



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم



Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

N° d'ordre : M...../GE/2022

**MEMOIRE**

Présenté pour obtenir le diplôme de

**Filière : MASTER EN GENIE ELECTRIQUE**

**Spécialité : énergies renouvelables en électrotechnique**

Par

**Djourdem Mostafa**

**Boukhatem Nassireddine**

**Stockage d'énergie photovoltaïque sous forme d'eau pour la nuit**

Soutenu le 06 / 07/ 2022 devant jury composé de :

Président :	M. Bentounes Hadj Adda	Grade Professeur	Université de Mostaganem
Examineur :	M. Daoud Mohamed	Grade MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	M. Yagoubi Benabdellah	Grade Professeur	Université de Mostaganem

**Année Universitaire 2021/2022**

## Abstract:

Solar energy will be in the near future one of the most globally used strategies in autonomous residential architecture. The drawback of this renewable energy is, however, the electricity storage for the night. So instead of using costly batteries, we suggest in this work to use water turbine that can reverse flow and operate as a water pump to fill an upper water Reservoir from a lower reservoir during the day using solar energy, and then revert to a water turbine for electrical power generation during the night. The water stored in the high reservoir acts, thus, as a battery.

**Key words:** Autonomous PV house model; solar energy storage; hydroelectric turbine.

## Résumé :

L'énergie solaire sera dans un futur proche l'une des stratégies les plus utilisées au niveau mondial dans l'architecture résidentielle autonome. L'inconvénient de cette énergie renouvelable est cependant le stockage d'électricité pour la nuit. Ainsi, au lieu d'utiliser des batteries coûteuses, nous suggérons dans ce travail d'utiliser une turbine à eau qui peut inverser le débit et fonctionner comme une pompe à eau pour remplir un réservoir d'eau supérieur à partir d'un réservoir inférieur pendant la journée en utilisant l'énergie solaire, puis revenir à une turbine à eau pour la production d'électricité pendant la nuit. L'eau stockée dans le réservoir supérieur agit, ainsi, comme une batterie.

**Mots clés :** Modèle de maison PV autonome ; stockage d'énergie solaire ; turbine hydroélectrique.

## الملخص :

ستكون الطاقة الشمسية في المستقبل القريب واحدة من أكثر الاستراتيجيات استخدامًا عالميًا في العمارة السكنية المستقلة. لكن عيب هذه الطاقة المتجددة هي تخزين الكهرباء ليلاً. لذا بدلاً من استخدام البطاريات المكلفة ، نقترح في هذا العمل استخدام التوربينات المائية التي يمكنها عكس التدفق والعمل كمضخة مياه لملئ خزان مياه علوي من خزان سفلي خلال النهار باستخدام الطاقة الشمسية ، ثم العودة إلى التوربينات المائية لتوليد الطاقة الكهربائية أثناء الليل. وبالتالي، فإن الماء المخزن في الخزان العالي يعمل كبطارية.

**الكلمات الأساسية:** نموذج منزل PV مستقل ؛ تخزين الطاقة الشمسية التوربينات المائية الكهرومائية.

## **Dédicace :**

Je dédie ce mémoire de fin d'étude : A mes chers parents, Ma très chère mère qui m'a toujours apportée son amour et son affection, mon père qui m'a toujours encouragée, conseillée et soutenue dans mon travail que Dieu les gardes pour moi. À mon université et aux enseignants qui ont rendu cela possible. À tous mes enseignants, qui m'ont suivie de mes premières années d'école Jusqu'ici. Pour ma classe pour les moments inoubliables. Pour tous ceux qui m'ont aidé.

# REMERCIEMENTS

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre **Dieu** de nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier vivement **M.Yagoubi Benabdellah** notre encadreur qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements,

Et tenons à remercier **Madame Neddar** pour les informations et les références qu'elle nous a données pour enrichir de modeste travail.

Non sincères remerciement aussi a **M.Ould Said Belkacem** de nous avoir aidé pour ses conseils précieux qui nous ont permis d'approfondir dans cette recherche scientifique.

Un grand Merci également à **Dr.Guerrah Ayoub** pour m'avoir aidé dans mes recherches et m'avoir donné des idées et répondu à mes innombrables questions.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres du jury :

**M. Bentounes Hadj Adda** d'avoir accepté de juger notre travail et de préside le jury.

**M. Daoud Mohamed** pour M'avoir fait l'honneur d'accepter de juger notre travail.

Et tous les professeurs du département de Génie électrique A tous ce qui furent à un moment ou à un autre et à tout instant partie prenante de ce travail. Nos plus chaleureux remerciements à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

## Table des matières :

Résumé.....	2
Dédicace.....	3
Remerciements.....	4
Table des matières.....	5
List des Figures et des tableaux.....	7
Liste des symboles.....	9
Introduction Générale.....	10
<b>Chapitre I : Généralité sur système photovoltaïque et stockage par STEP.....</b>	<b>11</b>
<b>I.1.Introduction.....</b>	<b>11</b>
<b>I.1.2 Historique.....</b>	<b>11</b>
<b>I.1.3 Rayonnement solaire.....</b>	<b>13</b>
<b>I.1.4 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....</b>	<b>15</b>
<b>I.1.5 Types des cellules photovoltaïques et rendement .....</b>	<b>12</b>
<b>I.1.6 Composants d'un système photovoltaïque.....</b>	<b>16</b>
<b>I.1.6.1 Régulateur.....</b>	<b>16</b>
<b>I.1.6.2 Onduleur DC/AC.....</b>	<b>18</b>
<b>I.1.6.3 Les câbles.....</b>	<b>19</b>
<b>I.1.7 Avantages d'une installation PV.....</b>	<b>20</b>
<b>I.2 Stockage d'énergie par pompage hydraulique .....</b>	<b>20</b>
<b>I.2.1Définition et principe.....</b>	<b>21</b>
<b>I.2.2 Historique du stockage d'énergie STEP.....</b>	<b>22</b>
<b>I.2.3 Caractéristiques globales d'une STEP.....</b>	<b>23</b>
<b>I.2.4 Les équipement électromécanique d'une STEP.....</b>	<b>26</b>
<b>I.2.4.1 La turbine.....</b>	<b>26</b>
<b>I.2.4.2 Les multiplicateurs.....</b>	<b>31</b>
<b>I.2.4.3 Alternateur.....</b>	<b>31</b>
<b>I.2.4.5 Pompes.....</b>	<b>32</b>

