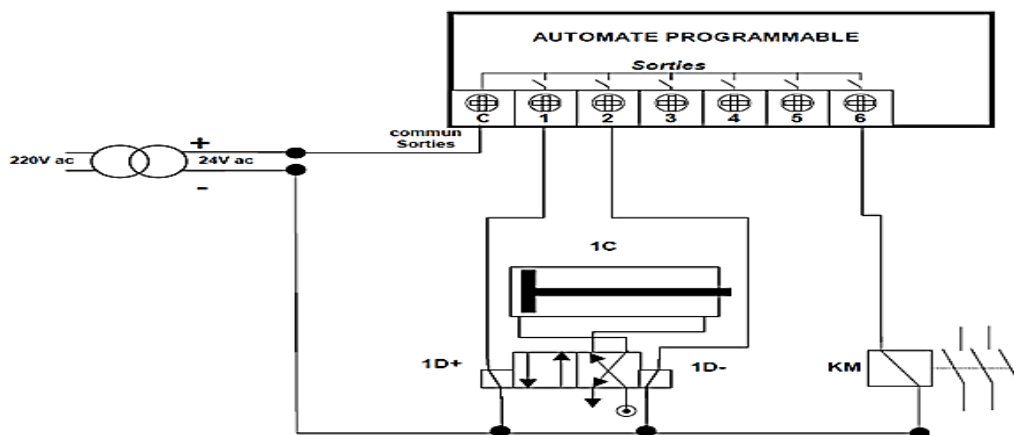


Figure I.5 : Branchement d'un contacteur et un distributeur aux sorties

I.6 Fonctionnement d'un API

Tous les automates fonctionnent selon le même mode opératoire, suivant un cycle de traitement interne, suit la lecture des entrées puis l'exécution du programme et l'écriture des sorties.

a) **Traitement interne** : L'automate effectue des opérations de contrôle et met à jour certains paramètres systèmes (détection des passages en RUN / STOP, mises à jour des valeurs de l'horodateur, ...).

b) **Lectures des entrées** : L'automate lit les entrées (de façon synchrone) et les recopie dans la mémoire image des entrées.

c) **Exécution du programme** : L'automate exécute le programme instruction par instruction et écrit les sorties dans la mémoire image des sorties.

d) **Ecriture des sorties** : Lecture des variables de sorties dans la mémoire image des sorties zone des données de la RAM par les sorties physiques de l'API [2].

Ces quatre opérations sont effectuées continuellement par l'automate (fonctionnement cyclique). On appelle scrutation l'ensemble des quatre opérations réalisées par l'automate et le temps de scrutation est le temps mis par l'automate pour traiter la même partie de programme. Ce temps est de l'ordre de la dizaine de millisecondes pour les applications standards [2].

I.7 Les langages de programmation d'un API

Aux USA, les problèmes de logique (en industrie) ont été résolus par des armoires à relais, puis par des mini-ordinateurs et en fin par des API. En Europe, ils ont utilisés les armoires à relais, puis la logique statique (portes logique) et enfin la logique programmable (API). Chaque marque d'API a un logiciel spécifique, malgré les ressemblances qui existent. Les API peuvent être programmées par cinq langages différents qui sont classés en deux types [3] :

I.7.1 Les langages graphiques

Ils ont été les premiers utilisés sur les API et nous retrouvons trois types :

a) **Langage à contact (LD : Ladder diagram)** : Langage graphique développé pour les électriciens. Il utilise les symboles tels que : contacts, relais et blocs fonctionnels et s'organise en réseaux. C'est le plus utilisé.

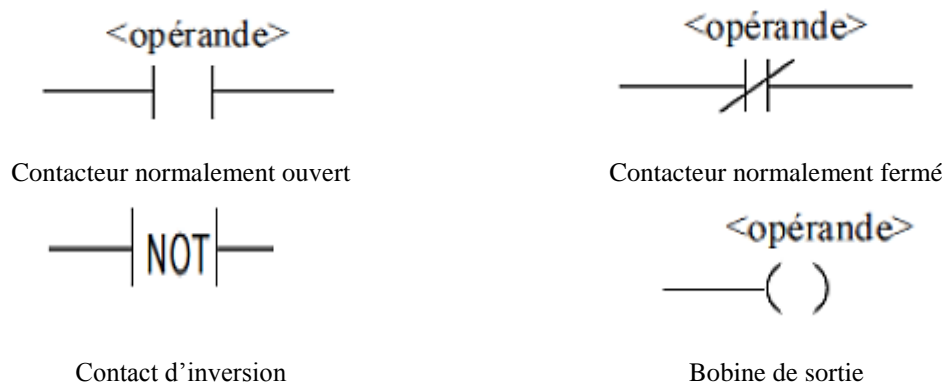


Figure I.6 : Quelques signes d'un langage à contact

b) **Blocs fonctionnels (FBD : Function Bloc Diagram)** : Il a été développé en Europe. Il permet de programmer sur un API les équations logiques (logigramme) d'un automatisme sous forme d'un schéma logique (portes logiques et bascules) [3].

c) **Les graphes de fonction séquentielle (SFC Sequentiel Function Charts), GRAFCET** : Il est utilisé pour décrire les opérations séquentielles. Le procédé est représenté comme une suite connue d'étapes (états stables), reliées entre elles par des transitions. Une condition booléenne est attachée à chaque transition [3].

I.7.2 Les langages textuels

Ils sont de deux types :

a) **Liste d'instructions (IL : Instruction List)** : Langage textuel de même nature que l'assembleur (programmation des microprocesseurs) [2]. Très peu utilisé par les automaticiens malgré le petit espace mémoire occupé par rapport au langage à contact.

Quelque opérations courantes de IL sont résumé par le tableau (I.1) :

Tableau I.1 : Quelques opérations courantes du langage IL [5]

Désignation	Signification	Désignation	Signification
S	Forçage à un.	AND	« ET » logique entre deux opérandes booléenne
R	Forçage à zéro.	OR	« OU » logique entre deux opérandes booléenne
MULL	multiplication entre deux opérandes.	ADD	addition entre deux opérandes
LD	charge l'opérande dans le registre utilisé pour les opérations (accumulateurs).	ST	stock le résultat dans un opérande.

b) Langage littéral structuré (ST : Structured Text) : Langage informatique évolué de même nature que le Pascal, il utilise les fonctions comme if ... then..., else ... (si ... alors ... sinon ...). Peu utilisé par les automaticiens [2].

I.8 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'apprendre que dans les systèmes automatisés industriels l'organe qui commande le système (partie opérative) est les automates programmables industriels (API). Nous avons vu leurs architectures, le branchement des Entrées/Sorties, leurs fonctionnements et leurs langages de programmation associés. En se basant sur cette étude théorique nous pouvons utiliser n'importe quel API pour l'automatisation d'un système.

CHAPITRE II

PRÉSENTATION DES SOURCES D'ÉNERGIE HYBRIDE

II.1 Introduction

La production classique ou conventionnelle de l'énergie électrique se fait, généralement, à partir des sources d'énergie fossile, (gaz, charbon...).

Les pronostics d'épuisement des sources d'énergie fossile, observés ces dernières années, sont les principales causes de l'essor des énergies renouvelables qui se taillent leurs parts dans la production d'électricité.

Les sources d'énergie renouvelable peuvent être considérées comme inépuisables à l'échelle humaine, puisqu'elles utilisent des flux énergétiques naturels (soleil, eau, vent...) et une autre raison de choix de ce type de centrale est la lutte contre les émissions polluantes des centrales électriques à base d'énergie fossile qui sont la cause de nombreux phénomènes néfastes comme le trou d'ozone, le réchauffement climatique globale.

L'inconvénient de la production d'électricité à base d'énergie renouvelable est la production non continue de cette énergie, en plus, la puissance variable est non garantie. Ce problème peut être résolu par un couplage avec d'autres sources d'énergie (renouvelable ou non renouvelable) et la formation d'un système dit hybride.

Ce chapitre est consacré à l'étude des structures des systèmes hybrides, des différentes sources d'énergie renouvelable utilisée dans ces systèmes, notamment, le photovoltaïque, l'éolienne, l'hydraulique et la pile à combustible.

II.2 Système d'énergie hybride

Un système hybride à sources d'énergie renouvelables est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une des sources au moins est renouvelable, c'est-à-dire, associer au moins deux technologies complémentaires où au moins l'une est renouvelable. L'hybridation, peut être une combinaison entre plusieurs énergies renouvelables ou entre énergie renouvelable et non renouvelable (fossile) [7].

Le système hybride doit, notamment, assurer en tout temps l'énergie suffisante demandée par la charge et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable.

En plus, il doit compter sur une gestion automatisée des sources d'énergie par rapport aux conditions présentes afin de garantir la stabilité en tout temps [8].

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Ils existent des classifications par rapport :

a) Au régime du fonctionnement

Deux classifications se distinguent, la première est les systèmes hybrides travaillant en parallèle avec le réseau électrique appelé aussi connectés réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge électrique demandée. La deuxième classification est les Systèmes hybrides autonomes qui doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique [7].

Les systèmes d'énergie hybride sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans des régions isolés [8].

b) A la structure du système hybride

Trois classifications sont répertoriées, où la première est relative à la présence ou non d'une source d'énergie classique (énergie fossile) et la deuxième classification possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage où généralement tous les systèmes autonome disposent d'un tel dispositif et la dernière classification est relative aux types de sources d'énergie renouvelable utilisées, elle peut être un système photovoltaïque, une éolienne, un système hydroélectrique, ou une combinaison de ces sources [9, 7].

II.3 Architecture et composants d'un système hybride

II.3.1 Architecture d'un système hybride

a) Configuration bus CC/CA

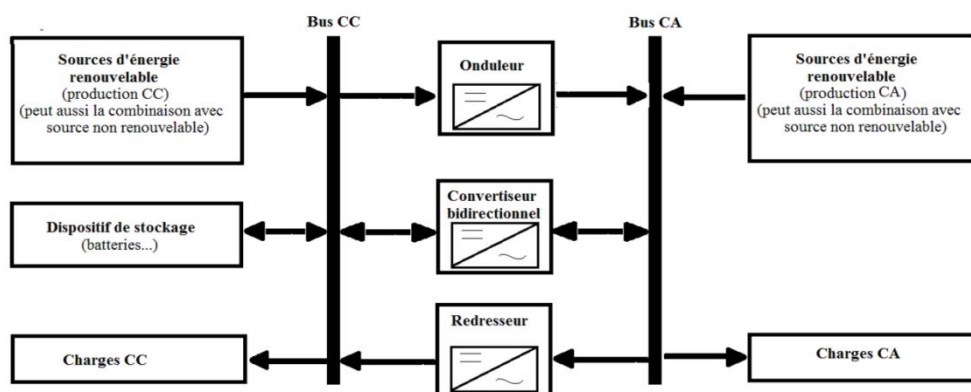


Figure II.1 : Architecture d'un système hybride bus CC/CA

Les sources d'énergies renouvelables peuvent être connectées au bus à CA (Courant alternatif) ou à CC (Courant continu) en fonction de l'énergie produite (CA ou CC). L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'intermédiaire de l'électronique de puissance avec des onduleurs, des redresseurs ou des convertisseurs bidirectionnels pour le dispositif de stockage [8].

b) Configuration bus CC

La puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus CC et les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leurs puissances à un redresseur pour être convertie en CC [8].

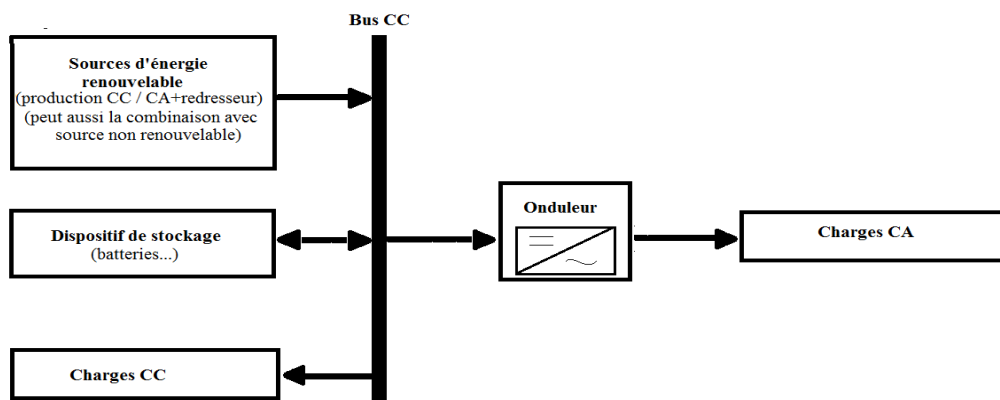


Figure II.2 : Architecture d'un système hybride bus CC

c) Configuration bus CA

La puissance est centralisée sur un bus CA, les systèmes à CC fournissent d'abord leurs puissances à un onduleur pour être convertie en CA.

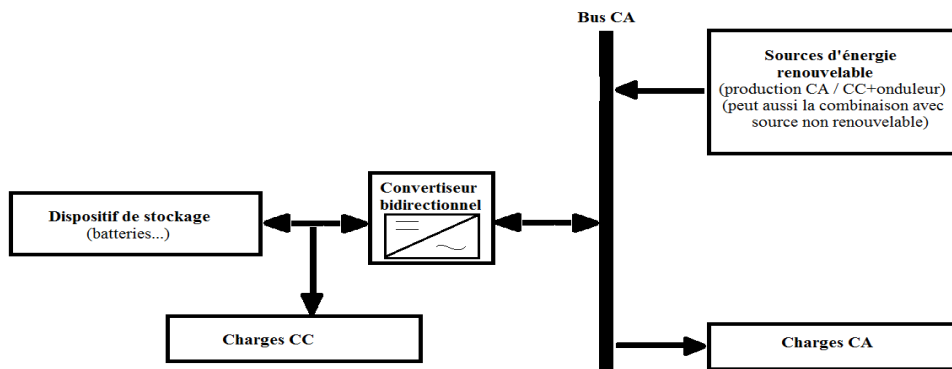


Figure II.3 : Architecture d'un système hybride bus CA

Dans les systèmes hybrides, le dispositif de stockage jouent un double rôle, de source et de charge.

Ce dispositif de stockage alimente le système provisoirement en cas d'absence des sources d'énergie, et il stocke de l'énergie dans le cas normal (l'alimentation de la charge s'effectue par les sources d'énergie).

II.3.2 Composants d'un système hybride

Les principaux composants d'un système hybride sont présentés ci-dessus dans les schémas d'architecture :

a) Sources d'énergies renouvelables

Ces sources peuvent être des éoliennes, du photovoltaïque, de l'énergie hydraulique, de la géothermie, de l'énergie contenue dans l'hydrogène (piles à combustibles) ou une combinaison entre elles ou avec une énergie non renouvelable (fossile).

b) Dispositif de stockage

Généralement, des batteries assurent le stockage de l'énergie électrique, mais il existe d'autres options telles que le stockage inertiel, le stockage sous forme d'air comprimé et le stockage d'hydrogène [8].

c) Charges

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à courant continu CC (ex : moteur à courant continu) et à courant alternatif CA (ex : moteur asynchrone et synchrone).

d) Convertisseurs

Les convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockages et pour transformer le CC en CA et vice versa.

Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les systèmes hybrides : les redresseurs, les onduleurs, les hacheurs.

e) Système de supervision

C'est un composant auxiliaire, mais la plupart des systèmes hybrides utilisent ces systèmes pour la supervision de l'état des différents composants du système.

II.4 Différentes sources d'énergies renouvelables

Ces sources se renouvèlent et ne s'épuisent jamais à l'échelle humaine. Il existe plusieurs sources et les plus utilisées dans les systèmes hybrides sont :

II.4.1 Energie solaire photovoltaïque

Les panneaux solaires photovoltaïques convertissent directement les rayonnements solaires en énergie électrique.

Les panneaux photovoltaïques captent la majorité du rayonnement directement du soleil et le reste est soit un rayonnement diffusé par l'atmosphère ou des rayonnements réfléchis par le sol [10].

II.4.1.1 Cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est le plus petit élément d'un panneau photovoltaïque, elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique [11].

Les cellules photovoltaïques se divisent en trois groupes :

a) Cellules monocristallines

Elle est élaborée à partir d'un bloc de silicium cristallisé où le monocristallin est obtenu avec le refroidissement lent et maîtrisé du silicium. Ces cellules sont rondes ou presque carrées, et vue de près elles ont une couleur uniforme, elles ont un rendement entre 13 à 18% [12].

b) Cellules poly-cristallines

Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vue de près, on peut voir les différentes orientations des cristaux, ils ont un rendement de 11 à 15 % mais leur cout de production est moins élevé que les cellules monocristallines. L'avantage de ces cellules est qu'elles produisent peu de déchet par rapport aux cellules monocristallines, et qu'elles nécessitent deux à trois fois moins d'énergie pour leur fabrication [12].

c) Cellules amorphe

Leur cout de production est bien plus bas, mais malheureusement leur rendement est que de 6 à 8 %. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium [12]. Son avantage est le fonctionnement avec un éclairage faible [11].

II.4.1.2 Principe de conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité à l'aide de la production et le transport dans un matériau semi-conducteur de charge électrique positive et négative sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présente un excès des électrons (type N) et l'autre un déficit des électrons (type P) [12].

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie, si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de Gap de ce semi-conducteur, l'électron sera décroché de son atome, passe de la bande de valence vers la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, si une connexion extérieur est établie il y'aura le déplacement des électrons libres, ce que veut dire, un courant électrique continu est créé [10].

L'énergie de Gap est définie par :

$$W_g = W_c - W_v \quad (\text{II.1})$$

Avec, W_g : énergie de Gap, W_c : énergie de conduction et W_v : énergie de valence

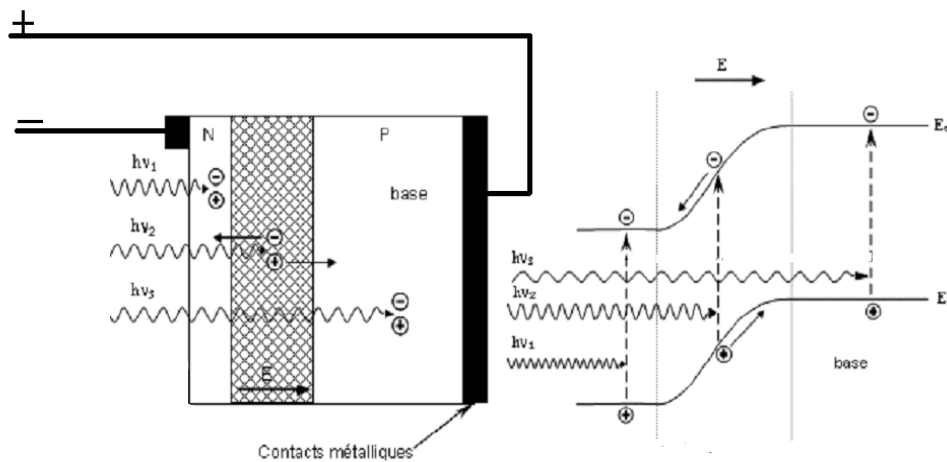


Figure II.4 : Principe de la conversion photovoltaïque [10].