# Table des matières

---

<b>I.2.5</b> Inverseur électrique.....	34
<b>I.2.6</b> Les STEP's dans le monde.....	35
<b>I.3</b> Conclusion.....	36
<b>Chapitre II : Estimation et Dimensionnement du système PV-STEP.....</b>	<b>37</b>
<b>II.1</b> Introduction.....	37
<b>II.2</b> Conception de système et Méthode du dimensionnement .....	38
<b>II.2.1</b> La puissance fournie par la turbine (Mode de génération) .....	40
<b>II.2.2</b> Mode de pompage .....	40
<b>II.2.3</b> Capacité de Réservoir supérieur.....	41
<b>II.3</b> Estimation des besoins annuels en énergie électrique pour une maison algérienne moyenne.....	41
<b>II.4.</b> Comportement du STEP en fonction des paramètres .....	43
<b>II.5</b> Dimensionnement du Micro STEP-PV.....	47
<b>II.5.1</b> Partie1 : Dimensionnement du STEP.....	47
<b>II.5.2</b> Partie 2 ; Dimensionnement du PV.....	48
<b>II.6</b> Conclusion.....	54
<b>Chapitre III : Réalisation Pratique su Système.....</b>	<b>55</b>
<b>III .1</b> Introduction :.....	55
<b>III.2</b> Conception de modèle.....	55
<b>III.3</b> Descriptions des composites.....	55
<b>III.4</b> Résultat de la réalisation .....	57
<b>III.5</b> Conclusion .....	58
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>59</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>60</b>

**Figure :**

Figure I-1 : installation solaire photovoltaïque.....	11
Figure I-2 : types de rayonnement.....	13
Figure I-3 : Rayonnement solaire capté par un plan horizontal et incliné.....	14
Figure I-4 : Intensité de l'insolation reçu Sur un plan horizontal et incliné.....	14
Figure I-5 : représente le principe de la cellule photovoltaïque.....	15
Figure I-6 : Les images de différents types de la cellule photovoltaïque.....	16
Figure I-7 : représente Régulateur MPPT et PWM.....	16
Figure I-8 : un onduleur.....	18
Figure I-9 : La STEP de l'île d'El Hierro.....	21
Figure I-10 : représente le principe de fonctionnement d'une centrale STEP .....	22
Figure I-11 : les technologies de stockage.....	23
Figure I-12 : schéma principe d'une STEP en cycle fermé.....	24
Figure I-13 : turbine a action.....	27
Figure I-14 : Turbine à réaction.....	27
Figure I-15 : La turbine Pelton à 4 injecteurs.....	28
Figure I-16 : Schéma de principe de la turbine Francis.....	29
Figure I-17 : Schéma de principe de la Turbine Kaplan.....	29
Figure I-18 : La turbine Banki ou Crossflow.....	30
Figure I-19 : Les différents turbines hydrauliques.....	31
Figure I-20 : alternateur d'une centrale hydraulique.....	32
Figure I-21 : pompe du type centrifuge.....	33
Figure I-22 : un inverseur de source automatique.....	35
Figure II-1 : représente le système PV-STEP.....	37
Figure II-2 : Carte géographique algérienne, Hauts Plateaux en violet.....	42

Figure II-3 programme d'estimation pour 6h.....	43
Figure II-4 : variation de la capacité en fonction du la hauteur : cas durés 6h .....	44
Figure II-5 programme d'estimation pour 8h.....	44
Figure II-6 : variation de la capacité en fonction du la hauteur : cas durés 8h .....	45
Figure II-7 programme d'estimation pour 14h.....	46
Figure II-8 : variation de la capacité en fonction du la hauteur : cas durés 14h .....	46
Figure II-9 : schéma de micro STEP-PV pour une maison.....	47
Figure II-10 : Représentation de l'irradiation moyenne dans le monde.....	51
Figure II-11 : représente rayonnement global moyen annuel en Algérie.....	51
Figure II-12 : représente les données du site Mostaganem.....	53
Figure II-13 : tableau de la météo du site Mostaganem.....	53
Figure III-1 : les panneaux solaires.....	56
Figure III-2 : L'onduleur.....	56
Figure III-3 : régulateur MPPT.....	56
Figure III-4 : Micro-turbine avec une lampe.....	57
Figure III-5 : réservoir supérieur .....	57
Figure III-6 : réservoir inferieur.....	57
Figure III-7 : une pompe.....	57
Figure III-8 : caractéristique de la pompe.....	59
Figure III-9 : une lampe allumée par la turbine.....	59

**Tableaux :**

Tableau I-1 : les différents types des cellules avec leur rendement.....	15
Tableau I-2 : Résumé des principaux types et leurs caractéristiques .....	30
Tableau II-1 : Quelques valeurs du coefficient K en fonction de la forme du tuyau.....	39
Tableau II-2 : les appareils consommé pendant la nuit .....	41
Tableau II-3 : résultats de Programme Pour 8h.....	43



Tableau II-4 : résultats de Programme pour 8h.....	44
Tableau II-5 : les appareils consommé pendant la nuit d'été .....	45
Tableau II-6 : résultats de programme pour 14h .....	46
Tableau II-7 : décrit la consommation d'énergie par jour.....	49
Tableau II-8 les différents types de pertes énergétiques .....	52
Le tableau II-9 résume les paramètres et les composants de système STEP-PV.....	55

## Liste des symboles

---

$\rho$  : masse volumique de l'eau. (kg/m<sup>3</sup>)

$g$  : accélération de la gravité. (9.81 m/s<sup>2</sup>)

$P_p$  : La puissance électrique installée pour le pompage.

$P_t$  : La puissance électrique installée pour le turbinage.

$\eta_g$ : Le Rendement Globale.

$E_t$  : l'énergie électrique produite en mode turbinage.

$E_p$  : l'énergie électrique consommée par le pompage.

$P_1$  : pression à l'élévation 1.

$v_1$  : vitesse à l'élévation 1.

$h_1$  : hauteur d'élévation 1.

$P_2$  : pression à l'élévation 2.

$v_2$  : vitesse à l'élévation 2.

$h_2$  : hauteur d'élévation 2.

$v$  : vitesse moyenne du fluide. (m/s)

$K$  : coefficient dépendant du type d'accessoire.

$P$  : puissance. (J/s ou watts)

$\eta$  : efficacité de la turbine. (0,90)

$h$  : tête (m), la différence de hauteur entre les surfaces d'entrée et de sortie.

$F$  : débit (m<sup>3</sup>/s).

$P_{pv}(t)$  : la puissance d'entrée des pompes (puissance générée par PV).

## Liste des symboles

---

**C<sub>p</sub>** : le coefficient de pompage de l'eau de l'unité moteur de la pompe.

**η<sub>p</sub>** : efficacité de la pompe.

**α** : la perte par évaporation et par fuite.

**C** : capacité du réservoir. (En litre)

***E<sub>sol</sub>*** : L'ensoleillement du site. (Wh/m<sup>2</sup>/jour)

***N<sub>e</sub>*** : Nombre d'heures équivalentes. (h/jour)

**P<sub>u</sub>** : puissance de panneaux.

## Introduction générale :

L'idée est de construire un réservoir plus haut pour stocker l'eau pour la nuit, et un plus bas pour recevoir cette eau qui tombe qui doit être réutilisée plusieurs fois. Donc, pour produire de l'électricité pendant la nuit, l'eau du réservoir supérieur tombe par la conduite forcée et au bout de laquelle se trouve une turbine hydroélectrique entraînée par la chute d'eau. Cette turbine hydroélectrique produira l'électricité pendant la nuit. L'eau qui a déjà traversé la turbine dans le bas le réservoir pendant la nuit est pompée à nouveau chaque jour en utilisant l'énergie solaire pour remplir le réservoir supérieur de stockage. Ainsi, ce dernier fonctionne de la même manière qu'une batterie ; stocker de l'énergie sous forme d'eau pendant la journée et fournir de l'électricité pendant la nuit. L'avantage d'utiliser ces réservoirs de stockage par pompage pour alimenter les maisons en électricité est qu'ils sont assez petits et leurs coûts de construction sont généralement faibles par rapport aux barrages hydroélectriques et Source d'énergie totalement renouvelable Non polluante.

Pour présenter cette Solution du stockage, nous avons divisé ce mémoire en 3 chapitres :

Dans le premier chapitre on présente une étude générale d'un système hybride constituée de deux parties d'un générateur photovoltaïque (PV), d'un générateur hydroélectrique (STEP), nous avons initié le principe de fonctionnement de notre projet de système PV-STEP pour le stockage d'énergie et avons une clarification sur l'art de sa conception.

Dans le deuxième chapitre on présente l'estimation du besoin et le dimensionnement du système PV-STEP pour une maison algérienne moyenne et les caractéristiques géographiques et météorologiques du site de Mostaganem, dans lequel on a proposé l'installation du système dans une maison, et présentons les différents modèles mathématiques de chacun de ces éléments composants ce système.

Dans le troisième chapitre on va montrer une petite réalisation prototype de ce système Pour valider ce travail ; Nous avons testé dans le cas d'une lampe.

Finalement, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale.

# CHAPITRE I :

## Généralité sur système photovoltaïque et stockage par STEP

### I. Introduction :

Dans ce chapitre on présente une étude générale d'un système hybride constitué d'un générateur photovoltaïque et STEP (station du transfert énergie par pompage).

L'énergie photovoltaïque est une énergie renouvelable et non polluante (énergie verte). Cette énergie peut être utilisée comme énergie dans des applications connectées au réseau ou dans des sites isolés. L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite en convertissant une partie du rayonnement solaire à travers des cellules photovoltaïques. Le terme photovoltaïque désigne le phénomène physique découvert par Alexandre Edmund Becquerel en 1839 [1].



Figure I-1 : installation solaire photovoltaïque [1].

### I.1.2 Historique :

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

En 1839 : le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation

de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

En 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

En 1954 : les laboratoires Bell fabriquent la première cellule solaire qui alimente des appareils électriques domestiques.

En 1958 : Vanguard I est le premier satellite alimenté en énergie par des panneaux photovoltaïques. Durant les années 1960, l'utilisation du photovoltaïque pour les satellites s'est généralisée. Embarqués à bord des lanceurs puis déployés en orbite autour de la terre, les panneaux photovoltaïques démontrent leur importance et leur qualité de produire de l'énergie solaire.

A partir des années 1970, les panneaux photovoltaïques se développent sur des applications terrestres et maritimes. Ils permettent de fournir de l'énergie à des sites isolés qui ne sont pas desservis par un réseau électrique comme les balises en pleine mer ou les relais de télécommunication en plein désert. Les panneaux photovoltaïques sont utilisés dans les conditions les plus extrêmes. En mer, ils sont exposés aux tempêtes et à la corrosion saline. Dans les déserts, ils subissent des températures extrêmes et des cycles thermiques très exigeants avec des nuits très froides suivies de fortes chaleurs le jour.

En 1974 : la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à Albuquerque au Nouveau Mexique Ce qui semblait impensable est devenu une réalité : l'énergie solaire peut répondre à l'intégralité des besoins énergétiques d'un bâtiment.

En 1983 : la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 400 km en Australie.

Après la signature des accords de Kyoto en 1997, des réflexions sont menées dans les grands pays développés pour trouver des solutions concrètes au problème d'émission de gaz à effet de serre. Il s'agit notamment de réduire notre consommation aux énergies fossiles. Le solaire photovoltaïque est identifié comme l'une des technologies les plus prometteuses. Afin de compenser son coût encore élevé, des mécanismes d'incitations financières sont mis en place au Japon et en Allemagne dès l'année 2000 puis progressivement dans la plupart des grands pays développés. [2]

### I.1.3 Rayonnement solaire :

**Spectre solaire :** Afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol.

En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature :

**Le rayonnement direct :**

La conversion du rayonnement direct ED est une question trigonométrique. Le rayonnement direct, sur le plan horizontal, est la différence entre le rayonnement global et le rayonnement diffus [3].

**Le rayonnement diffus :** c'est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols.

**Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol :** c'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc....)

**Le rayonnement global :** le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol [4].

Dans la figure ci-dessous de types rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre.