II.4.1.3 Générateur photovoltaïque

Il est constitué de plusieurs modules assemblés en série et en parallèle selon la puissance demandé. Chaque module est lui-même constitué de cellules photovoltaïques [12].

La puissance fournie par une seule cellule étant très faible, plusieurs cellules dont les caractéristiques sont semblables doivent être électriquement associées en série ou en parallèle [10].

La plupart des modules photovoltaïques est composé de 36 cellules silicium cristallisées connectées en série pour des applications de 12 volts [12].

La puissance disponible en sortie d'un module est donnée par [10] :

$$P_{pv} = N_{sce} \times V_{ce} \times N_{pce} \times I_{ce} \quad (\text{II.2})$$

Avec, N_{sce} : nombre de cellules en série, N_{pce} : nombre de cellules en parallèle, V_{ce} : tension de la cellule photovoltaïque et I_{ce} : le courant d'une cellule photovoltaïque.

a) Mise en série des cellules photovoltaïques

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante est obtenue par l'addition des tensions à courant donné.

$$\begin{cases} V_{pv} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \\ V_{pv} = N_{sce} \times V_{ce} \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

b) Mise en parallèle des cellules photovoltaïques

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 l'addition des courants à une tension donnée.

$$\begin{cases} I_{pv} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \\ I_{pv} = N_{pce} \times I_{ce} \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

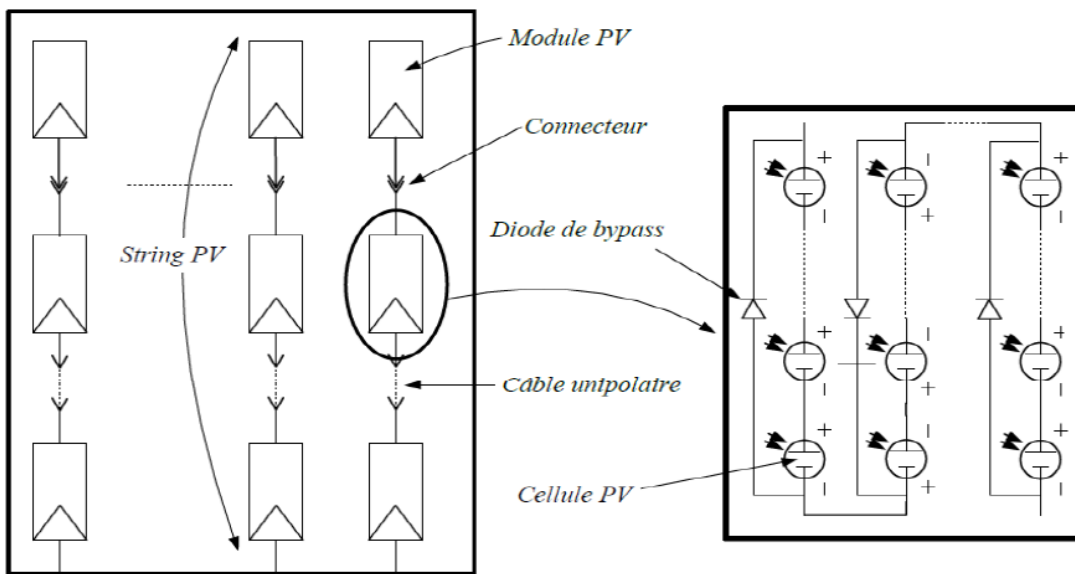


Figure II.5 : Structure d'un système photovoltaïque [10].

Afin d'obtenir la puissance désirée, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série N_s et parallèle N_p [10].

II.4.1.4 Modélisation d'un module photovoltaïque

Le modèle couramment utilisé pour décrire la production d'énergie des cellules photovoltaïques est le modèle de circuit à diode unique [9] représenté par la figure (III.6) et il existe aussi, à l'instar d'autres modèles, le modèle à deux diodes représenté par la figure (II.7) [9, 10].

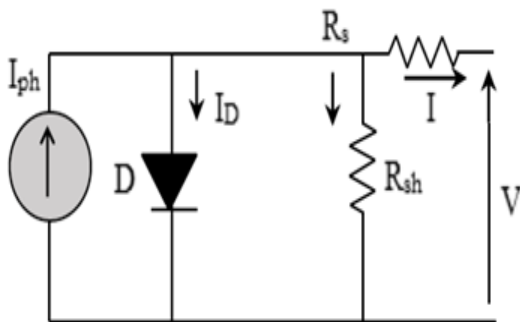


Figure II.6 : Modèle à une seule diode [9]

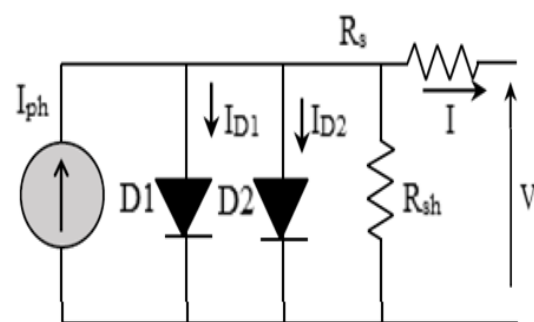


Figure II.7 : Modèle à deux diodes [9]

Avec, I_{ph} : photo-courant produit, I : courant débité, V : tension de sortie, R_s : résistance caractérisant les pertes dues à la connectique matérialisée, R_{sh} : résistance caractérisant les contacts métalliques et les résistances de fuites, D : diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un seul sens et que le circuit ne doit pas rester ouvert (source de courant).

II.4.1.5 Influence des conditions climatiques

Les caractéristiques d'un module photovoltaïque ($P = f(V)$, $I = f(V)$) varient en fonction de la température et de l'ensoleillement.

a) Influence de l'ensoleillement

Les essais sont effectués à une température constante de 25 °C et l'ensoleillement S varie.

A partir des courbes de la figure (II. 8), on remarque que la baisse de l'éclairement S entraîne une diminution du courant de court-circuit. Par contre la tension de circuit ouvert diminue faiblement. Et pour la puissance, la figure (II.9) montre que le point optimal chute brusquement si l'ensoleillement diminue [10].

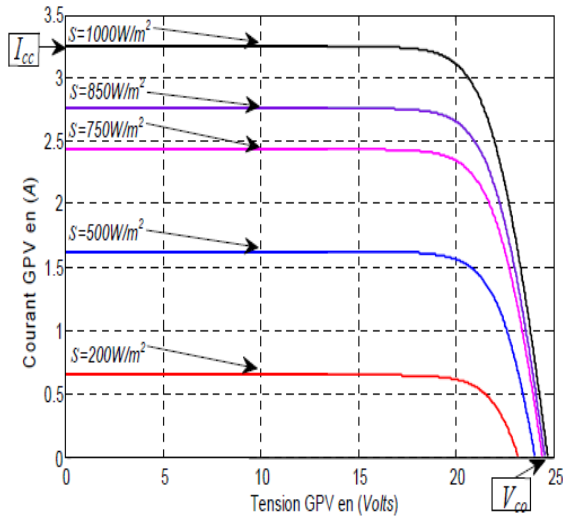


Figure II.8:
Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I = f(V)$

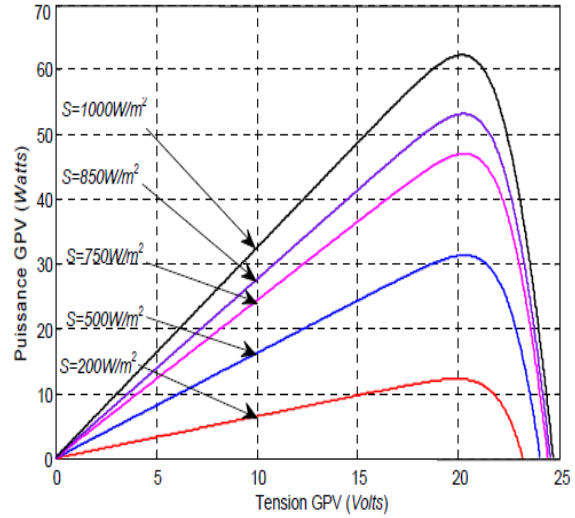


Figure II.9:
Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $P = f(V)$

b) Influence de la température

Pour un ensoleillement maintenu constant à 1 kW/m^2 , la température T varie.

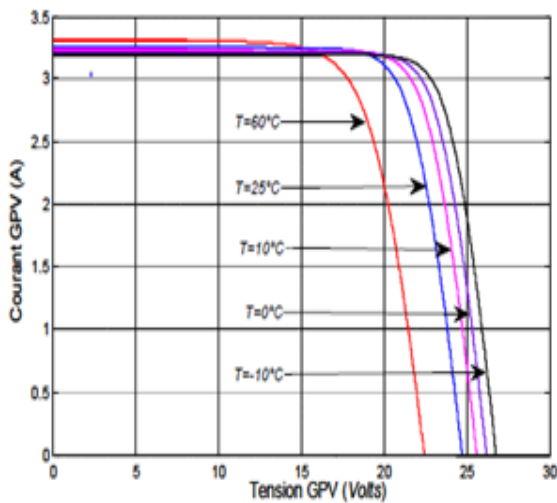


Figure II.10:
Influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$

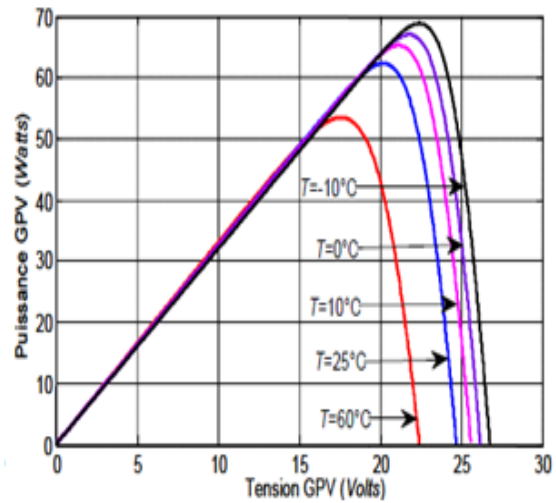


Figure II.11:
Influence de la température sur la caractéristique $P = f(V)$

A partir des courbes de la figure (II.10), on remarque que le courant de court-circuit est faiblement dépendant de la température alors que la tension à vide est très sensible à la variation de la température. Pour la puissance, on remarque que la puissance optimale va dans le sens inverse de la température selon la figure (II.11) [10].

II.4.2 Energie éolienne

II.4.2.1 Définition de l'énergie éolienne

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elle est utilisée pour produire l'électricité.

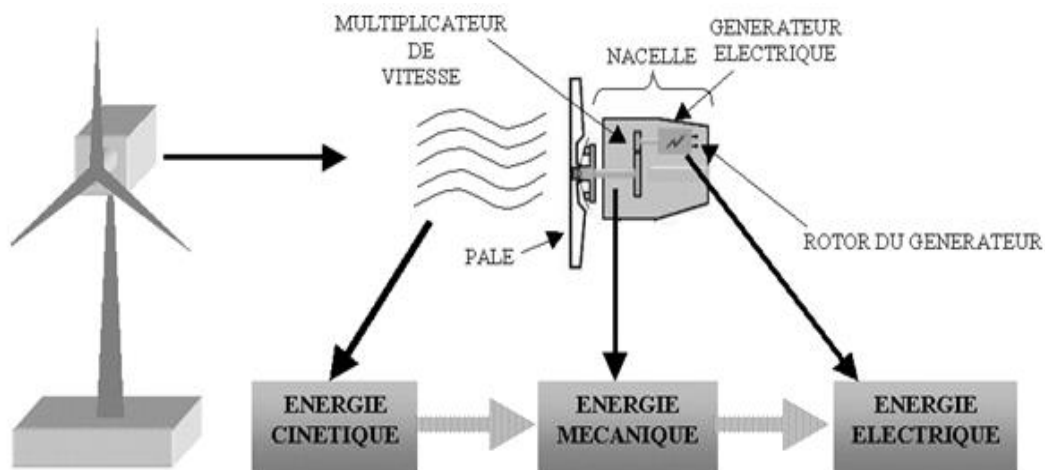


Figure II.12 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [13]

II.4.2.2 Différent types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles [14] :

a) Eoliennes à axe horizontal

Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent.

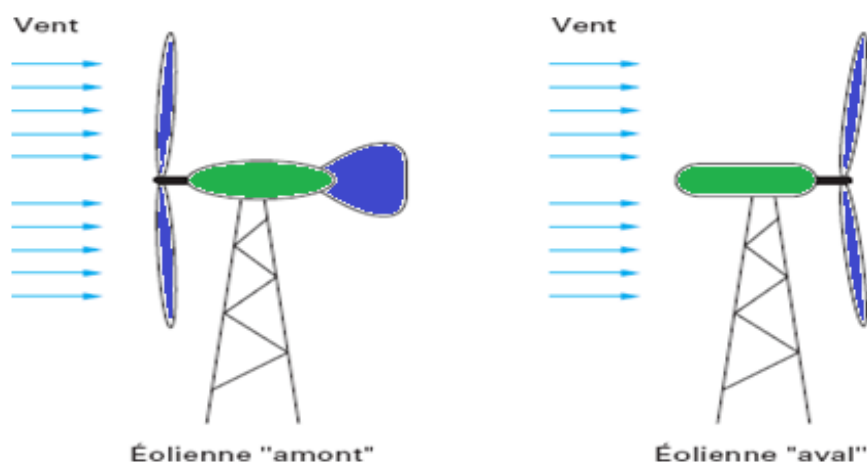


Figure II.13 : Configuration à axe horizontal [14]

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait que :

- ✓ Leurs rendements élevés est supérieurs à celui de toutes les autres machines.
- ✓ Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multiples pour le pompage de l'eau.
- ✓ Elles sont de conception simple.

b) Éoliennes à axe vertical

L'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et elles sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. elles possèdent, l'avantage d'avoir des organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles, elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation [15].

L'éolienne Savonius et Darrieus Deux se distinguent particulièrement d'autres modèles existants.

L'éolienne Savonius (figure II.14) comporte principalement deux demi cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise la traînée pour tourner. Cette machine est simple à fabriquer et elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s.

L'éolienne inventée par le Français Darrieus (figure II.15) est un rotor dont la forme la plus courante. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité, mais malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisé.



Figure II.14:
Éolienne de type Savonius [14]



Figure II.15:
Éolienne de type Darrieus [14]

II.4.2.3 Principe De Fonctionnement

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée, autour du profil, une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [15].

II.4.2.4 Eléments constituant un Aérogénérateur (à axe horizontal)

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre du rotor. Cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée par des charges isolées.

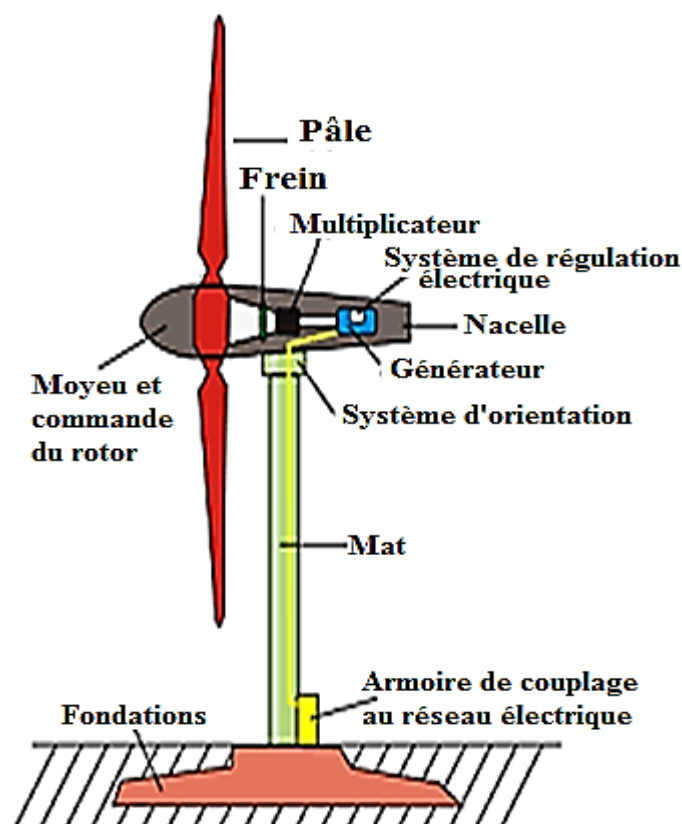


Figure II.16: Composants d'un aérogénérateur [16,18]

- **Les pales** : Capteurs d'énergie cinétique
- **Le moyeu** : permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
- **L'arbre primaire** : relie les pales au multiplicateur.
- **Multiplicateur** : permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse.
- **L'arbre secondaire** : transmet l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
- **Le générateur électrique** : assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
- **Le mât** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante où plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.
- **Système d'orientation de la nacelle** : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
- **Système de refroidissement** : il peut être de l'air, de l'eau ou de l'huile et il est destiné au multiplicateur et à la génératrice.
- **Outils de mesure du vent** : c'est une girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.
- **Système de contrôle électronique** : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
- **Transformateur** : se trouve au pied du mât.

II.4.2.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne [17]

a) Les avantages :

- ✓ Forme d'énergie indéfiniment durable et propre ;
- ✓ Ne nécessite aucun carburant ;
- ✓ Ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs ;
- ✓ Préserve les ressources hydriques ;
- ✓ Ne produit pas d'émissions nocives ;
- ✓ Entièrement renouvelable, hautement fiable et très efficiente ;
- ✓ Qualifiée comme source la plus économique.

b) Les inconvénients :

- ✓ Rendement faible ;
- ✓ Fluctuation du vent ;
- ✓ Bruit et grincement ;
- ✓ Désarroi causé aux oiseaux.

II.4.3 Energie hydraulique

L'énergie hydraulique est l'énergie mise en jeu lors du déplacement ou de l'accumulation d'un fluide incompressible telle que l'eau douce ou l'eau de mer .Ce déplacement va produire un travail mécanique qui est utilisé directement ou converti sous forme d'électricité (Marémotrice ; Hydrolienne, Barrage).



Figure II.17: Exemple de barrage

a) Hydrolienne :

Le modèle d'hydroliennes anglaises de Sea Gen ont une capacité de 1,2 MW, les courants marins représentent une énergie fabuleuse qui contrairement aux vents sont constants et prévisibles.

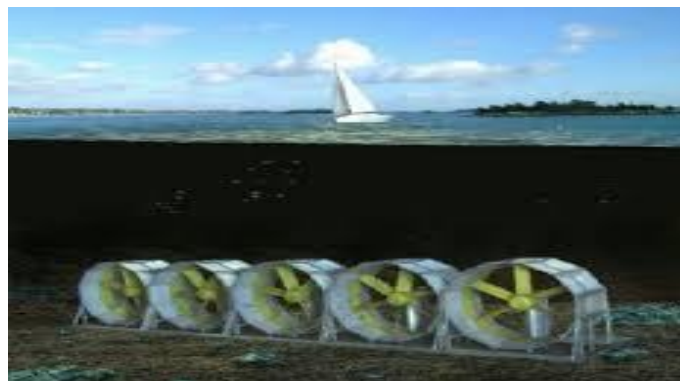


Figure II.18: Energie Hydrolienne

b) Marémotrice :

L'usine marémotrice de la Rance (France) est une centrale électrique tirant son énergie de la force de la marée.