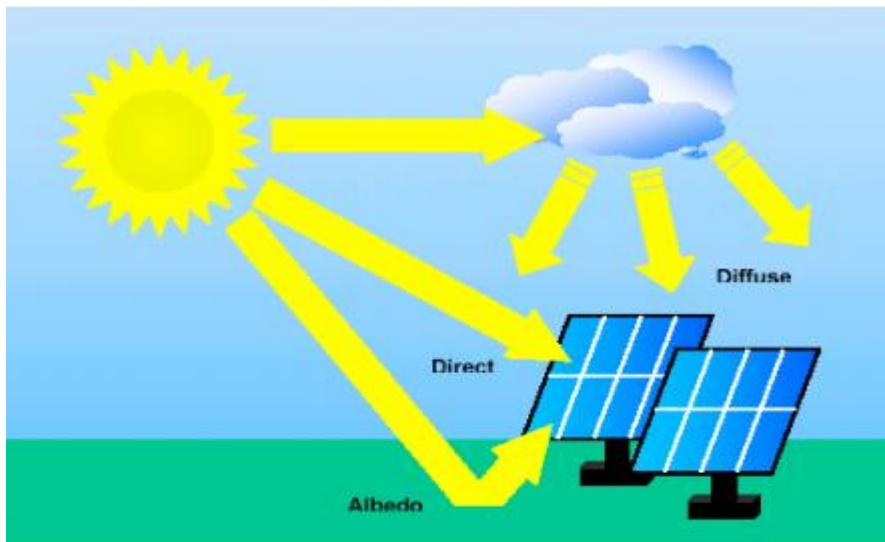


Figure I-2 : types de rayonnement [5]

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan quelconque à un moment donné est appelée irradiation ou éclairement (noté généralement par la lettre G), elle s'exprime en watts par mètre carré ( $W/m^2$ ).

La valeur du rayonnement reçu par la surface du module photovoltaïque varie selon la position de ce dernier. Le rayonnement solaire atteint son intensité maximale lorsque le plan du module photovoltaïque est perpendiculaire aux rayons [6].

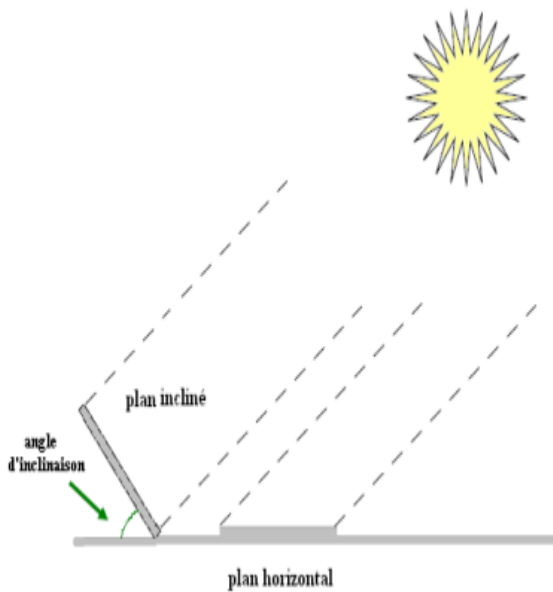


Figure I-3 : Rayonnement solaire capté par Un plan horizontal et incliné [6].

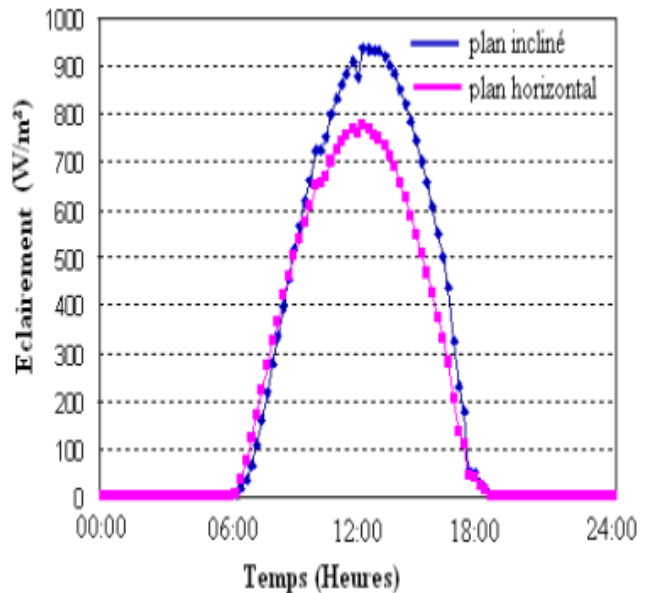


Figure I-4 : Intensité de l'ensoleillement reçu Sur un plan horizontal et incliné.

### I.1.3 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Le comportement de la cellule photovoltaïque est basé sur les propriétés des semi-conducteurs qui, exposés aux photons, créent un mouvement du flux d'électrons. Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à 300 000 km/s et qu'Albert Einstein appelait dans les années 1920 les « grains de lumière ». Lorsqu'ils heurtent un élément semi-conducteur comme le silicium, ils enlèvent des électrons à ses atomes. Ces électrons se mettent en mouvement, de façon désordonnée, à la recherche d'autres « trous » où se repositionner.

Pour qu'il y ait un courant électrique, il faut que ces mouvements d'électrons suivent tous le même sens. Pour les y aider, on va associer deux types de silicium. La face exposée au soleil est « dopée » avec des atomes de phosphore qui comportent plus d'électrons que le silicium, l'autre face est dopée avec des atomes de bore qui comportent moins d'électrons. Cette double face devient une sorte de pile : le côté très chargé en électrons devient la borne négative (N), le côté avec moins d'électrons devient la borne positive (P). Entre les deux il se crée un champ électrique.

Quand les photons viennent exciter les électrons, ceux-ci vont migrer vers la zone N grâce au champ électrique, tandis que les « trous » vont vers la zone P. Ils sont récupérés par des contacts électriques déposés à la surface des deux zones avant d'aller dans le circuit extérieur sous forme d'énergie électrique. Un courant continu se crée. Une couche anti-reflet permet d'éviter que trop de photons se perdent en étant réfléchis par la surface [7].