Figure II.19: Energie marémotrice

c) Barrages hydrauliques :

Vingt pourcent des besoins en énergie totaux de la terre sont couverts par l'énergie hydraulique. Elle est produite dans le monde entier par environ 45.000 barrages.



Figure II.20: Barrages Hydraulique

II.4.3.1 Différents types de centrales

La taille des centrales électriques dépend essentiellement de la quantité d'électricité produite.

Tableau II.1 : Taille de centrales électriques

Type de centrale	Micro P	Mini	Petite	Grande
Puissance produite	< 100kW	100 kW < P < 2 MW	2 MW < P < 10 MW	> 10MW

On peut les classer aussi par type d'aménagement [19] :

a) Centrale au fil de l'eau :

Une centrale hydraulique au fil de l'eau produit de l'électricité renouvelable à partir du courant d'une rivière, ces centrales ne disposent pas de réservoir et fournissent une énergie de base produite, cette énergie est consommable localement et ne nécessite que peu de construction, elles sont implantées sur le cours de grands fleuves ou de grandes rivières. Elles sont caractérisées par un débit très fort et un dénivelé faible avec une chute de moins de 30 m. Dans ce cas, il n'y a pas de retenue d'eau et l'électricité est produite en temps réel.

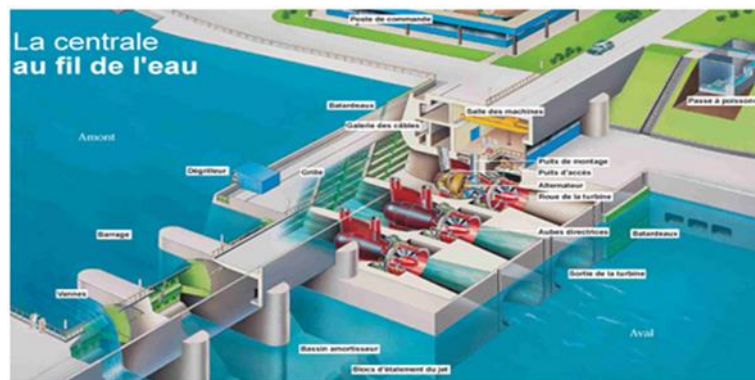


Figure II.21: Centrale de moyenne chute

La centrale comporte un barrage qui permet l'accumulation de l'eau qui donne naissance à un quasi réservoir, plus la différence entre l'eau retenue et l'eau libre est élevée plus la quantité d'énergie potentielle est grande, l'eau retenue passe par des tuyaux sous terrains pour se trouver de l'autre côté du barrage, une turbine de type Kaplan est intégrée dans la conduite, elle est équipée d'une roue comportant des hélices comme celles des bateaux, la roue contient des pales mobiles dont l'orientation permet de conserver un bon rendement pour diriger l'eau qui coule vers les aubes, une fois mise en mouvement la turbine entraîne un alternateur qui produit de l'électricité.

b) Centrales hydrauliques de haute chute ou centrales de lac :

La centrale hydraulique est dite de haute chute lorsqu'elle est située en altitude, elle est surtout présente dans les sites de haute montagne, elle est caractérisée par un débit faible et elle bénéficie généralement d'une dénivellée très importante entre le barrage qui retient l'eau et l'usine où est produite l'électricité avec une chute supérieure à 300m.

Le barrage s'oppose à l'écoulement naturel de l'eau pour former un lac de retenue, ce lac est alimenté par l'eau des torrents, la fonte des neiges et des glaciers, ainsi l'eau est

stockée et peut être dirigée à la demande vers la turbine par des canaux d'amenée, des galeries creusées dans la montagne ou par des conduites forcées.

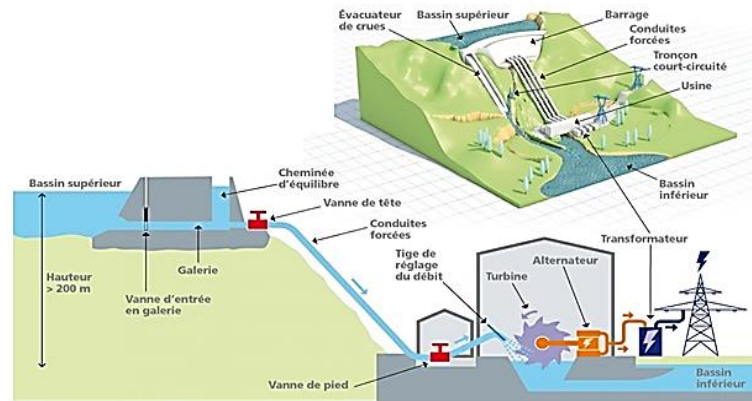


Figure II.22: Fonctionnement d'une centrale de haute chute

La centrale à haute chute est équipée d'une turbine de type Pelton qui entraîne dans sa rotation un alternateur qui produit de l'électricité puis dirigée vers le réseau de transport de l'électricité par l'intermédiaire d'un transformateur qui élève la tension du courant produit à 225kV ou 400 kV pour qu'il soit transporté tout en minimisant les pertes joules dans les lignes à très haute tension du réseau.

c) La STEP :

Les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP), sont un type de centrales hydroélectriques qui fonctionne en circuit fermé, son principe repose sur une double retenue d'eau. Les STEP possèdent deux bassins, un bassin supérieur et un bassin inférieur entre lesquels est placé un dispositif réversible (machine hydroélectrique réversible) pouvant aussi bien fonctionner comme pompe ou turbine pour la partie hydraulique et comme moteur ou alternateur pour la partie électrique.

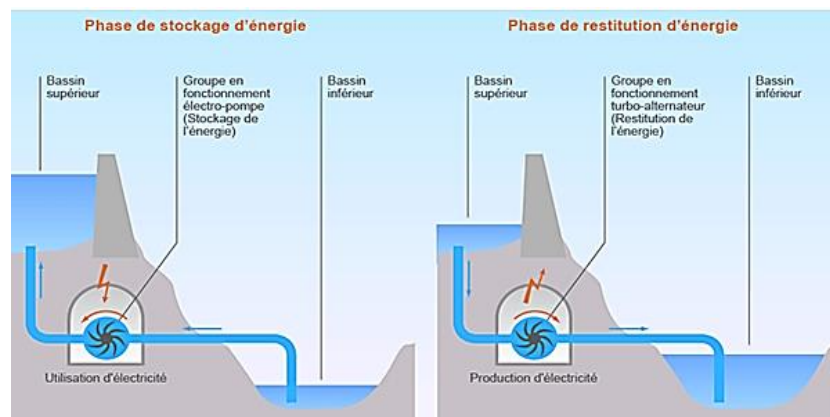


Figure II.23: Fonctionnement d'une STEP

L'eau du bassin supérieur est turbinée en période de forte demande pour produire de l'électricité. Puis, cette eau est pompée depuis le bassin inférieur vers le bassin supérieur dans les périodes où l'énergie est bon marché, et ainsi de suite.

Les STEP ne sont pas considérées comme productrices d'énergie de source renouvelable puisqu'elles consomment de l'électricité pour remonter l'eau turbinée. Ce sont des installations de stockage d'énergie. Elles interviennent fréquemment pour des interventions de courte durée à la demande du réseau et en dernier recours (après les autres centrales hydrauliques) pour les interventions plus longues, notamment en raison du coût de l'eau à remonter. L'opération se révèle rentable lorsque la différence de prix de l'électricité entre les périodes creuses et les périodes de pointe est importante.

Grâce à leurs fonctions de stockage, ces installations contribuent à maintenir l'équilibre entre la production et la consommation sur le réseau électrique, tout en limitant les coûts de production lors des pics de consommation. A l'heure actuelle, le transfert d'énergie par pompage hydraulique est la technique la plus mature de stockage stationnaire de l'énergie.

d) La centrale d'éclusée :

Une centrale hydraulique est dite de moyenne chute lorsque celle-ci atteint quelques dizaines de mètres, elle est surtout installée en moyenne montagne et dans les régions de bas-relief. Elle est caractérisée par un débit moyen et un dénivelé assez fort avec une chute comprise entre 30 et 300 m.



Figure II.24: Centrale hydroélectrique de moyenne chute

L'usine où est produite l'électricité est située au pied du barrage, elle est équipée d'une turbine de type « Francis », c'est la plus répandue, elle permet de s'adapter à la variation de la chute qui, avec le débit relativement important, conditionne la puissance de la centrale lorsque l'eau atteint la roue par le distributeur en spirale. Les aubes mobiles du

distributeur circulaire permettent en fonction du besoin de moduler son débit, dans sa rotation, la turbine entraîne l'alternateur qui produit de l'électricité.

Enfin l'énergie produite par cet alternateur est évacuée vers le réseau de transport d'électricité par l'intermédiaire d'un transformateur. Par ailleurs la retenue d'eau peut avoir de multiples autres usages tels que l'irrigation, la pêche, les loisirs, le tourisme,...etc.

II.4.3.2 Principe de fonctionnement des centrales hydrauliques

L'eau accumulée dans les barrages ou dérivées par les prises d'eau, constitue une énergie potentielle disponible pour entraîner en rotation la turbine d'une génératrice. L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie mécanique.

Cette turbine accouplée mécaniquement à un alternateur l'entraîne en rotation afin de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique et la puissance disponible résulte de la conjonction de la hauteur de la chute et du débit de la chute.

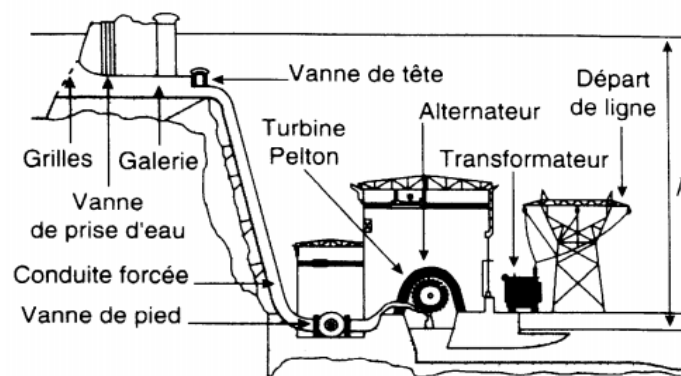


Figure II.25: Principe de fonctionnement des centrales hydrauliques

L'énergie potentielle est donnée par :

$$E_p = m \times g \times h \quad (\text{II.5})$$

Avec, E_p : énergie potentielle [J], m [kg] : masse de l'eau, g [m/s^2] : accélération de la pesanteur, h [m] : hauteur de la chute d'eau.

La puissance d'une chute d'eau est donc donnée :

$$P = \frac{E_p}{t} = \frac{m \times g \times h}{t} \quad (\text{II.6})$$

La puissance d'une chute d'eau est donnée en fonction de sa hauteur h et de son débit Q :

$$P = Q \times m_v \times g \times h \quad (\text{II.7})$$

Avec m_v : masse volumique de l'eau.

II.4.3.3 Turbine

Avec le barrage et l'alternateur, la turbine est sûrement parmi les parties les plus importantes de la centrale hydroélectrique ayant un rendement généralement entre 60 et 80%.

La turbine est une machine tournante constituée principalement d'une roue à aubes, qui reçoit l'énergie d'un fluide, sous forme d'énergie de pression ou d'énergie cinétique et qui la transforme en énergie mécanique directement utilisable sur un arbre en rotation.

Il existe plusieurs types de turbines dont le choix dépend de la hauteur de chute et du débit d'eau sélectionné pour l'installation d'une centrale, on distingue principalement :

a) Turbine PELTON :

Elle est utilisée généralement pour les centrales de hautes chutes, à faible débit. La turbine Pelton est une machine à action dont l'axe peut-être vertical ou horizontal. Celle-ci est composée d'une roue mobile garnie à sa périphérie d'augets en double cuillère et dont le distributeur est fait d'injecteurs avec un nombre qui peut varier de 1 à 6. La vitesse nominale de la turbine varie de 500 tr/min à 1500 tr/min, ce qui permet un couplage direct sans multiplicateur à la génératrice électrique.

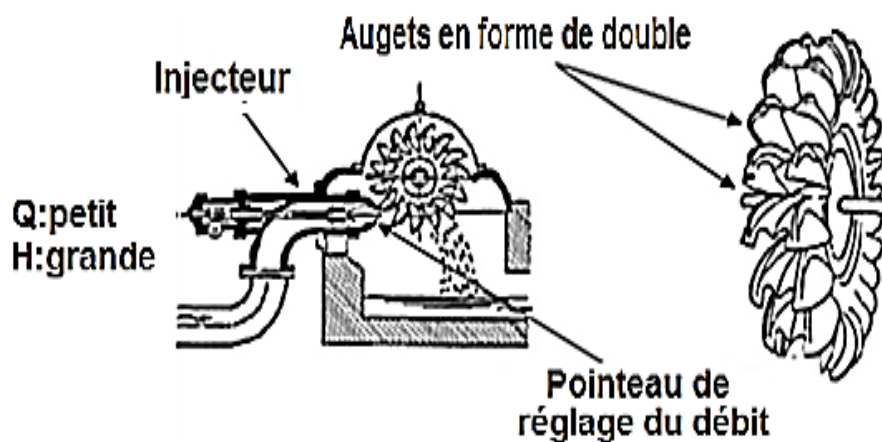


Figure II.26: Composants d'une turbine Pelton

b) Turbine FRANCIS :

La turbine Francis est utilisée pour des faibles variations de débit allant de 100 l/s à 6000 l/s. Elle s'adapte bien aux chutes moyennes de 10m à 100m. Elle a un bon rendement et une vitesse de rotation élevée atteignant 1000 tr/min.

La turbine Francis est une turbine à réaction de type radial à axe vertical et est adaptée pour des hauteurs et débits moyens. Son distributeur est enroulé autour de la turbine, l'entrée

de l'eau se fait par toute sa périphérie. La sortie de l'eau se fait de manière axiale dans le diffuseur qui fait office d'aspirateur.

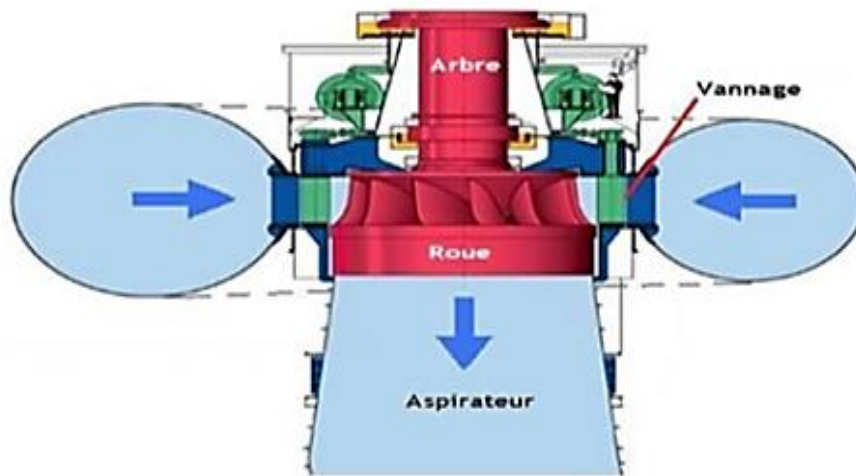


Figure II.27: Turbine Francis

c) Turbine KAPLAN :

Les turbines Kaplan ou turbines à hélices sont des turbines les mieux adaptées pour les faibles chutes (environ 2m) et des débits importants. Elles conviennent bien pour des débits variables avec un bon rendement de 84% à 90% maximum en dépit d'une vitesse de rotation faible. La roue de la turbine Kaplan est semblable à une hélice de bateau et les pâles sont orientables pour optimiser le coefficient de rendement de la turbine. La turbine Kaplan offre une analogie intéressante avec les turbines éoliennes sur l'aspect du réglage de l'orientation des pâles.

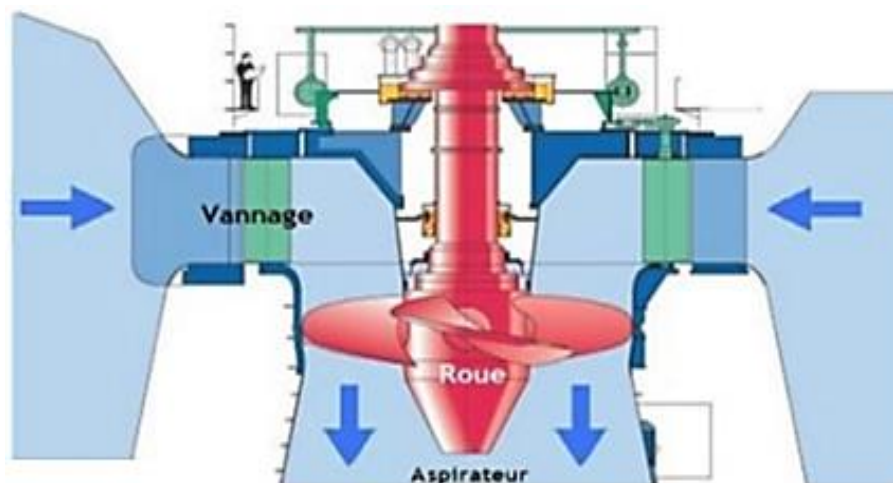


Figure II.28: Turbine Kaplan

II.4.4 Pile à combustible

En 1802, Sir Henry David énonce le principe de l'électrolyse inverse de l'eau et il met en évidence la possibilité de produire de l'électricité et de la chaleur à partir de la réaction chimique entre l'oxygène et l'hydrogène.

En 1839, la première pile à combustible a été inventée par Sir William Robert Grove, un avocat et professeur de droit à l'Institut Royal de Londres. Depuis, il est connu comme le Père de la pile à combustible [20].

II.4.4.1 Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

Une pile à combustible est un dispositif qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique.

Elle a besoin seulement à l'hydrogène et l'oxygène pour son fonctionnement, et ne rejette que de l'eau et de la chaleur, ce qui en fait un générateur complètement propre.

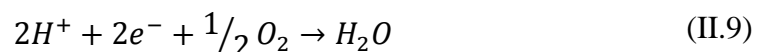
La partie centrale d'une pile à combustible est un électrolyte avec sur la première face une anode (électrode négative) et sur la deuxième face une cathode (électrode positive).

Le côté anode est alimenté avec l'hydrogène qui se décompose et libère des électrons selon la réaction d'oxydation de l'hydrogène [21] :



L'électrolyte séparant les deux électrodes laisse passer les protons H^+ vers la cathode, mais s'oppose au passage des électrons, qui vont rejoindre la cathode à travers un circuit extérieur, ce qui veut dire la création d'un courant électrique continu.

A l'arrivée des électrons à la cathode qui est alimenté avec l'oxygène, une réaction de réduction d'oxygène se déroulera [21] :



L'équation globale de la réaction qui se produit dans une pile à combustible est :



Des catalyseurs (platine, métal...) sont utilisés pour activer et accélérer les réactions chimiques sur les deux électrodes [21].

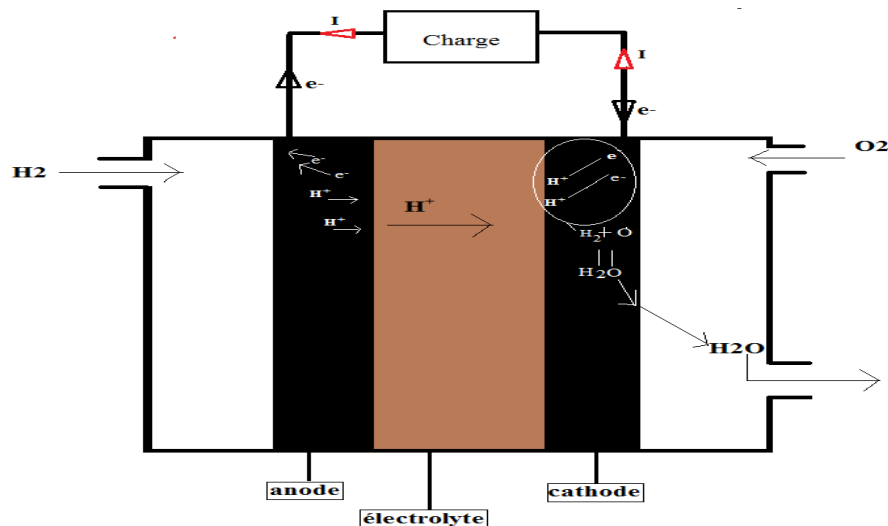


Figure II.29: Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

Les électrolytes peuvent être liquides ou solides, certains fonctionnent à haute température, d'autres à basse température, les piles à combustible fonctionnant à basse température tendent à exiger des catalyseurs en métal noble, typiquement du platine, destiné à améliorer les réactions aux électrodes. Lorsque la température augmente d'autres catalyseurs comme du nickel peuvent être utilisés [20].

II.4.4.2 Types de piles à combustible

Il existe actuellement cinq principaux types de piles à combustible. Ils se distinguent par la nature de l'électrolyte utilisé et par la température de fonctionnement [21] :

Tableau II.2 : Principaux type de pile à combustible

Type de pile	Electrolyte	Température de fonctionnement (°C)	Domaine d'utilisation
Alcaline (AFC)	Potasse (liquide)	80	Espace, transport 1-100kW
Membrane (PEMFC)	Polymère (solide)	80	Portable, transports, Stationnaires 1W-10MW
Acide phosphorique (PAFC)	Acide phosphorique (liquide)	200	Stationnaires, transports 200kW-10MW
Carbonates fondus (MCFC)	sels fondus (liquide)	650	Stationnaires 500kW-10MW
Oxydes solides (SOFC)	Céramique (solide)	850 à 1000	Stationnaires, transports 100kW-10MW

II.4.4.3 Modélisation des piles à combustible (PEMFC)

La pile à combustible est le siège de différentes pertes [22] :

- ✓ Les pertes liées au transport des différentes espèces dans les électrodes (amenée des réactifs H₂, O₂ ou évacuation des produits de la réaction H₂O).
- ✓ Les pertes d'activation liées aux cinétiques de réaction chimique dans l'anode et la cathode.
- ✓ Les pertes liées au transport de charges (pertes ohmiques) dans l'électrolyte (protons) et les électrodes (électrons).

Ces pertes sont définies comme des chutes de tension [22] :

$$V_{pile} = E - V_{activation} - V_{transport\ espèces} - V_{transport\ charges} \quad (II.11)$$

La plus simple représentation de la pile à combustible sous la forme d'un modèle électrique consiste à mettre une source de tension continue en série avec une impédance électrique [20]. Cette impédance électrique contient une capacité CCD de double couche qui caractérise l'accumulation des charges de signes opposés de chaque côté de l'interface électrode/ électrolyte [22], et une résistance R_T qui caractérise les phénomènes de transfert d'espèces aux électrodes. La résistance R_m représente l'électrolyte et les différentes résistances de contact [20].

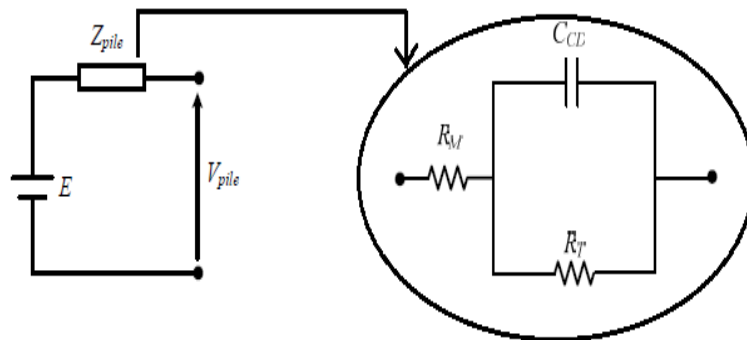


Figure II.30: Modèle électrique d'une pile à combustible [20]

II.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'apprendre que les systèmes hybrides sont des systèmes à énergie renouvelable (au moins une source d'énergie renouvelable), où nous avons vu leur architecture et les différentes sources d'énergie renouvelable les plus utilisées. À partir de cette étude théorique nous pouvons utiliser ces énergies renouvelables pour l'alimentation d'un site isolé (système hybride autonome).

CHAPITRE III

ETUDE ET DIMENSIONNEMENT

D'UNE STATION DE POMPAGE

III.1 Introduction

Dès que l'homme est apparu sur terre, il a œuvré sans cesse, pour assouvir ses ambitions et asservir son environnement pour mieux l'adapter à ses besoins quotidiens [23].

L'eau est une ressource qui représente un besoin vital et essentiel à toutes survivies sur terre, mais elle est malheureusement inégalement répartie. Bien des populations dans les zones éloignées des pays pauvres affrontent famines et épidémies causées principalement par un déficit en eau, raisons pour lesquelles des techniques d'acheminement de cette ressource de son site naturel, soit des rivières ou des puits de forages, aux points d'utilisation sont en perpétuel développement.

Au cours du temps, des divers mécanismes sont développés pour véhiculer l'eau, Seghia, Delou, Foggaras, Chadouf, Noria, Vis d'Archimède, aux pompes modernes, les Chinois, les Grecs et les Romains furent les pionniers dans l'utilisation des systèmes rotatifs pour véhiculer l'eau [23]. L'apparition de l'énergie électrique a permis le développement des pompes à principe rotatif, turbine et centrifuge, en vue d'obtenir de meilleurs rendements.

Ce problème d'énergie électrique est posé pour les sites isolés, car l'électricité n'est pas disponible pour l'alimentation des stations de pompage, ce problème peut être résolu par l'hybridation de différentes source d'énergie renouvelables disponibles pour la production de l'énergie électrique.

Ce présent chapitre est consacré pour l'étude d'une station de pompage, et dimensionnement de cette station pour son alimentation à l'aide d'un système hybride photovoltaïque/éolienne/ pile à combustible.

III.2 Station de pompage

Le pompage est une opération effectuée par des organes nommés Pompes, qui assurent le déplacement d'un fluide d'un point à un autre, lorsque la pesanteur n'assure pas cette tâche [23], c'est-à-dire, il assure le déplacement du fluide d'un point plus bas vers un point plus

haut. Pour déplacer ce liquide il faut lui communiquer de l'énergie, le moteur qui alimente les pompes transforme l'énergie thermique ou électrique en énergie mécanique pour permettre le mouvement des organes des pompes, cette énergie est transmise au fluide [24].

Une station de pompage simple est constituée généralement, d'une source d'eau d'où le fluide est aspiré, d'une pompe ou plusieurs, des tuyauteries d'aspiration et de refoulement, et d'une citerne de stockage d'eau pompé qui alimente la population en eau par gravité et une unité de contrôle et de supervision de la station.

Il existe de différentes stations de pompage classées en fonction de l'emplacement de la pompe :

III.2.1 Installation immergée

La pompe est généralement montée verticalement. Le corps de la pompe est immergé à un niveau inférieur à celui des plus basses eaux [24], les tuyauteries d'aspiration sont supprimées dans cette installation.

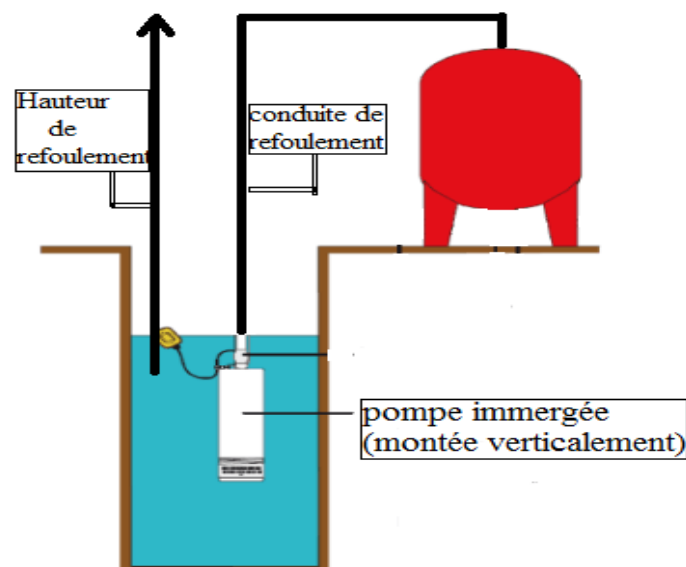


Figure III.1 : Installation de pompe immergée

III.2.2 Installation à l'abri des eaux

La pompe étant montée verticalement ou horizontalement dans un local spécial dit chambre des pompes, le puisage se fait, soit par une tuyauterie d'aspiration si la pompe est installée au-dessus du niveau d'eau, soit par une tuyauterie d'alimentation si la pompe travaille en charge (la pompe au-dessus du niveau d'eau) [24].

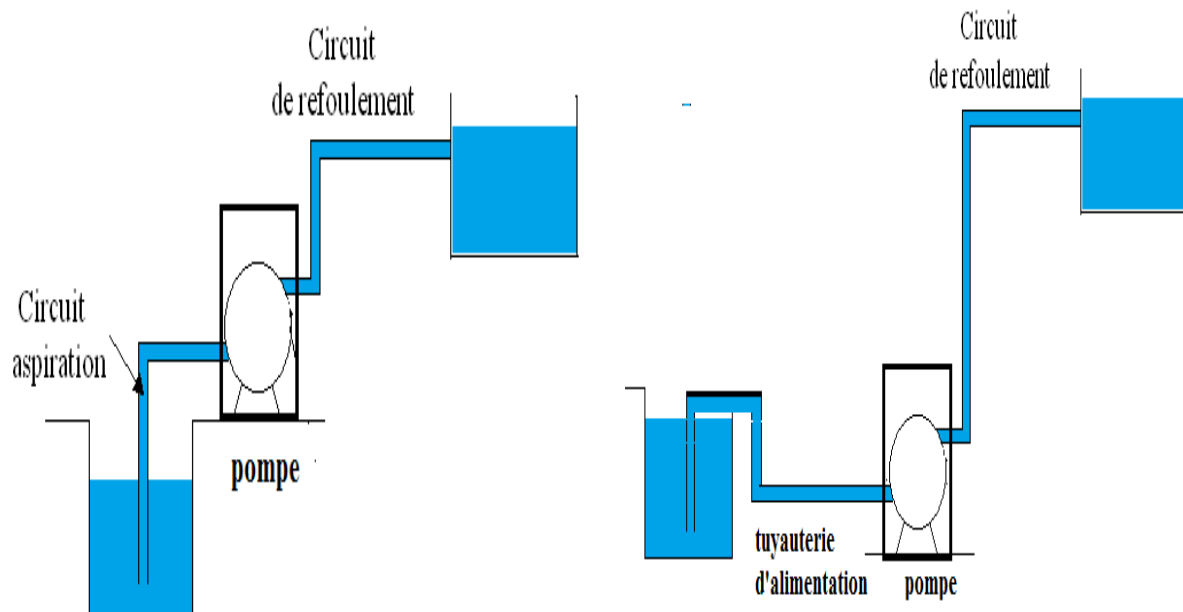


Figure III.2 : Installation de pompage à l'abri des eaux (pompe en aspiration et pompe en charge)

III.3 Types de pompes

Une pompe est une machine hydraulique qui aspire et refoule un liquide d'un point à un endroit voulu. Elle est destinée à élever l'énergie cinétique, potentielle et la pression du liquide pompé [24].

Il existe deux grands types de pompes :

III.3.1 Les pompes volumétriques

Elles agissent sur le volume du liquide (pression), le liquide est d'abord aspiré par l'accroissement d'un volume du liquide puis refoulée par la diminution de ce même volume. Ces pompes sont moins utilisées par rapport à l'autre type turbopompe, il existe les pompes volumétriques rotatives qui comportent un rotor (vis, lobes...) pour le transfert du liquide et les pompes alternatives qui comportent un piston [24].

III.3.2 Les turbopompes

Elles agissent sur l'énergie cinétique du liquide, elles sont actuellement parmi les plus employées des pompes, car ces appareils étant rotatifs et ne comportant aucune liaison articulée, leur entraînement par un moteur électrique ou à combustion interne, ne présente aucune difficulté.

Suivant le type de rotor et son mode d'action, on distingue les pompes centrifuges, les pompes hélices ou radiales et les pompes hélico-centrifuges ou semi-axiales.

Dans le domaine du pompage d'eau brute et d'eau potable, du traitement et évacuation des eaux usées ou du pompage des eaux pluviales, les pompes les plus, fréquemment, utilisées restent les pompes centrifuges car ces machines sont de construction simple, leur coût de maintenance est faible, elles ont un bon rendement, et sont adaptées à toute sorte de liquide. Elles sont constituées fondamentalement d'un distributeur qui assure l'aspiration du fluide, un rotor ou roue qui augmente la vitesse du fluide et un diffuseur qui assure le refoulement où la vitesse diminue et la pression augmente [24].

Les pompes centrifuges sont utilisées pour des hauteurs d'élévation relativement importantes et les pompes hélices pour les débits importants [24].

III.4 Hydraulique de pompage

Il existe de différentes notions sur le pompage qui nous permet le dimensionnement d'une station de pompage.

III.4.1 Débit (Q)

C'est la quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné. En pompage, le débit est, habituellement, donné en litres par heure [l/h]. En pompage solaire, le débit (ou le besoin en eau) est souvent exprimé en m³ par jour [m³/j].

III.4.2 Hauteur manométrique totale

Pour véhiculer un liquide d'un endroit à un autre, la pompe doit fournir une certaine pression appelée hauteur manométrique totale. C'est la différence de pression en mètres de colonne d'eau [mce] entre les orifices d'aspiration et de refoulement [25].

Lors d'un pompage, la pompe ne doit pas seulement fournir une pression équivalente à celle correspondant à la différence des niveaux entre l'aspiration et le refoulement, (hauteur géométrique totale), mais également la pression nécessaire pour vaincre les pertes de charge dans les conduites d'aspiration et de refoulement.

Cette hauteur peut être calculée comme suit [25] :

$$H_{mt} = (H_a + H_r) + J_c + P_r \quad (\text{III.1})$$

Avec, H_a : hauteur d'aspiration, H_r : hauteur de refoulement, J_c : pertes dans les conduites d'aspiration et de refoulement et P_r : pression résiduelle à la sortie du tube de refoulement.

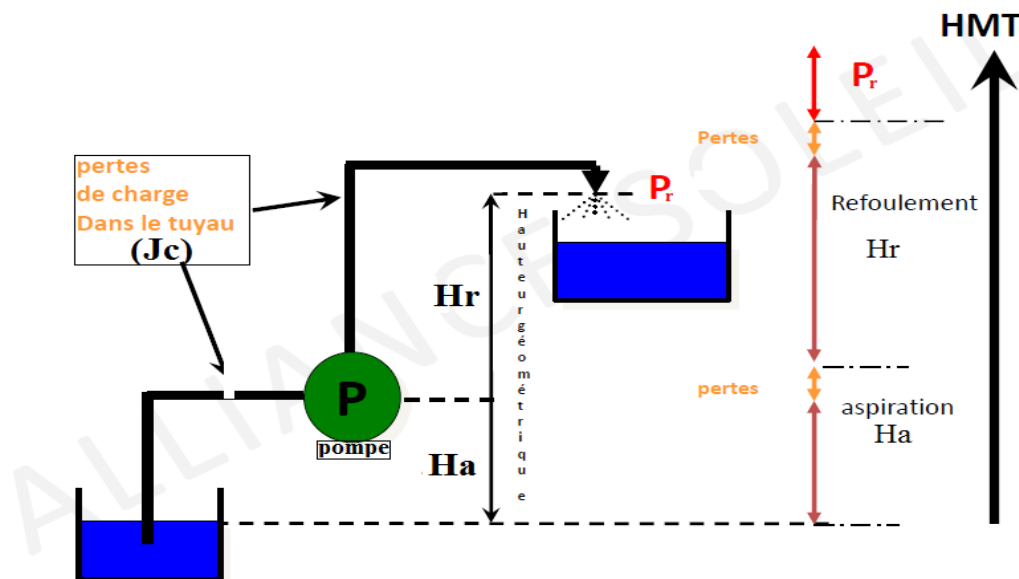


Figure III.3 : Schéma d'une station de pompage en aspiration [26]

A savoir que, plus la hauteur manométrique totale (HMT) est élevée, plus le débit fourni par la pompe est faible [23].

Pour une pression voulue dans le tube de refoulement P_r , on ajoute une hauteur correspondante à cette pression, donc cette énergie potentielle ajoutée va se convertir en énergie de pression à la sortie de la tuyauterie de refoulement.

III.4.3 Hauteur d'aspiration

La hauteur d'aspiration dans un réseau de pompage est la cote verticale mesurée entre la surface du réservoir d'aspiration et l'axe de la pompe.

La hauteur théorique d'aspiration d'une pompe est de 10.33 mètres à la pression atmosphérique au niveau de la mer avec une eau à 0°C de température. Cette hauteur ne peut être atteinte à cause des phénomènes de cavitation et des pertes dans les tuyauteries. En pratique, cette hauteur est située autour des sept mètres maximal à température ambiante. Dans le cas où cette hauteur est atteinte, il faudra placer une pompe intermédiaire, mettre le réservoir en pression, diminuer la température du fluide...etc. [25].

III.4.4 Hauteur de refoulement

C'est la distance verticale séparant le niveau dans le réservoir de refoulement de l'axe de la pompe. Lorsqu'on refoule dans un réservoir fermé, il y a lieu d'ajouter la hauteur correspondante à la pression maximale dans ce réservoir.

III.4.5 Pertes de charges

Il faut ajouter aux hauteurs d'aspiration et de refoulement la valeur des résistances que le liquide éprouve dans son déplacement et qu'il faut compenser, c'est-à-dire les pertes de charge [24].