**LE PRINCIPE DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE**

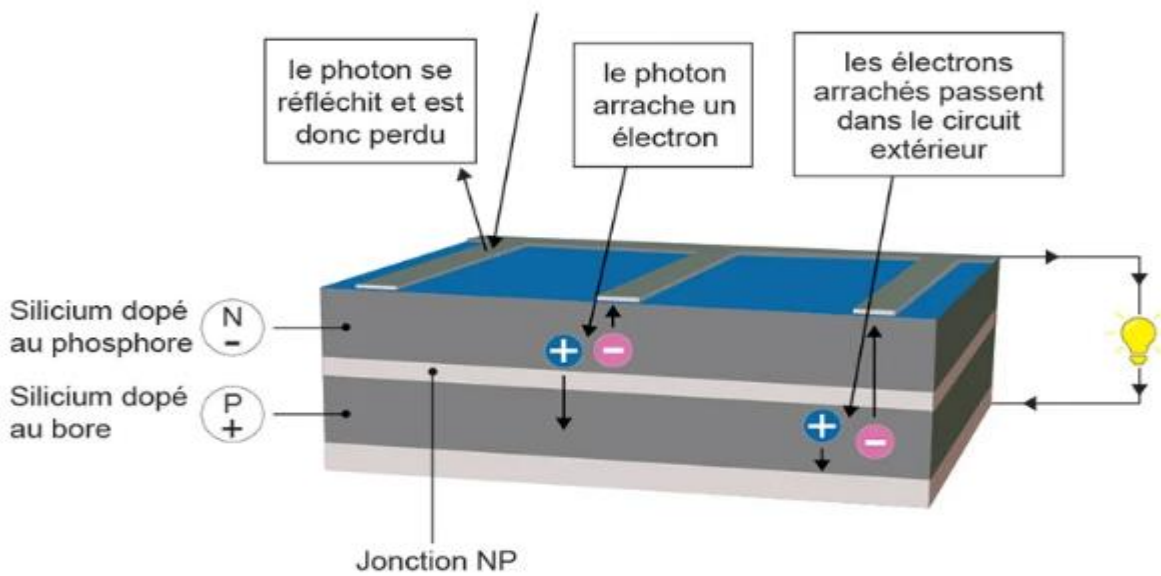


Figure I-5 : représente le principe de la cellule photovoltaïque [7]

**I.1.5 Types des cellules photovoltaïques et rendement :**

Il y a différents types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), et chaque type de cellules a un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle [7] :

**Les cellules monocristallines :** ont le meilleur rendement mais aussi celles qui ont le coût le plus élevé, à cause d'une fabrication difficile.

**Les cellules poly-cristallines :** Leur fabrication étant plus facile, leur coût de conception est moins important, cependant leur rendement est plus faible.

**Les cellules amorphes :** Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

**Rendement d'une cellule :**

Le tableau I-1 suivant présente les différents types des cellules avec leur rendement.

Technologie de cellules	Rendement laboratoire	en	Rendement production
Silicium amorphe (a-Si)	13%		5-9%
Silicium polycristallin (p-Si)	19,8%		11 à 15 %
Silicium monocristallin (m-Si)	24,7%		13 à 17%

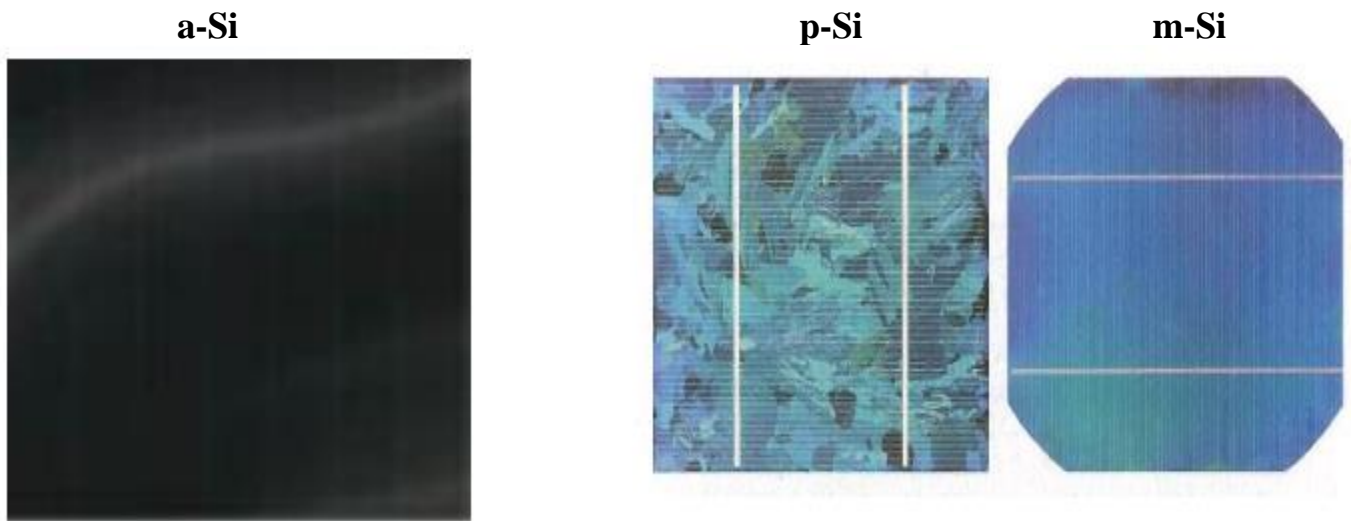


Figure I-6 : Les images de différents types de la cellule photovoltaïque [7]

## I.1.6 Composants d'un système photovoltaïque :

### I.1.6.1 Le Régulateur :



Figure I-7 : représente Régulateur MPPT et PWM [8]

Également appelé contrôleur de charge, le régulateur solaire sert à optimiser la charge d'une installation de production d'énergie solaire photovoltaïque (PV) et permet aussi d'accroître la puissance des panneaux solaires. Il existe actuellement deux principaux types de régulateurs,

PWM et MPPT. La gamme de prix de ces appareils est large et liée à de nombreux critères techniques [8].

Les appareils de type PWM récupèrent le courant provenant des panneaux solaires photovoltaïques et dans l'onduleur sous la forme d'impulsions de longueur et de fréquence variables.

Certains contrôleurs de charge offrent des fonctionnalités avancées telles que :

- Plusieurs sorties auxiliaires,
- Un raccord possible avec des écrans de contrôle à distance,
- Un logiciel de gestion de l'état de fonctionnement de la batterie,
- Une présentation sous la forme d'un coffret pré-câblé qui rend l'installation extrêmement simple.

### **I.1.6.2 Onduleur DC/AC :**



Figure I-8 : un onduleur [9]

L'onduleur solaire est un appareil qui a pour but de convertir le courant continu (DC) en courant alternatif (AC). Il est un composant typique des systèmes photovoltaïques sachant que les panneaux solaires photovoltaïques génèrent de l'électricité en courant continu, alors que la plupart des appareils électriques dans une maison fonctionnent avec du courant alternatif. [9].