Ces pertes de charge sont dues aux frottements du liquide contre les parois de la tuyauterie, aux changements de diamètres, aux accessoires tels que les vannes...etc.

Pour le calcul des pertes de charge, la formule de Cole brook est appliquée à tous les fluides, mais, son inconvénient majeur reste la complexité de son expression mathématique, c'est pourquoi quelques formules empiriques équivalentes sont encore en usage.

La formule de Darcy définit la perte de charge d'une canalisation [23] :

$$Jc = \frac{\lambda \cdot V^2}{2 \cdot g \cdot D} \quad (\text{III.2})$$

Avec, Jc : Perte de charge en mètres de hauteur du fluide circulant dans la conduite par mètre.
 λ : Coefficient de perte de charge, V : vitesse moyenne du fluide, g : pesanteur, D : diamètre intérieur de la conduite.

III.4.6 Hauteur totale de pompage

La hauteur totale de pompage est définie comme étant la somme de H_s , la hauteur statique ou la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au point le plus élevé auquel l'eau doit être pompée, et H_d l'ensemble des pertes linéaires qui sont les pertes de charge dans les canalisations, et des pertes singulières qui sont dues aux divers changements de section. [23, 25]

$$Ht = Hs + Hd \quad (\text{III.3})$$

Le niveau statique (N_s) est une notion utilisée dans les stations qui utilise comme source d'aspiration d'eau les puits et les forages, c'est la distance du sol à la surface de l'eau avant pompage. Le niveau dynamique (N_d) d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau pour un pompage à un débit donné [25, 26].

Par contre le rabattement (R) est la différence entre le niveau dynamique et le niveau statique (l'abaissement du niveau statique d'eau) et le rabattement maximal acceptable avant de stopper la pompe [25].

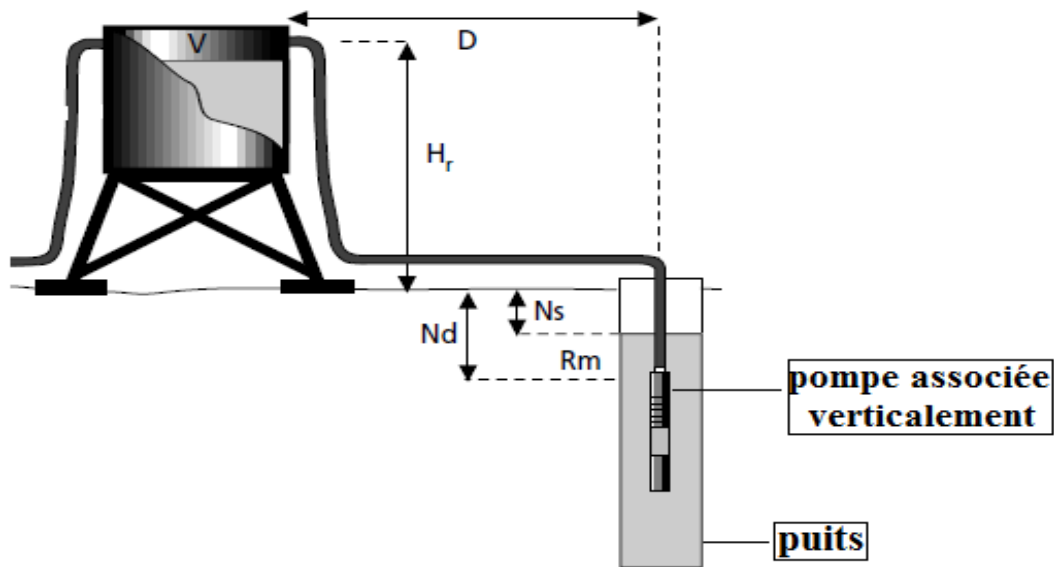


Figure III.4 : Données d'une station de pompage (source : puits ou forage).

III.5 Dimensionnement d'une installation de pompage autonome

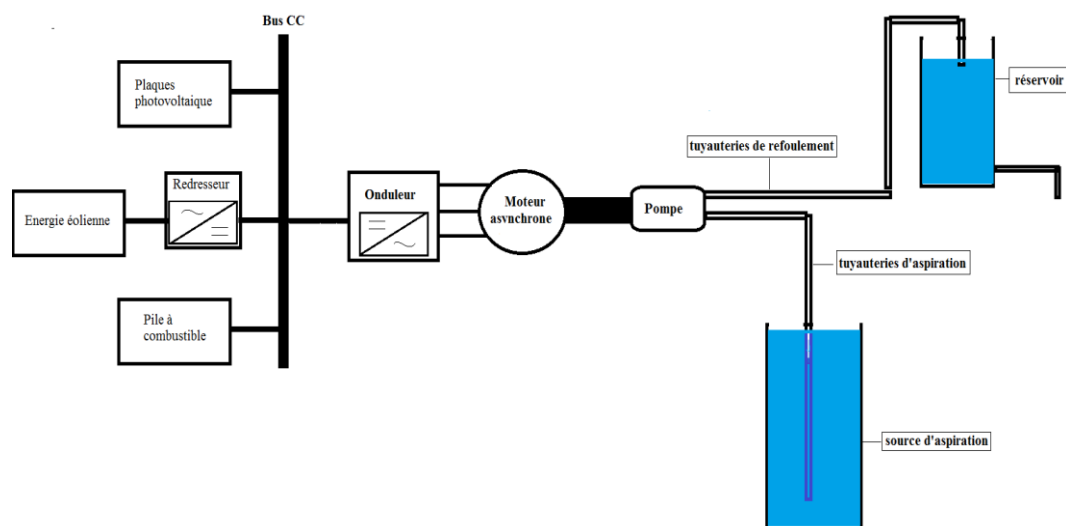


Figure III.5 : Station de pompage hybride photovoltaïque/éolienne/pile à combustible

Pour subvenir aux besoins en eau d'une base de vie implantée dans une zone désertique isolée, non connectée aux réseaux électriques, le recours à l'utilisation d'une station hybride de pompage semble être une évidence, en effet trois sources d'énergies

renouvelables sont utilisées, deux sources complémentaires, le photovoltaïque au fil du soleil et l'énergie éolienne à la disponibilité du vent (ensoleillement faible), associées à une pile à combustible qui joue le rôle de batterie dans le cas où l'ensoleillement et le vent sont faibles.

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont [27] :

- Evaluation des besoins en eau.
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.
- Détermination de différentes énergies disponibles, dimensionnement des plaques photovoltaïques/éoliennes/pile à combustible par rapport à la puissance hydraulique (l'énergie à fournir à la pompe).
- Choix des composants.

III.5.1 Besoins en eau

La détermination des besoins en eau pour la consommation d'une population donnée dépend essentiellement de son mode de vie, des facteurs météorologiques du site comme la température, l'humidité, la vitesse du vent, ... [27].

Les données du site à étudier sont comme suite : Avant de distribuer par gravité, l'eau est pompée dans un château d'eau d'une capacité $V = 75 \text{ m}^3$, similaire à un accumulateur, sous un débit nominal $Q_v = 15 \text{ m}^3/\text{h}$ et une hauteur manométrique totale $HMT = 31 \text{ m}$ [25].

III.5.2 Puissance hydraulique (puissance de la pompe)

La puissance hydraulique nécessaire pour déplacer l'eau d'un point à un autre, ou la puissance que fournira la pompe à l'eau pour le déplacer est :

$$P_H = \rho \times g \times HMT \times Q_v \quad (\text{III.4})$$

Avec, ρ : Masse volumique de l'eau (1000 Kg/m^3), g : Accélération de la pesanteur (9.81 m/s^2).

Pour la station étudiée, la puissance hydraulique est :

$$P_H = 1000 * 9.81 * 31 * \frac{15}{3600} \Rightarrow P_H = 1267 \text{ W}$$

Il faut que la pompe fournisse une puissance de 1267 W pour déplacer l'eau sur toute la hauteur désirée.

III.5.3 Diverses puissances

La puissance électrique délivrée à la pompe par les différentes sources d'énergie se transmet à travers un onduleur qui va la transmettre vers le moteur de la pompe qui la convertit en énergie mécanique et la transmet vers la pompe qui va fournir la puissance hydraulique pour le déplacement d'eau.

a) Puissance mécanique (P_{mec})

Elle est généralement, donnée par le constructeur de la pompe centrifuge [25].

$$P_{mec} = \frac{P_H}{\eta_{pompe}} \quad (III.5)$$

b) Puissance électrique (P_{elec})

C'est la puissance d'alimentation du moteur électrique qui va entrainer la pompe.

$$P_{elec} = \frac{P_{mec}}{\eta_{moteur}} = \frac{P_H}{\eta_{pompe} \cdot \eta_{moteur}} \quad (III.6)$$

c) Puissance électrique délivrée ($P_{délivrée}$)

C'est la puissance électrique réellement demandée, inclue la consommation des convertisseurs statique (onduleur) utilisés dans la chaîne d'énergie [25].

$$P_{délivrée} = \frac{P_{elec}}{\eta_{onduleur}} = \frac{P_H}{\eta_{pompe} \cdot \eta_{moteur} \cdot \eta_{onduleur}} \quad (III.7)$$

Pour les différents composants utilisée, le rendement de la pompe est $\eta_{pompe} = 55\%$, le rendement du moteur $\eta_{moteur} = 89\%$ et le rendement de l'onduleur est $\eta_{onduleur} = 97\%$ [25] :

La puissance délivrée pour la station est :

$$P_{délivrée} = \frac{1267}{0.55 * 0.89 * 0.97} \Rightarrow P_{délivrée} = 2668 \text{ W}$$

Le besoin de la charge en énergie électrique est évalué en tenant compte de la durée journalière de pompage tel que [25] :

$$E_c = P_{délivrée} \cdot T_{pompage} [kWh/j] \quad (III.8)$$

D'où la durée de pompage :

$$T_{pompage} = \frac{V}{Qv} = \frac{75}{15} = 5 \text{ heures}$$

Donc le besoin d'énergie en une journée est :

$$Ec = 2668 * 5 = 13340 \text{ Wh/j}$$

III.5.4 Dimensionnement de différentes sources d'énergie

III.5.4.1 Dimensionnement du générateur photovoltaïque

La puissance nécessaire du générateur photovoltaïque P_g pour une puissance délivrée sur le bus continu est :

$$P_g = \frac{P_{délivrée}}{1 - \sum \text{pertes}} \quad (\text{III.9})$$

Avec $\sum \text{Pertes}$: Somme des pertes de puissance attribuables à la température et à la poussière représentant environ 20% de la puissance délivrée par l'ensemble des modules [25].

Pour avoir la puissance du générateur photovoltaïque, le nombre de panneau à associé est :

$$N_p \geq \frac{P_g}{P_s} \quad (\text{III.10})$$

Avec P_s représentant la puissance normalisée sous les conditions standard de fonctionnement (1000W/m², 25°C), du panneau standard de type SIEMENS SM 110-24, ayant une puissance nominale normalisée de 110Wc [12, 25].

Tableau III.1 : Panneau photovoltaïque de type SIEMENS SM 110-24 [12]

<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>	<i>Paramètres</i>	<i>Valeurs</i>
Puissance maximale du PV P_{MAX}	110 W	Courant de court-circuit	3.45 A
Courant au point de puissance maximal I_{MAX}	3.15 A	Tension en circuit ouvert	43.5 V
Tension au point de puissance maximal V_{MAX}	35 V	Coefficient d'incrémentation du courant	1.4 mA/°C

La détermination de nombre de panneau associée en série (N_s) et le nombre de branche (N_p) est en fonction de la tension voulue sur le bus continu (V_{dc}) pour l'alimentation de la charge (moteur de la pompe).

$$\left\| \begin{array}{l} N_s \geq \frac{V_{dc}}{V_{max}} \\ N_p \geq \frac{P_g}{V_{dc} \times I_{max}} \end{array} \right. \quad (III.11)$$

Pour la station de pompage :

La puissance du générateur photovoltaïque :

$$P_g = 2668 / (1 - 0.2) = 3335 \text{ W.}$$

Le nombre de panneau SIEMENS SM 110-24 pour avoir cette puissance :

$$N_p \geq \frac{3335}{110} = 30.31 \text{ panneaux}$$

Donc on a besoin de 31 panneaux de type SIEMENS SM 110-24.

Dans notre application, il faut assurer une tension du bus continu de $V_{dc} = 280 \text{ V}$ pour alimenter les enroulements du moteur de la pompe. Donc le nombre de panneau en série et les branches est :

$$N_s \geq \frac{280}{35} = 8 \text{ panneaux en séries}$$

$$N_p \geq \frac{\frac{3335}{280}}{3.15} = 4 \text{ branches en parallèles.}$$

Notre générateur photovoltaïque est constitué de quatre branches, où chaque branche doit avoir 8 panneaux en séries.

Donc on va utiliser 32 panneaux au lieu de 31 pour pouvoir les associés en branche et avoir la tension voulu sur le bus continu et une puissance égale ou supérieur à la puissance du générateur dimensionné.

$$\text{Donc : } P_{pv} = V_{max} \cdot N_s \cdot I_{max} \cdot N_p = 35 * 8 * 3.15 * 4 = 3528 \text{ W} > P_g$$

III.5.4.2 Dimensionnement de la pile à combustible

Pour une PAC, la tension est dépendante des cellules qui doivent être assemblées en série, tout en sachant que chaque cellule fournit entre 0 et 1.1Volts. Par contre le courant est dépendant de la surface totale d'une cellule [25].

Pour un rendement de 60 %, la tension de travail est de 0.66V/cellule et la densité de courant est de 1300 mA/cm² [25].

Pour la station de pompage le calcul est comme suite :

Le nombre de cellules associés en série :

$$N_{cel_série} = \frac{V_{dc}}{0.66} = \frac{280}{0.66} = 425 \text{ cellules.}$$

Et puisque

$$P_{délivrée} = V_{dc} * I$$

$$\text{Donc } I = \frac{P_{délivrée}}{V_{dc}} = \frac{2668}{280} = 9.528 \text{ A.}$$

La surface des cellules est :

$$S_{cel} = \frac{I}{1.3} = \frac{9.528}{1.3} = 7.329 \text{ cm}^2$$

Donc on a besoin de 425 cellules pour avoir une tension de 280V, et une surface de 7.329 cm² pour avoir la puissance espérée 2668W.

III.5.4.3 Dimensionnement d'une éolienne

La puissance éolienne instantanée disponible dans une surface d'éolienne S_E perpendiculaire à un flux de vent se déplaçant à une vitesse v (m/s) ayant une densité de l'air ρ_v (1.21kg/m³) est exprimée comme suit [9, 12] :

$$P_v = \frac{1}{2} \times \rho_v \times S_E \times V^3 \quad (\text{III.12})$$

La puissance récupérable par l'éolienne P_m est [9, 12] :

$$P_m = C_p \cdot P_v \quad (\text{III.13})$$

Où C_p : est le coefficient de puissance.

La puissance récupérable P_m est transmise à la mécanique du système de transmission mécanique (multiplicateur, etc.), dont la sortie, est transmise à son tour à l'entrée du générateur électrique, la sortie du générateur est alors donnée par [9] :

$$P_e = \eta_m \cdot \eta_g \cdot P_m \quad (\text{III.14})$$

Donc la puissance électrique délivrée en fonction de la puissance du vent est :

$$P_e = C_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \cdot P_v \quad (\text{III.15})$$

Donc, on peut trouver la surface de l'éolienne utilisée pour avoir une puissance électrique délivrée comme suit :

$$S_E = \frac{2 \times P_e}{C_p \times \eta_m \times \eta_g \times \rho_v \times V^3} \quad (\text{III.16})$$

La vitesse moyenne du vent du site étudié est d'environ $V = 15$ m/s et le rendement de la génératrice $\eta_g = 0.98$, le rendement mécanique $\eta_m = 0.96$ et le coefficient de puissance $C_p = 0.3$.

Pour la puissance délivrée au bus continu $P_{\text{délivrée}} = 2668\text{W}$, la surface de l'éolienne est :

$$S_E = \frac{2 * 2668}{0.3 * 0.96 * 0.98 * 1.21 * 15^3} = 4.63 \text{ m}^2$$

III.6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis le dimensionnement d'une station de pompage dans un site isolé des réseaux électriques, où nous avons dimensionnés, pour la production de l'électricité, un système hybride d'énergie renouvelable photovoltaïque/éolienne/pile à combustible pour l'alimentation de la station de pompage.

CHAPITRE IV

AUTOMATISATION ET SUPERVISION

DU SYSTÈME DE GESTION

IV.1 Introduction

Avec le développement de l'informatique et de l'électronique, le contrôle des systèmes de production par un opérateur appartient maintenant au passé. Des systèmes d'automatisation, tels que les automates programmables, permettent le contrôle et le traitement des données, et les interfaces homme-machine pour l'affichage des données. Ils sont préalablement programmés et configurés à l'aide des logiciels adéquats.

Ce dernier chapitre est consacré à l'automatisation et la supervision de la station de pompage hybride avec l'automate siemens S7-300 en utilisant logiciel STEP7 pour la programmation et SIMATIC WINCC flexible pour la supervision.

IV.2 Présentation de l'automate S7-300

L'automate S7-300 est un automate modulaire comprenant [28, 29] :

- Un module d'alimentation (Power Supply) qui délivre sous une tension de 24V, un courant de sortie de 2A, 5A et 10A.
- Une CPU qui fonctionne en 5 V communique avec les autres partenaires d'un réseau MPI via l'interface MPI.
- Des modules d'entrées/sorties digitales et analogiques.
- Des modules de fonction spéciale comme la régulation, le comptage, la commande numérique, ... etc.
- Un module de communication pour soulager la CPU des tâches de communication.
- Coupleur (IM) qui relie, entre elles, les différentes rangées d'un S7-300.

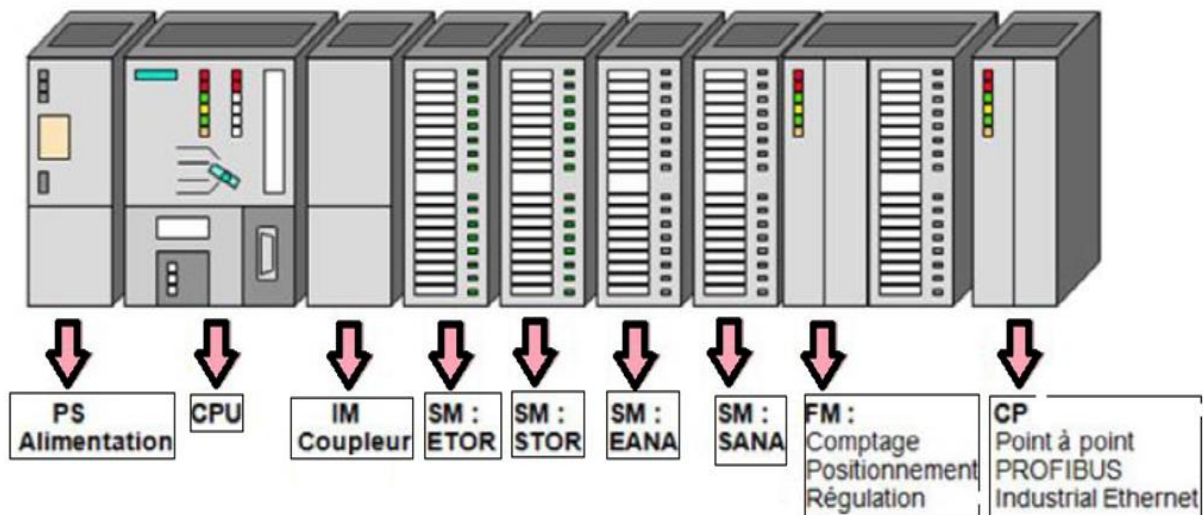


Figure IV.1 : Modules de l'automate S7-300

L'automate S7-300 est programmé avec logiciel STEP7, en choisissant un langage de programmation (contact, logigramme, List...). Le programme est chargé sur la console de programmation ou via un PC vers la CPU de l'automate à travers l'interface de communication MPI.

La supervision se fait à travers un pupitre ou un PC, où la création de la vue graphique se fait en utilisant logiciel SIMATIC WINCC flexible.

La communication des données entre l'automate et l'interface de supervision se fait à travers un protocole de communication (Profibus, Industrial Ethernet...).

IV.3 Gestion de la station de pompage

L'alimentation de la station de pompage hybride est effectuée avec deux sources complémentaires, panneaux photovoltaïques et l'éolienne, la pile à combustible prend le relai juste lorsque ces deux sources d'énergie ne puissent pas fournir la puissance demandée par la charge.

L'une des deux sources (photovoltaïque ou éolienne) prend le relai d'alimentation quand sa puissance est maximale (l'autre sera minimal), sinon l'alimentation se fera par les deux sources si leur somme fournie la puissance demandée.

Si les deux sources n'arrivent pas à fournir la puissance demandée, la pile à combustible prend le relai d'alimentation pour fournir la puissance demandée, sinon, les trois sources combinées, alimentent la station de pompage.

Quand le niveau du château d'eau atteint son maximum, le processus de remplissage s'arrête et il reprend au moment où le niveau minimum du château d'eau est atteint.

Pour un bon rendement et une longue durée de vie des générateurs, on procède à un refroidissement, en maintenant la température des panneaux photovoltaïques à 10°C et 80°C pour la pile à combustible [10, 21].

Les grafquets qui traduisent le fonctionnement du système sont présentés par :

a) Le grafquet de remplissage du château d'eau

Ils existent deux niveaux critiques pour le remplissage du château d'eau. "Nmin" pour commencer le pompage de l'eau vers le château d'eau et un niveau "Nmax" qui commande l'arrêt de la pompe.

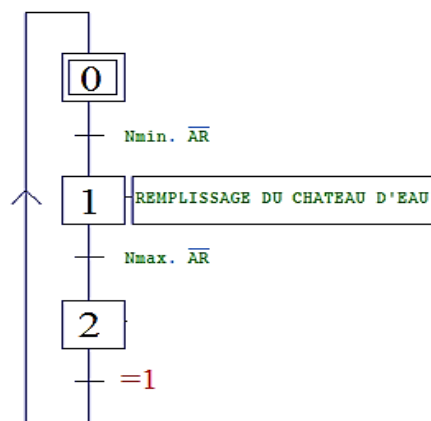


Figure IV.2 : Grafquet de remplissage du château d'eau

b) Grafquet des refroidissements

Les grafquets de refroidissement des panneaux photovoltaïques et de la pile à combustible sont tels que :

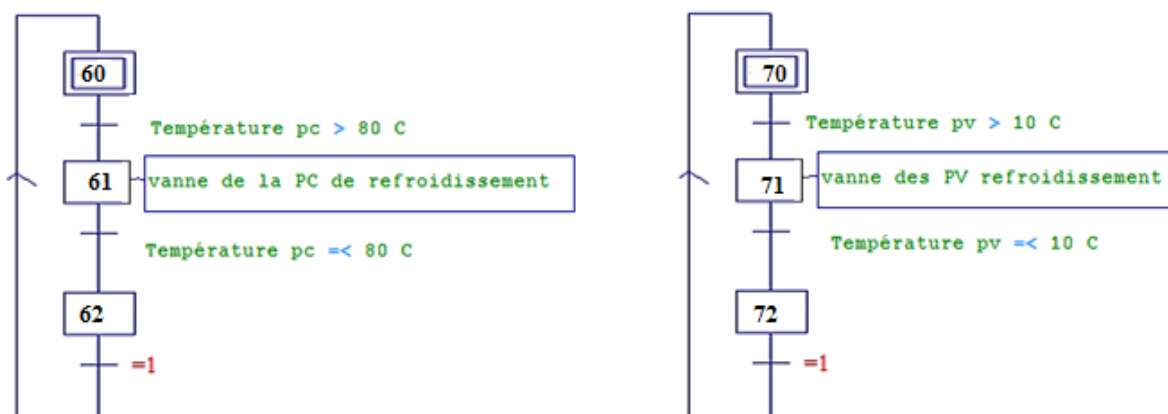


Figure IV.3 : Grafquets des refroidissement

c) Grafcet de gestion des sources

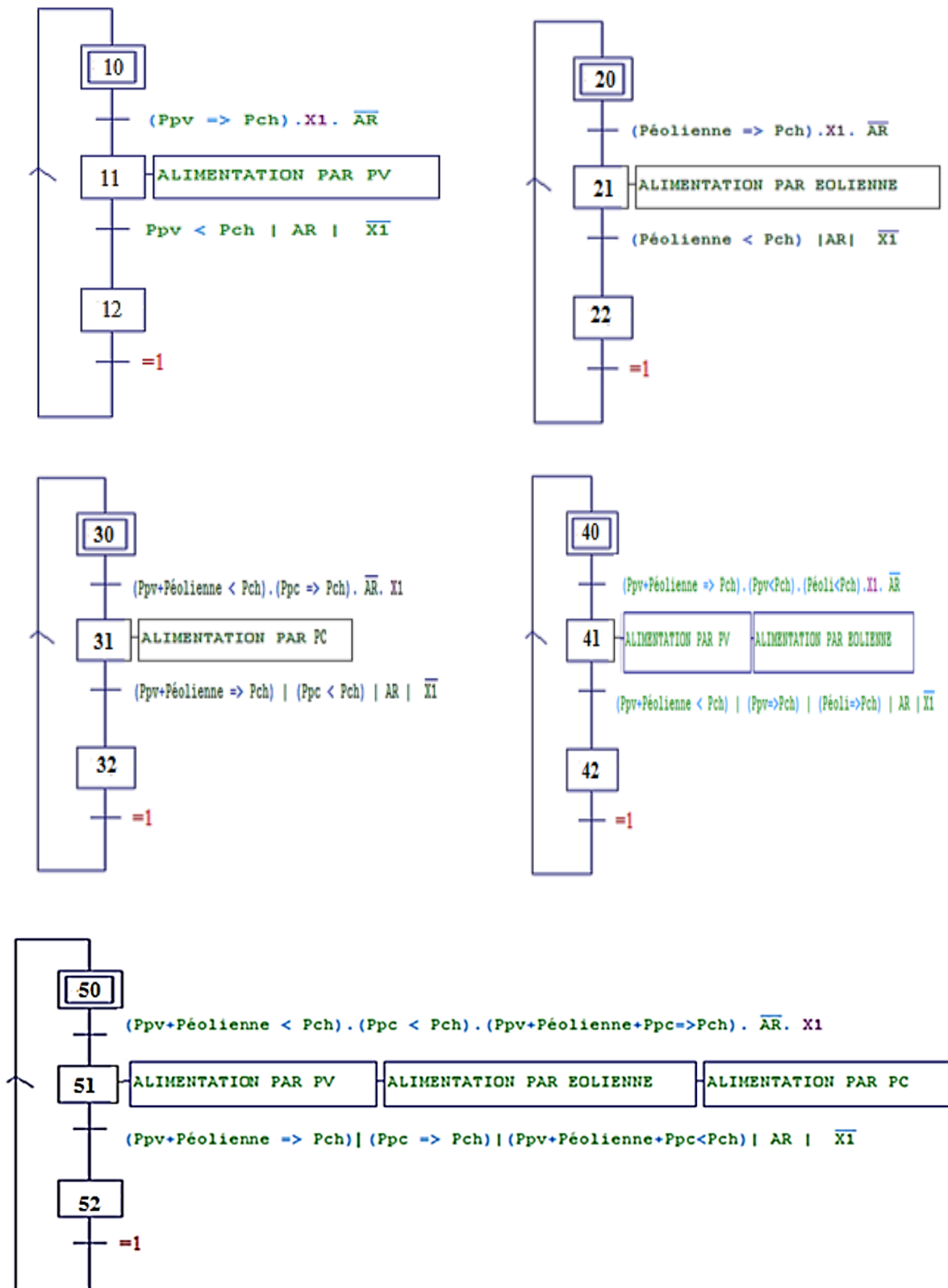


Figure IV.4 : Grafcet de gestion des sources

Tableau IV.1 : Table des variables d'entrées

Variables d'entrées	Organe de mesure	Broche de l'automate
Tension et courant des panneaux photovoltaïques	Un transformateur abaisseur, Une résistance (pour mesurer le courant)...	Entrées analogiques Tension : PEW272 Courant : PEW275
Vitesse du vent	Capteur de vitesse	Entrée analogique PEW277
Tension et courant de la pile à combustible	Un transformateur abaisseur, Une résistance (pour mesurer le courant)...	Entrées analogiques Tension : PEW279 Courant : PEW281
Température des panneaux photovoltaïques	Capteur de température	Entrée analogique PEW283
Température de la pile à combustible	Capteur de température	Entrée analogique PEW285
Niveau du château d'eau	Capteur de niveau	Entrée analogique PEW287

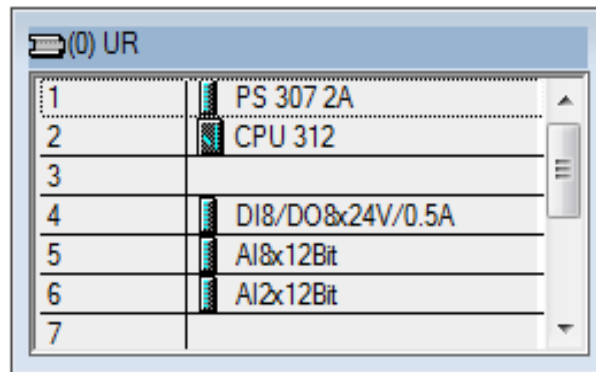
Tableau IV.2 : Table des variables de sorties

Variables de sorties	Pré-actionneur	Broche de l'automate
Alimentation par panneaux photovoltaïques	Contacteur	Sortie digitale : A0.0
Alimentation par éolienne	Contacteur	Sortie digitale : A0.1
Alimentation par pile à combustible	Contacteur	Sortie digitale : A0.2
Refroidissement des panneaux photovoltaïques	Electrovanne	Sortie digitale : A0.3
Refroidissement de la pile à combustible	Electrovanne	Sortie digitale : A0.4

Les puissances des différentes sources sont calculées à l'aide de ces variables et sont stockées dans la mémoire donnée de l'automate.

IV.4 Programmation avec logiciel STEP7

Premièrement, avant de débiter la programmation, on doit configurer les modules utilisés, dans notre cas on utilise les modules suivants :



Pour la programmation, on utilise le langage à contact, chaque fonction est organisée dans un bloc fonctionnel FB, avant de l'insérer dans le bloc d'organisation OB1 qui fait le traitement cyclique des blocs de fonction.

Pour le FB1, le programme suivant permet de mesurer et de calculer la puissance délivrée par les panneaux photovoltaïques.

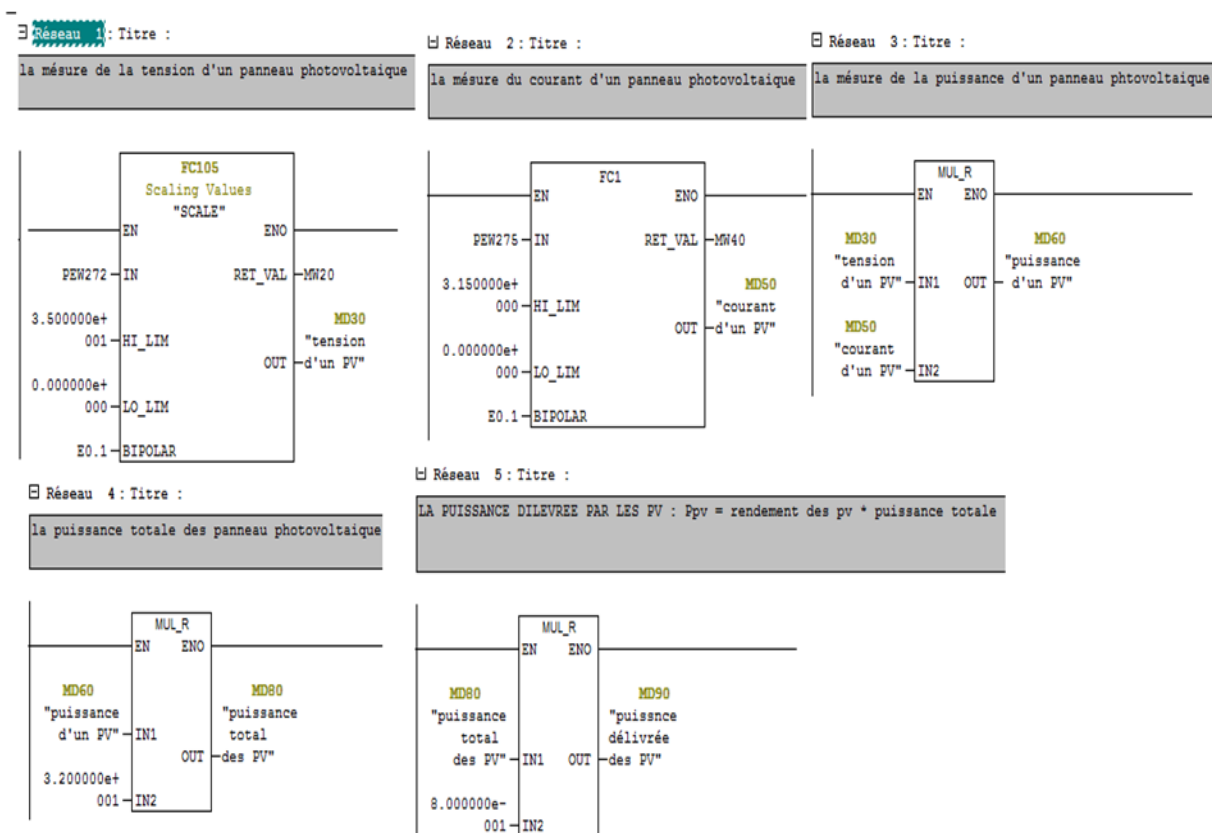


Figure IV .5 : Programme de mesure et de calcul de la puissance délivrée par les GPV.

Le FB2 contient la mesure de la vitesse du vent et le calcul de la puissance de l'éolienne.

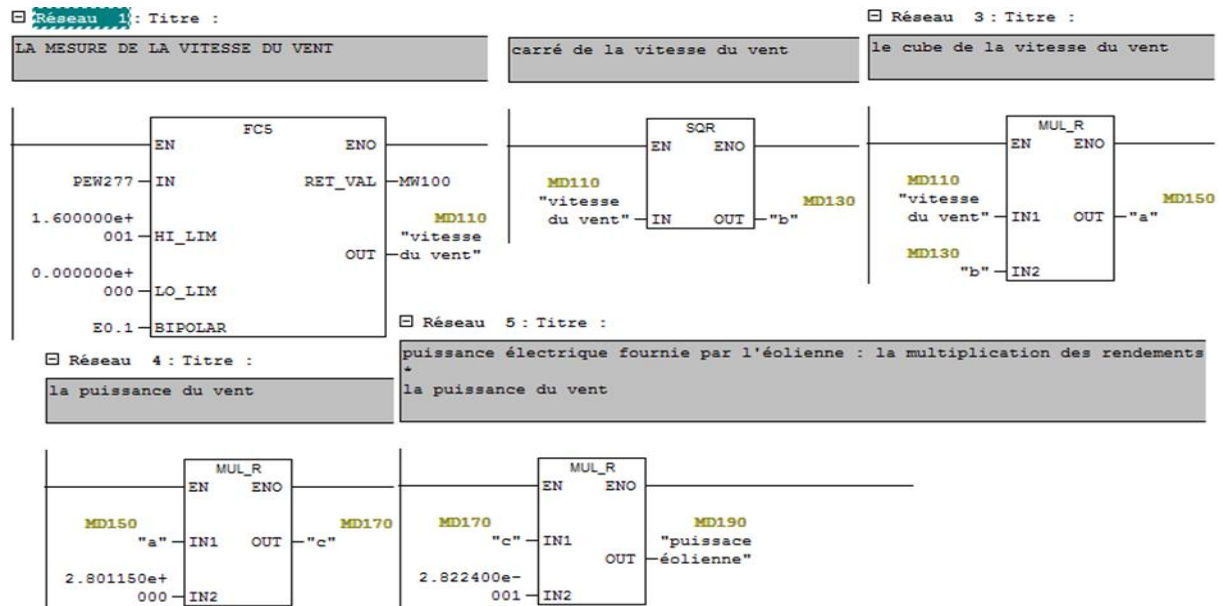


Figure IV.6 : Programme de mesure de la vitesse du vent et de calcul de la puissance de l'éolienne

Le FB3 contient les mesures de la tension, le courant et la puissance de la pile à combustible.

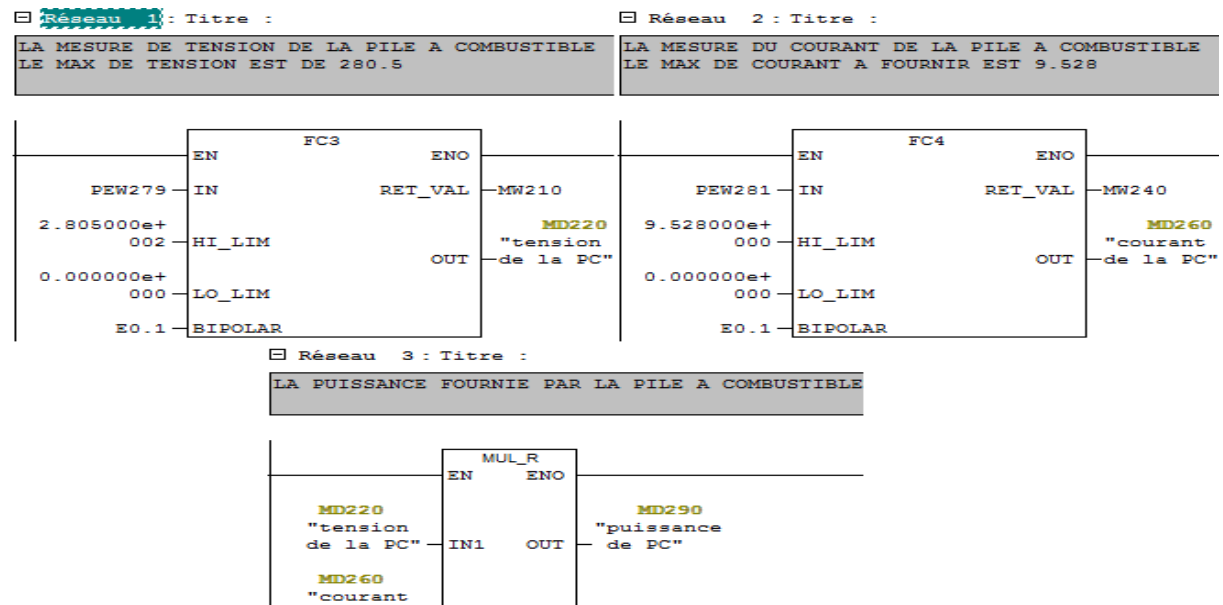


Figure IV.7 : Programme de mesures de la tension, du courant et de la puissance de la pile à combustible.