Les deux grands types de système photovoltaïque sont :

- 1) les systèmes connectés au réseau.
- 2) les systèmes hors réseau.

### **Fonctionnement :**

Le fonctionnement de l'onduleur solaire se détermine en fonction du type et des performances du système de production solaire sur lequel il est installé.

Il est le cœur même de l'installation lorsqu'il est mis en place dans un système connecté au réseau. Il doit assurer la conversion de la tension continue du réseau solaire en tension alternative qui peut être directement utilisée ou exportée vers un réseau électrique public. [9]

### **Les différents types d'onduleurs :**

Même si son rôle principal est de convertir le courant DC en AC, l'onduleur solaire est aussi à même d'assurer d'autres rôles. On retrouve ainsi différents types d'appareils sur le marché comme :

**L'onduleur de chaînes**, qui peut accueillir le courant fourni par une chaîne de panneaux photovoltaïques.

**L'onduleur central**, plus gros et imposant, qui supporte toutes les charges fournies par plusieurs chaînes de panneaux.

**Le micro-onduleur**, lui, est surtout utilisé sur les installations résidentielles. Comme les optimiseurs de puissance, celui-ci est un composant électronique de niveau module. Il faut ainsi prévoir une unité sur chaque panneau et dans ce cas de figure, il faut donc un panneau pour un micro-onduleur.

**L'onduleur à batterie** joue à la fois le rôle de transformateur et de chargeur de batteries.

### **Avantages et inconvénients d'un onduleur :**

#### **Les avantages :**

Les avantages de l'onduleur solaire sont diversifiés en fonction de leurs types :

- 1) l'onduleur de chaînes et l'onduleur central sont parfaits pour les locaux professionnels et industriels ;
- 2) le micro-onduleur optimise l'apport de charge, même s'il provient d'un panneau solaire peu performant ;
- 3) l'onduleur à batterie convient aux zones ombragées et s'avère plus efficace en l'absence de soleil comme en hiver par exemple ou pendant les intempéries ;
- 4) le micro-onduleur est une option adaptée pour les toits compliqués
- 5) l'onduleur solaire est rentable sur le long terme, il est autonome et n'exige pas trop d'entretien ;
- 6) l'appareil est écologique et sûr pour l'environnement.

**Les inconvénients :**

L'onduleur photovoltaïque peut également présenter quelques faiblesses et imposer des contraintes :

- 1) Plus il est performant, plus il coûte cher. Schématiquement, on peut dire que l'onduleur central coûte généralement plus cher que l'onduleur de chaîne qui lui coûte plus cher que l'onduleur à batterie, qui lui, est encore plus coûteux que le micro-onduleur.
- 2) Tout comme les cellules photovoltaïques, il devient moins performant en cas d'absence du soleil.
- 3) Son entretien doit être exclusivement pris en charge par un professionnel, et impose la souscription à un contrat de maintenance.

**I.1.6.3 Les câbles :**

Les câbles vont servir à transporter l'électricité ; les câbles doivent donc être dimensionnés afin de limiter les chutes de tension.

**I.1.7 Avantages et inconvénients d'une installation PV :**

Parmi **les avantages** que nous trouvons lors de l'installation d'un système photovoltaïque sont :

Tout d'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.

Nous trouvons également le coût de fonctionnement très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.

Et enfin la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, sauf l'inconvénient de l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [10].

## **I.2 Stockage d'énergie par pompage hydraulique(STEP) :**

Stockage d'énergie par pompage a été développé pour optimiser le fonctionnement des grandes centrales électriques dans les réseaux interconnectés, en face d'une demande en électricité variable dans le temps (heures pleines/heures creuses). Au début du XXIe, ce stockage d'énergie fait l'objet d'une nouvelle vague de développement, importante, en lien avec le développement des énergies renouvelables. [11]

Le pompage est le moyen de stockage électrogène le plus économique, pourvu que l'on dispose de sites appropriés : pouvoir aménager ou utiliser un réservoir en altitude qui puisse être mis en communication, par des conduites et galeries, avec un autre plan d'eau situé plus bas. Les composants clés sont les turbines et les pompes, ou les turbines-pompes combinant les deux fonctions. Pour une grande flexibilité de fonctionnement en pompage comme en turbinage, les turbines-pompes les plus récentes sont à vitesse variable.

Ces installations sont appelées en abrégé en français STEP (stations de transfert d'énergie par pompage), et en anglais PSH (Pumped Storage hydro). [11]



Figure I-9 : La STEP de l'île d'El Hierro [11].

### **I.2.1 Définition et principe :**

Le principe de ce stockage d'énergie est de pomper de l'eau à partir d'un réservoir vers un autre réservoir



situé à une plus haute altitude, pendant les périodes où l'électricité est abondante. Puis, aux moments où la demande est plus forte au regard de la production, de faire chuter cette eau au travers de turbines qui produisent de l'énergie électrique. Il y a besoin pour ce faire de deux réservoirs d'eau situés à des altitudes différentes, de galeries, canalisations ou conduites reliant ces deux réservoirs, de pompes et de turbines, ainsi que d'ouvrages annexes. L'énergie est stockée sous forme d'énergie potentielle de gravité [11]. Un volume d'eau  $v$  existant à une certaine altitude  $h$  au-dessus de la mer correspond en effet à une énergie potentielle :

$$E_p = \rho g v h \quad (\mathbf{I.1})$$

Entre deux réservoirs dont les niveaux seraient à des altitudes différentes de  $H_b$ , appelé hauteur de chute brute, il y aurait donc une différence d'énergie potentielle :

$$E = \rho g v H_b \quad (\mathbf{I.2})$$

Avec  $v$  volume d'eau qu'il est effectivement possible de transférer d'un réservoir à l'autre, et inversement.

Ce volume  $v$  dépend des capacités des réservoirs, sachant qu'un réservoir donné est caractérisé par un niveau d'eau minimal (au-dessous duquel on s'interdit de descendre) et d'un niveau maximal.

Comme les niveaux des deux lacs évoluent au cours d'un cycle de pompage-turbinage, la hauteur de chute  $H_b$  varie pendant ce cycle. Ainsi, l'énergie stockable est plus souvent définie par le volume utile des réservoirs. [11]

**Exemple :** dans le projet de nouvelle station de stockage par pompage de Linthal en Suisse, la différence de niveau entre les deux réservoirs devrait varier entre 560 m et 724 m, selon l'état de remplissage de ces derniers.

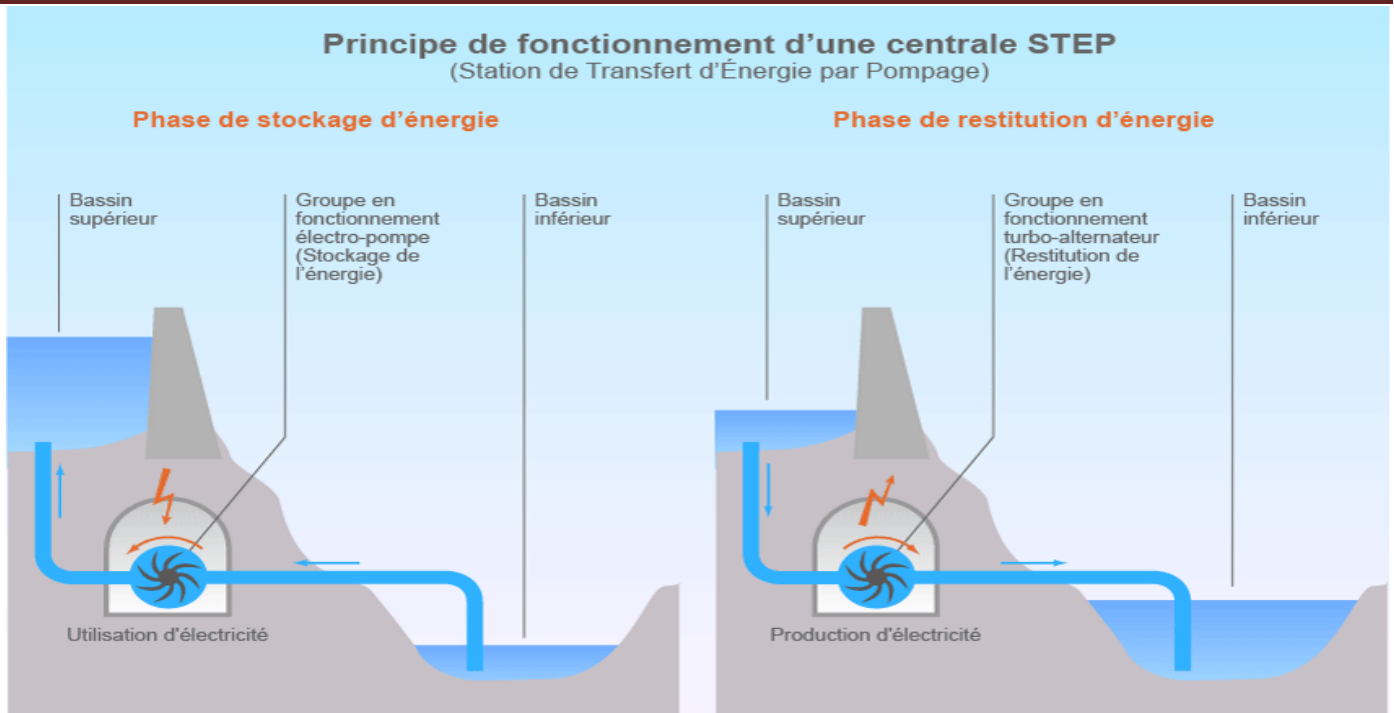


Figure I-10 : représente le principe de fonctionnement d'une centrale STEP [12].

### I.2.2 Historique du stockage d'énergie STEP :

Les premières STEP ont pris naissance au début du XXe siècle dans le contexte de systèmes électriques locaux, non interconnectés, souvent constitués d'un couple : ville-centrale hydroélectrique. Il s'agissait de répondre aux pics de demande électrique des villes, en pompant la nuit pour restituer de l'énergie sur le réseau en heure de pointe.

La première STEP pourrait avoir été celle de Ruppoldingen en Suisse, sur l'Aar, en 1902. La première STEP en Allemagne serait celle de Niederwartha, mise en service en 1929. La STEP des Lacs Blanc et Noir, dans les Vosges, a été construite en 1933-34, en liaison avec l'usine hydroélectrique de Kembs sur le Rhin, pour les besoins de la ville de Mulhouse ; sa mise en service a été retardée jusqu'en 1938 à cause d'un accident.

Une seconde vague de développement des STEP se situe dans les années 1970-1990, en lien avec les constructions des grandes centrales de production d'électricité, nucléaires ou centrales à charbon, qu'il est plus intéressant de faire fonctionner le plus longtemps possible, comme toutes les installations ayant un coût d'investissement élevé. La STEP en est alors le complément. Les STEP de Ludington (États-Unis, 1976), Dinorwig (RU, 1984), Guanzhou (Chine, 2000) ont été construites pour répondre à ce besoin.



Une troisième vague de développement a commencé au début du XXI<sup>e</sup> siècle, la STEP répondant aux besoins de flexibilité des systèmes électriques, et le stockage d'énergie se trouvant susceptible de favoriser ou même rendre possible l'intégration des énergies renouvelables intermittentes. Ce développement concerne notamment l'Europe et plus récemment l'Asie (Chine) [11].

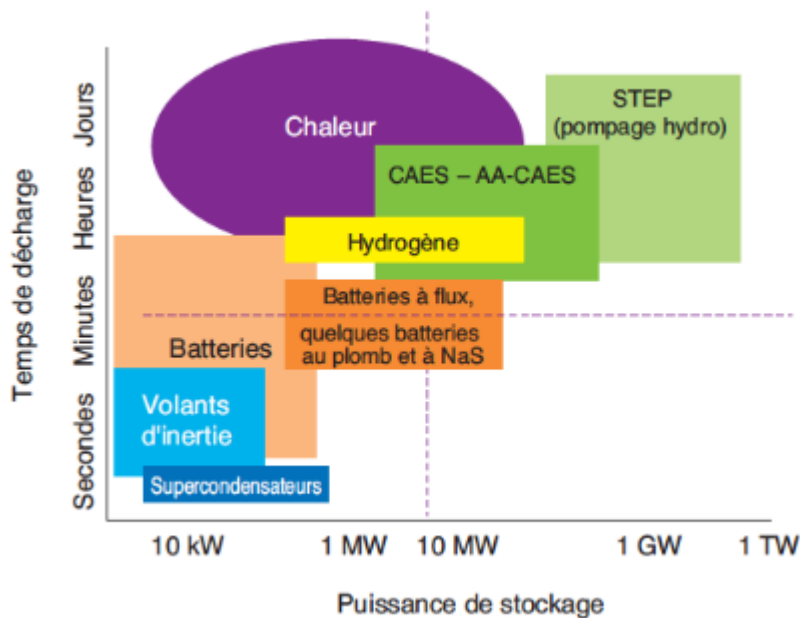


Figure I-11 : les technologies de stockage [12]

### I.2.3 Caractéristiques globales d'une STEP :

Une installation de stockage d'énergie par pompage caractérisée par :

L'énergie  $E$  maximale qui peut être stockée sous forme d'énergie potentielle.