Pour le FB4 contient les mesures de température et le codage du grafcet de refroidissement.

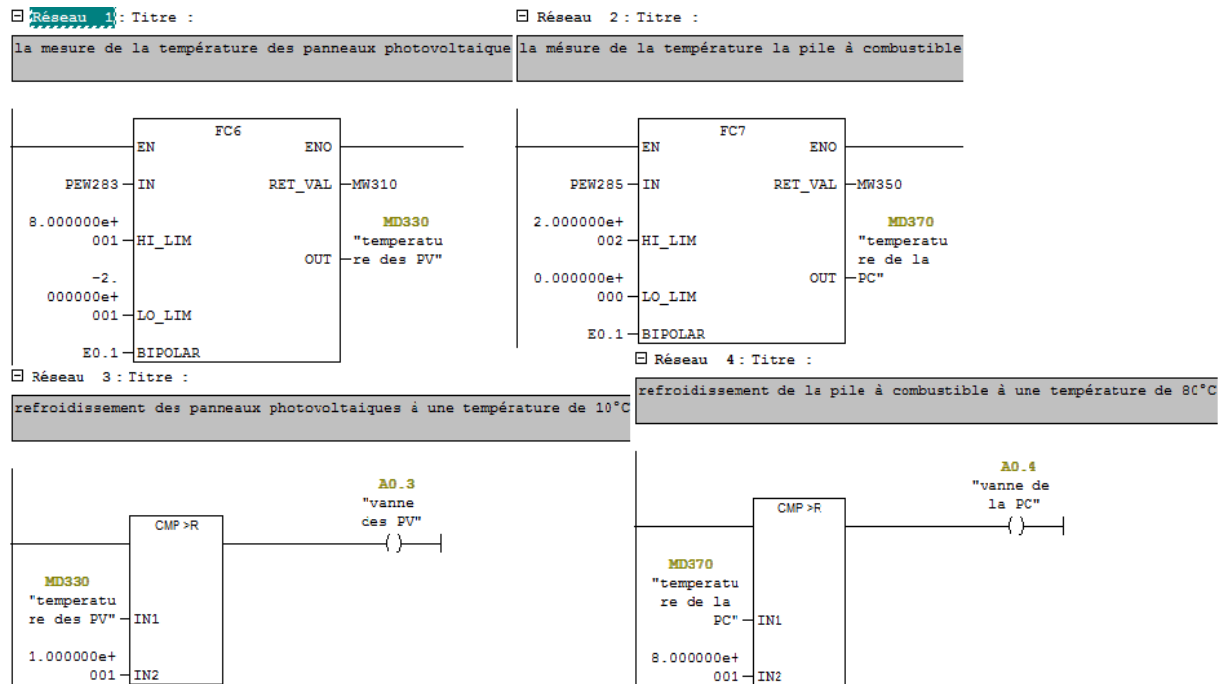


Figure IV.8 : Programme de mesure de température et du codage du grafcet de refroidissement.

FB5 contient le programme qui gère les niveaux d'eau du château.

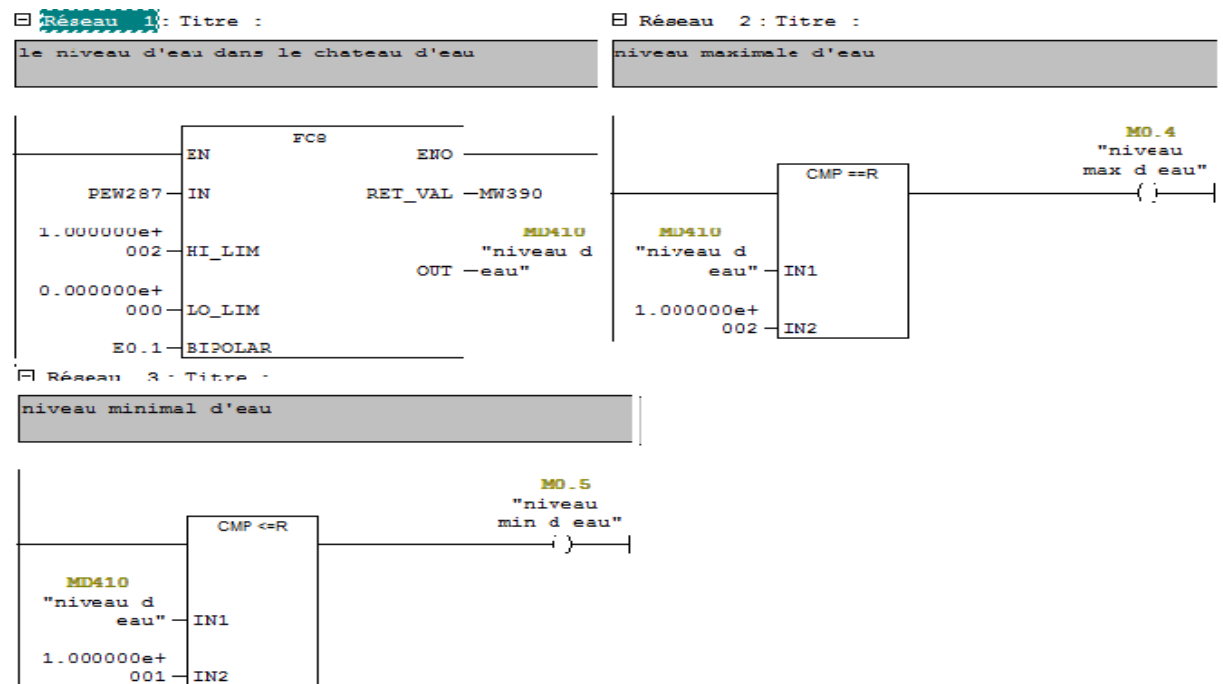


Figure IV.9 : Programme de remplissage du château d'eau

FB6 contient le codage du grafcet de remplissage du château d'eau

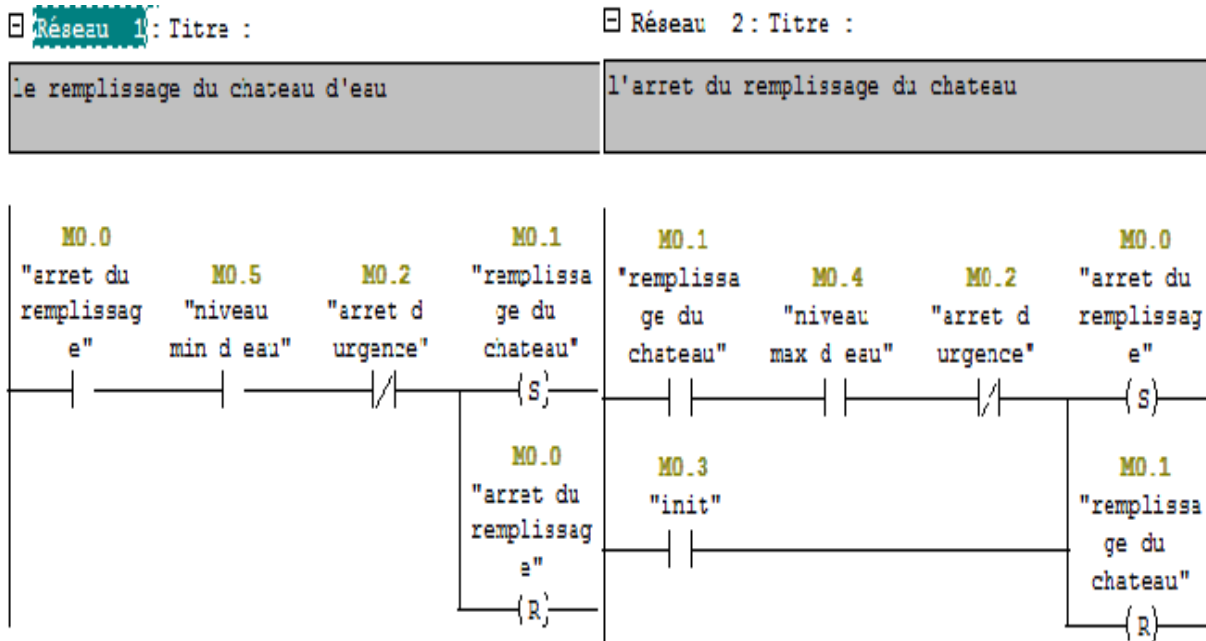


Figure IV.10 : Programme du codage du grafcet de remplissage du château d'eau

FB7 contient le fonctionnement et le codage des grafkets de gestion des sources pour l'alimentation de la pompe et l'affectation des résultats aux sorties digitales de l'automate.

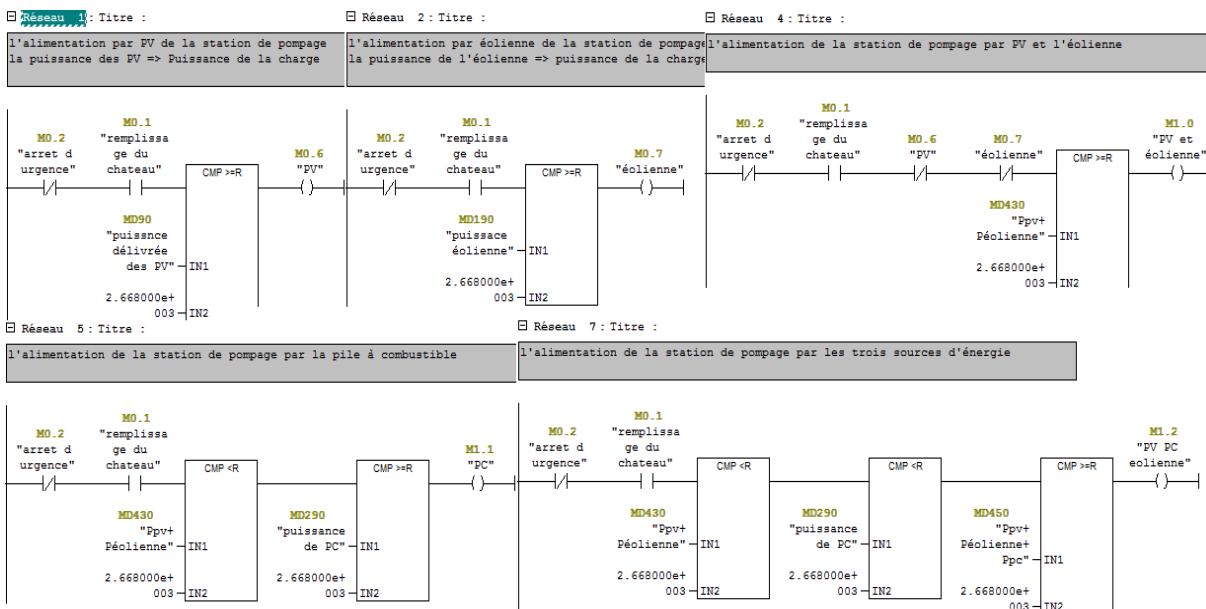


Figure IV.11 : Programme des grafkets de gestion des sources pour l'alimentation de la pompe

Les programmes de l'alimentation de pompage par les panneaux photovoltaïques et l'éolienne sont comme suit :

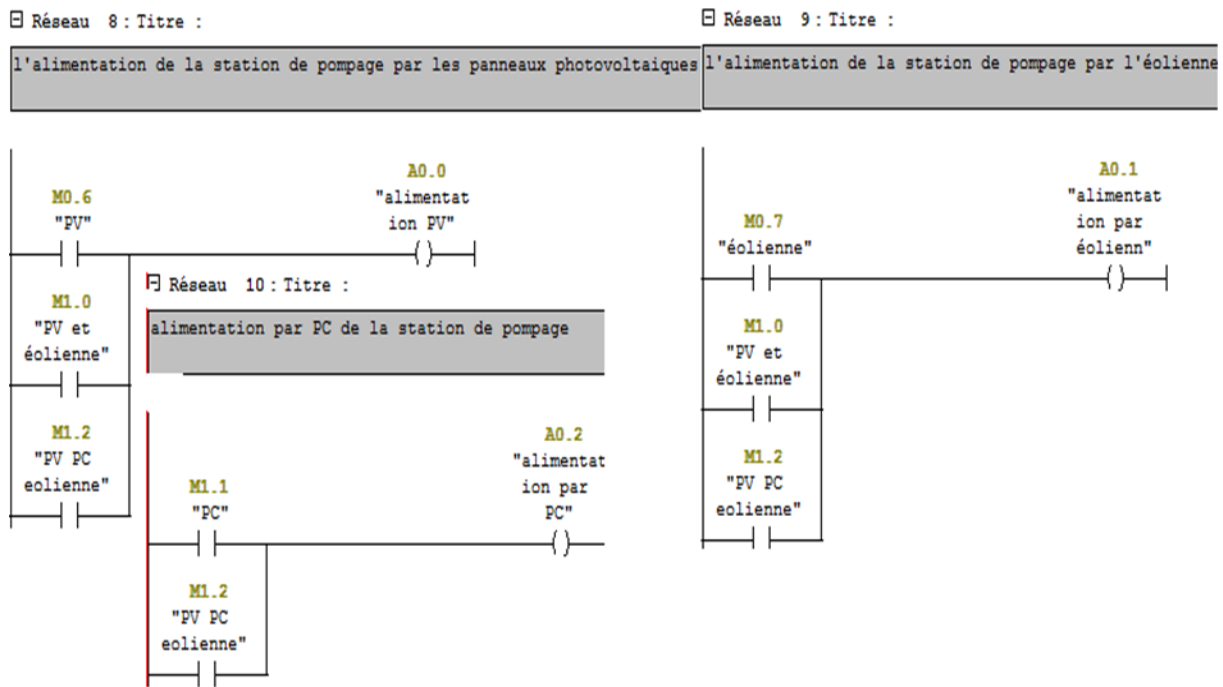


Figure IV .12 : Programme l'alimentation de pompage PV & PAC

VI.5 Supervision avec logiciel SIMATIC WINCC flexible

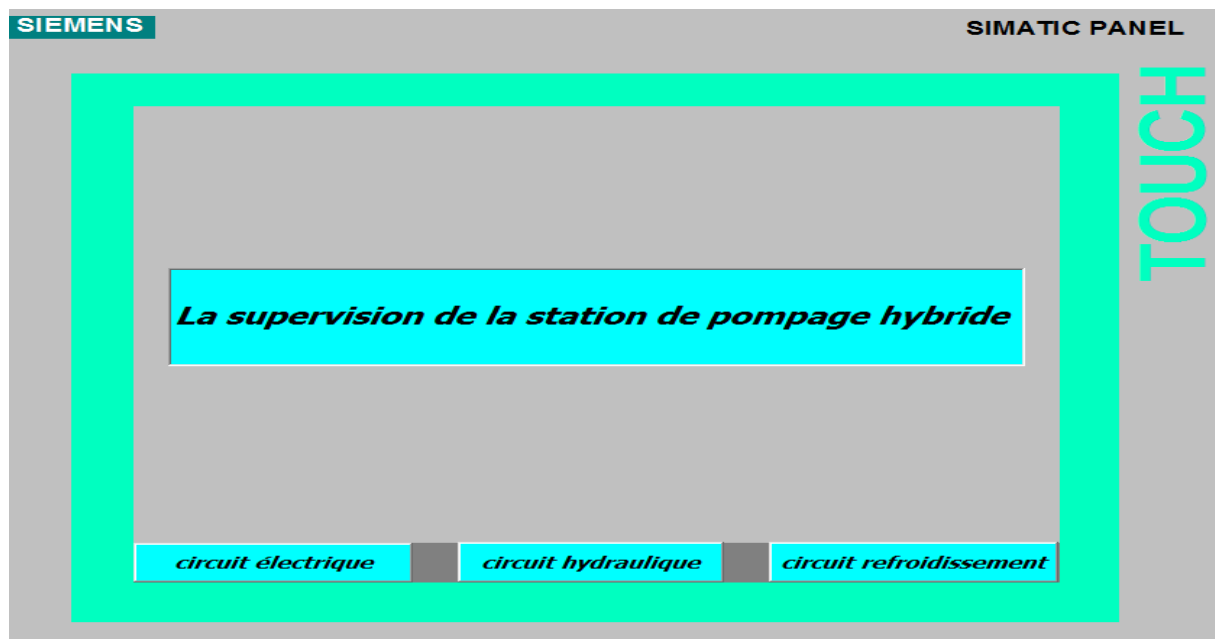


Figure IV .13 : Vue principale

Pour la supervision, On va créer des vues graphiques de supervision du système, et intégrer ce projet WINCC dans le projet STEP7, après on va affecter les variables de ce projet STEP7 aux vues créées. La figure IV.13 représente la vue principale du projet.

Il y a trois boutons qui mènent vers le circuit qu'on veut visualiser.

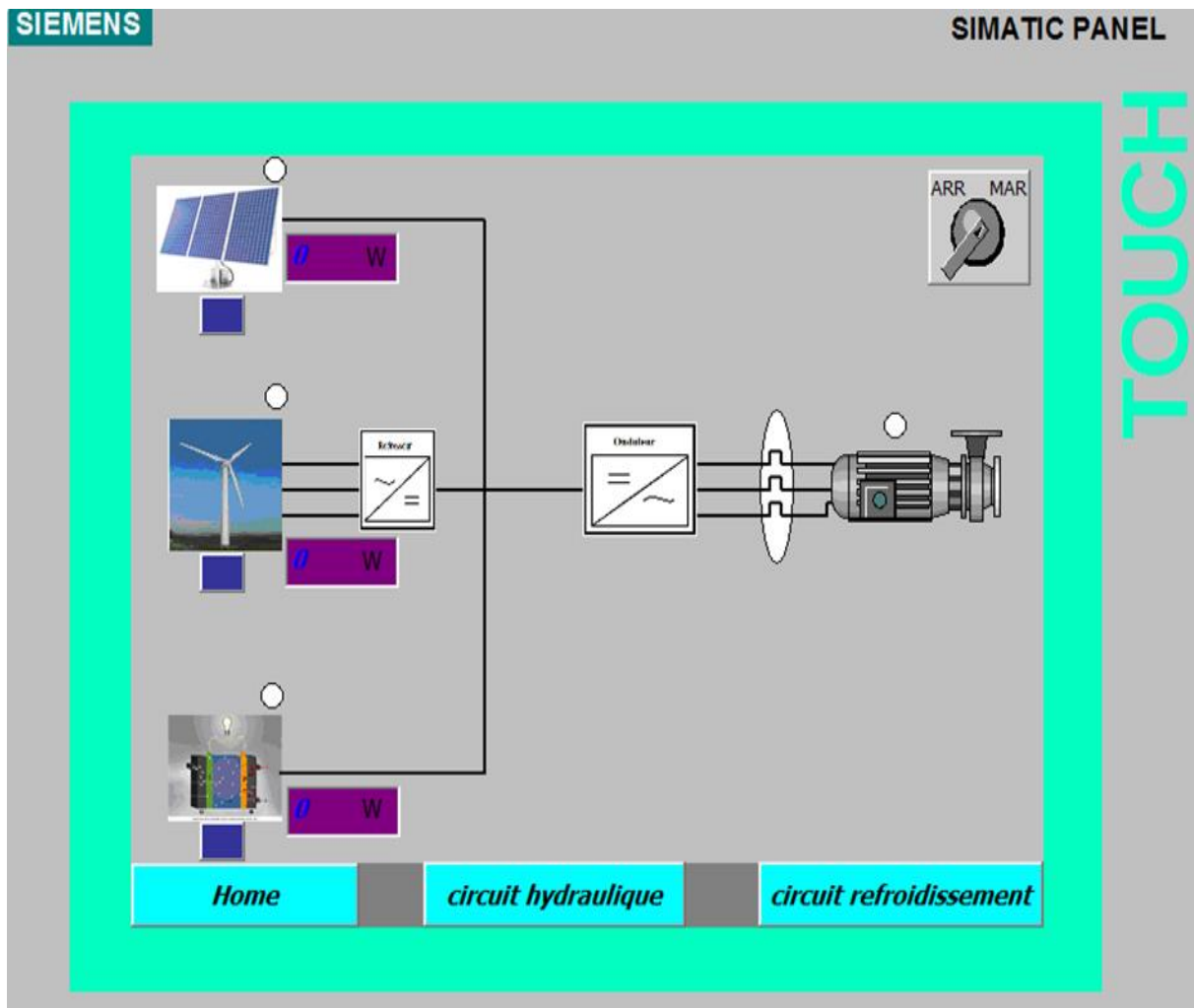


Figure IV.14 : Schéma synoptique du système de pompage

Le système hybride alimente la pompe, des afficheurs numériques de puissance de chaque source et des boutons qui donnent un affichage des données de cette source (puissance, température...). Un commutateur d'arrêt d'urgence en cas d'une défaillance.

Les boutons insérés nous offrent des vues des systèmes électriques équivalents. Lors de l'appui sur le bouton correspondant aux panneaux photovoltaïques, une vue illustrée par la figure IV.15 apparaît :

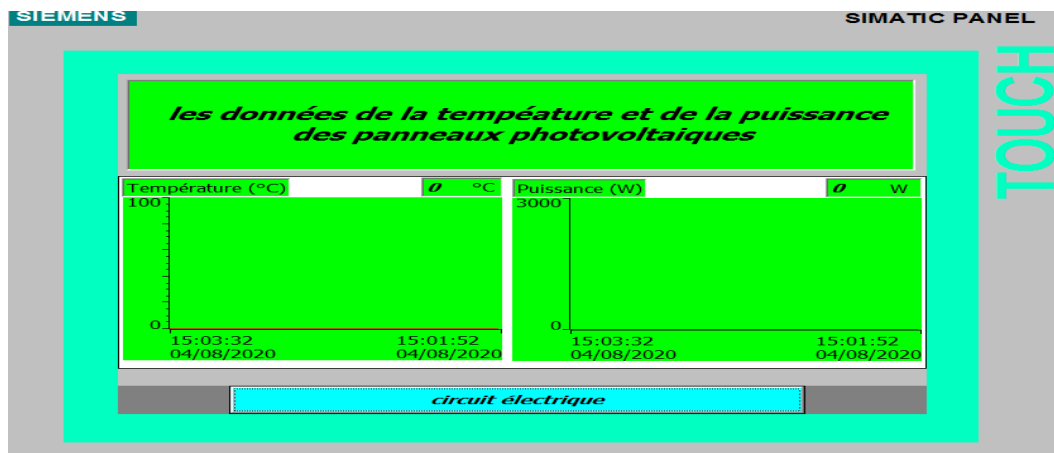


Figure IV .15 : Données concernant les panneaux photovoltaïques

Le bouton correspondant à l'éolienne laisse apparaitre l'icône suivante :

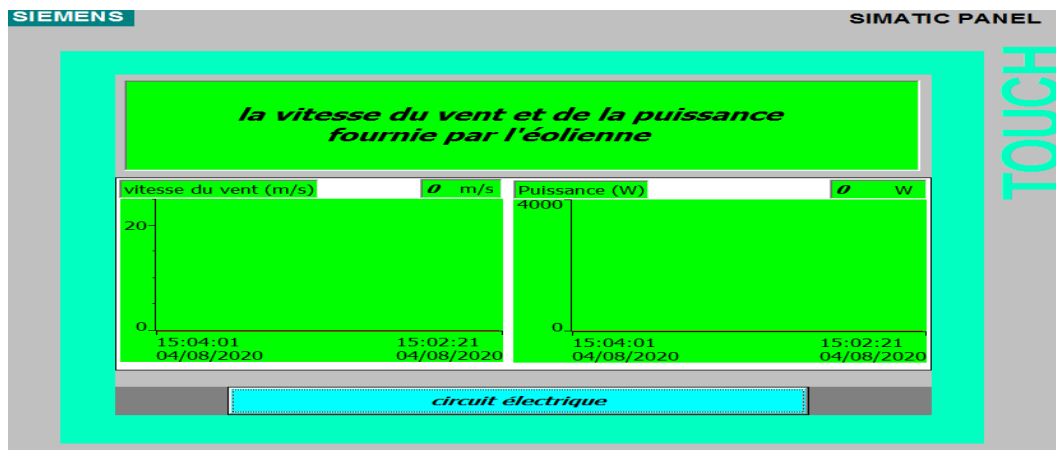


Figure IV .16 : Données concernant l'éolienne

Le bouton correspondant à la pile à combustible nous donne les informations sur cette source.

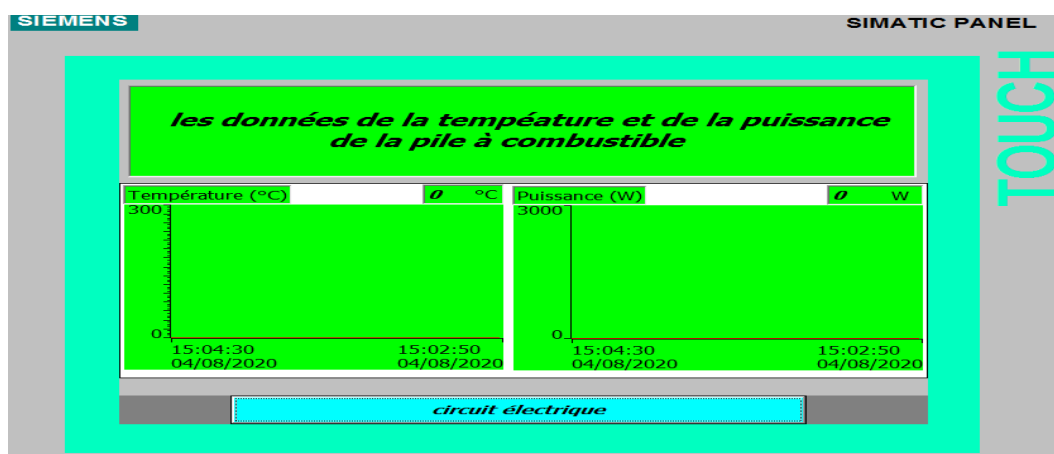


Figure IV .17 : Données concernant la pile à combustible

La vue du circuit hydraulique (circuit de pompage d'eau) est représentée ci-dessous :

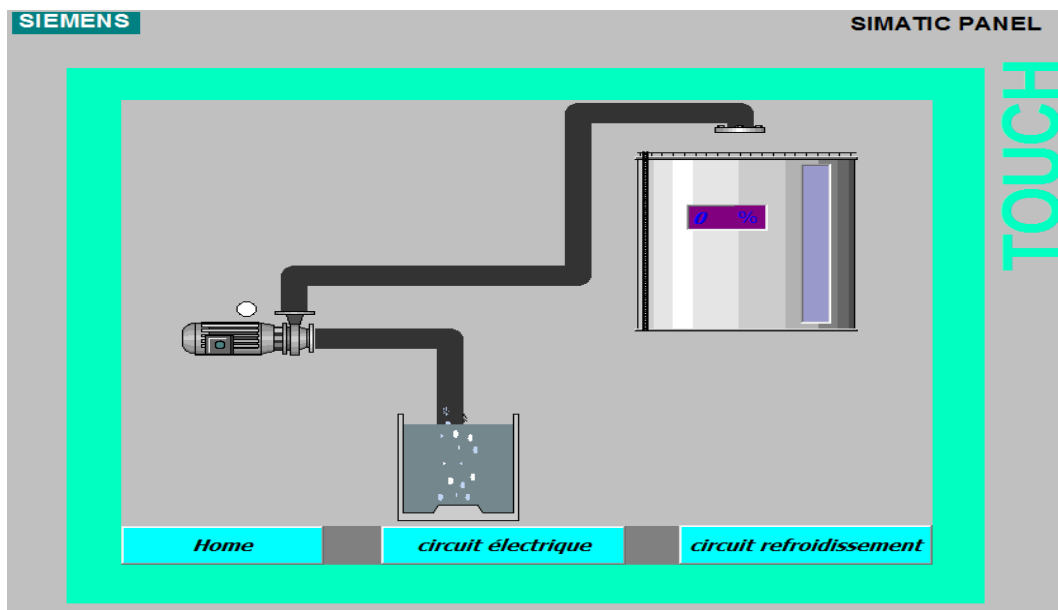


Figure IV .18 : Vue du circuit hydraulique

La vue du circuit de refroidissement est représentée par la vue suivante :

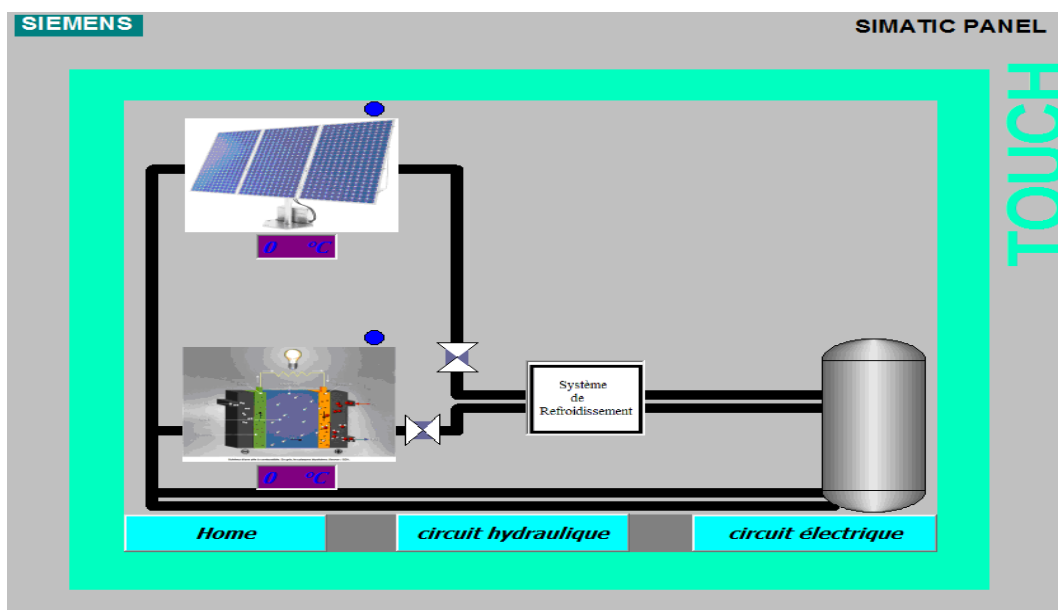


Figure IV .19 : Vue du circuit de refroidissement

VI.6 Conclusion

Ce chapitre, nous a permis de gérer et d'automatiser et de superviser une station hybride de pompage, la programmation est effectuée avec le logiciel STEP7 de l'automate S7-300 et le SIMATIC WINCC flexible pour la supervision.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les énergies renouvelables sont une richesse inépuisable, non polluante et non toxique, qui devrait être une aubaine pour l'électrification des zones isolées.

Les stations de pompage hybride à énergie renouvelable sont une solution de plus en plus utilisées de nos jours pour disposer de l'eau dans des sites isolées, elle se propage de manière significative dans le monde.

Nous avons vu dans ce travail qu'un recours à un système hybride composé d'une source photovoltaïque et d'une éolienne peut se compléter mutuellement en offrant une puissance nécessaire à la pompe pour puiser l'eau.

A noter que l'utilisation de système de stockage chimique via des batteries s'avère être onéreux, la raison pour laquelle un recours aux piles à combustible peut y remédier à ce désagrément. Aux pires des cas, absence d'ensoleillement et de vent, la pile à combustible fournira la puissance nécessaire pour faire tourner la pompe centrifuge.

Nous avons constaté que les besoins journaliers en eau de la région désertique, le débit de pompage ainsi que la hauteur manométrique totale sont des éléments indispensables pour un bon dimensionnement de la station de pompage.

Nous avons vu que les automates programmables industriels sont l'outil le plus fiable pour l'automatisation et la supervision des stations de pompage hybride dans des sites isolés, vue leur structure qui résiste à la dureté de l'environnement et ses différentes contraintes.

Comme perspectives, nous citons :

- L'utilisation d'un électrolyseur pour produire de l'hydrogène directement sur terrain en se servira du surplus d'énergie ou en rajoutons la puissance demandé par l'électrolyseur, au dimensionnement des différentes sources.
- L'utilisation d'un automate programmable industriel compact au lieu d'un automate modulaire, vue le nombre d'entrée/sortie de notre système qui est peu, et le cout des automates compact qui est faible.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Dr. LAIFAOUÏ Abdelkrim, Technologies des Automatismes, Cours Master 1 2016/2017, Filière ELM / ELT. Option ELM / AI / EI. Département Génie Electrique. Université UAMB.
- [2] Alain GONZAGA, les Automates Programmables Industriels, cours, 17p, 11/2004
- [3] Généralités sur les API, cours M2 2019/2020, option AI/ELM, API et PAC, Faculté de Technologie Département Génie électrique UAMB.
- [4] L. BERGOUGNOUX, Automates Programmables Industriels, cours photocopié, POLYTECH Marseille Département de Mécanique Energétique 2^e Année Option S.I.I.C, 2004/2005.
- [5] Fonctionnement et structure des Automates programmables industrielles, cours M2 2019/2020, option automatisme industriel, API et PAC, Faculté de Technologie Département Génie électrique UAMB.
- [6] Philippe LE BRUN, choix et mise en œuvre des automates programmables industriels, cours, Lycée Louis ARMAND 173 Bd de Strasbourg 94736 NOGENT sur Marne, Décembre 1999
- [7] Ludmil Stoyanov, «Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables », Thèse de Doctorat, Université Pascal Paoli, 2011
- [8] Hussein Ibrahim, Adrian ILINCA, Jean PERRON, « investigation des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés », rapport interne laboratoire de recherche en énergie éolienne LREE-3—septembre 2008 université du Québec à Rimouski.
-

[9] MOHAMED MLADJAO Mouhammad Al anfaf, « contribution à la modélisation et à l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi charges », Thèse de Doctorat, Université de LORRAINE, 2016

[10] Dr. Djermouni k, «cours production d'énergie», cours année 2017/2018, 2^e année électrotechnique, université Abderrahmane Mira Bejaia.

[11] KETTAL AHCEN, « amélioration des performances d'un système éolienne par l'introduction d'une source solaire », mémoire de master, université SAAD DAHLEB Blida, 2018

[12] cours d'énergie renouvelable master1 électrotechnique 2018/2019, université Abderrahmane Mira Bejaia.

[13] HASSINI née BELGHITRI HOUDA, «modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque», Mémoire De Magister, université Abou-bakr belkaid de Tlemcen, 2010.

[14] Énergie éolienne, Théorie, conception et calcul pratique des installations, Désiré Le Gourières, Edition EYROLLES, 1980.

[15] N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, "Technologie des systèmes éoliens – Intégration dans les réseaux électriques", la Revue 3EL, no. 39, 2004.

[16] ooxygene (19-04-2008), article sur l'énergie éolienne, adresse :<http://ooxygene.alwaysdata.net/eolienne.html>.

- [17] Gabriela B. Développement durable, « Avantages et inconvénient de l'énergie éolienne », article internet. Publièr 14/02/2010.
- [18] H. Hassini-Belghitri, "Modélisation, Simulation et Optimisation d'un Système Hybride Éolien-Photovoltaïque", Mémoire De Magister, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, 2010.
- [19] Hydro-Québec, « comparaison des filières de production d'électricité et des bouquets d'énergie électrique », rapport technique, novembre 2014
- [20] Majid ZANDI, « contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique » Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2010.
- [21] Bernard Wiesenfeld, « L'énergie en 2050 Nouveaux défis et faux espoirs », livre sortie en Novembre 2005, maison d'édition EDP Sciences. 237 p.
- [22] Olivier Rallières. « Modélisation et caractérisation de Piles A Combustible et Electrolyseurs PEM ». Energie électrique. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2011. Français.
- [23] ADJATI Arezki, « Etude Des Machines Asynchrones A Double Etoile En Pompage », Mémoire de Magister en électrotechnique, Soutenu Le 12/12/2012, université de Bejaia.
- [24] Joël M. ZINSALO, « pompes et stations de pompage », cours, école polytechnique d'Abomey calavi BENIN, mars 2015
-

[25] Arezki ADJATI, Toufik REKIOUA, Djamila REKIOUA, « utilisation de la machine asynchrone à double étoile en pompage hybride photovoltaïque-pile à combustible », Université de BEJAIA, laboratoire de technologie industrielle et de l'information, faculté de technologie, targa Ouzemour Bejaia Algérie.

[26] Bureau d'étude d'énergie solaire Alliance Soleil, « Principe de dimensionnement et étude de cas Pompage au fil du soleil », Rapport technique, 02/04/2016

[27] A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi, « Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque », Centre de Développement des Energies Renouvelables, Revue des énergies renouvelables, Faculté de Génie Electrique, U.S.T.H.B., B.P. 32, El-Alia, Bab Ezzouar, Alger (2005).

[28] Manuel Siemens S7-300, Système d'automatisation S7-300 Caractéristiques des modules, 02/2013

[29] Manuel de mise en œuvre S7-300, Système d'automatisation S7-300 Installation et configuration : CPU 312 IFM - 318-2 DP, Edition 06/2003.