La puissance électrique installée pour le pompage  $P_p$ .

La puissance électrique installée pour le turbinage  $P_t$ .

Le rendement global, qui est le rapport entre l'énergie électrique consommée  $E_p$  par le pompage pour stocker l'énergie  $E$  et l'énergie électrique produite  $E_t$  en mode turbinage, en consommant l'énergie potentielle  $E$  :  $\eta = E_t/E_p$

Le degré de flexibilité, c'est d'ajustement rapide de la puissance, en mode pompage comme en mode turbinage.

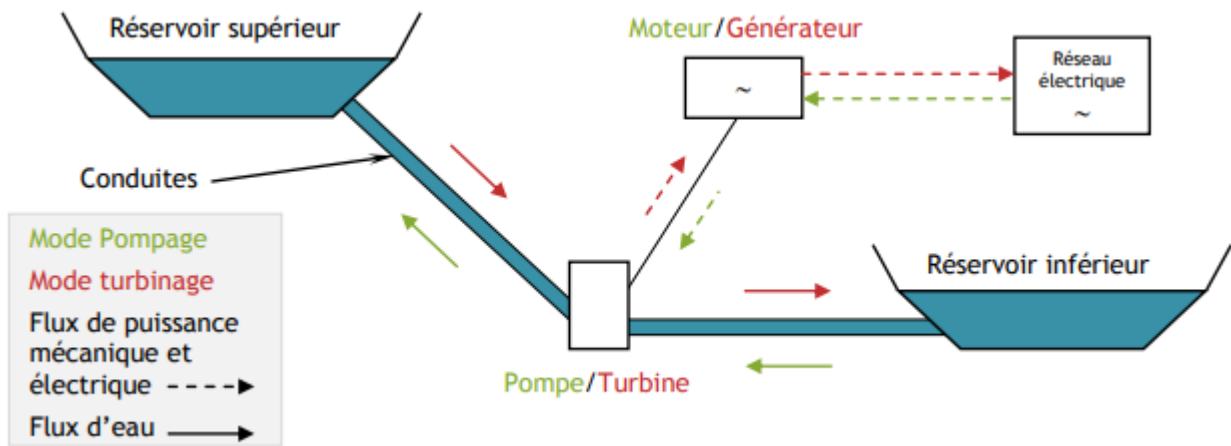


Figure I-12 : schéma principe d'une STEP en cycle fermé [13].

Dans les installations de STEP existantes, les puissances en pompage et turbinage sont généralement du même ordre de grandeur, un peu plus faibles en pompage qu'en turbinage, Le rendement est généralement de l'ordre de 75 à 80 % (80 % pour les plus récentes). Les hauteurs de chute  $H_b$  sont le plus souvent inférieures à 700 ou 800 m, ce qui semble constituer une limite pour l'utilisation des turbines-pompes à vitesse variable.

Il existe deux types de STEP. La turbine et la pompe peuvent fonctionner dans deux unités distinctes ou dans une seule unité appelée pompe-turbine réversible (RPT). Un RPT est une machine qui peut fonctionner à la fois comme une pompe et comme un turbine [14], Il a une efficacité inférieure, mais il n'a besoin que d'une seule machine pour charger et décharger qui réduisent les coûts. D'autre part, lorsque la pompe et la turbine sont séparées, le rendement est supérieur à celui du RPT, mais il est plus coûteux car il a besoin d'une pompe séparée et d'une turbine séparée et de plus de tuyauterie [15].

**L'efficacité** de ce système dépend des pertes par évaporation et les pertes de conversion. Parce que le réservoir supérieur est exposé au soleil, une partie de l'eau stockée est Évaporé. D'autre part, dans le fonctionnement de la pompe et de la turbine, il y a des pertes dues à la transformation de l'énergie [16], La technologie des variateurs de vitesse (VSD) permet aux unités STEP de stocker l'énergie de manière plus efficace. Avant le VSD, le STEP ne pouvait stocker l'énergie excédentaire que si la puissance excédentaire se situait dans la gamme de puissance nominale de la pompe, mais maintenant cette technologie permet au STEP de stocker une large gamme de puissance. Un VSD peut augmenter l'efficacité du STEP de 5% à 10% et la capacité de 15% à 20% [17].

### Les Avantages du STEP :

- 1) Flexible et fiable : les centrales de pompage-turbinage sont capables de réagir aux fluctuations du réseau dans les plus brefs délais en générant l'électricité nécessaire ou en absorbant tout excédent.
- 2) "Batterie verte" : Au stade actuel de la technologie, le stockage par pompage est la seule possibilité de stocker l'énergie de manière économiquement viable et à grande échelle.
- 3) Valeur économique élevée : les installations de pompage-turbinage fonctionnent à un niveau d'efficacité pouvant atteindre 82 %.
- 4) Durée de vie exceptionnelle de plus de 80 ans.
- 5) Concepts hybrides : combiner le STEP et l'éolien ou le solaire.
- 6) Concepts symbiotiques : énergie renouvelable et eau douce propre [18].

D'autre part, les STEP présentent un certain nombre **d'inconvénients** :

- 1) Le principal problème est qu'un STEP a besoin de deux réservoirs à deux hauteurs différentes [19].
- 2) STEP ne peut être mis en œuvre que dans des endroits avec des conditions géographiques spéciales. Ils ont besoin d'une source d'eau dans le réservoir inférieur et d'une hauteur géographique pour le réservoir supérieur.
- 3) Dans les zones au climat chaud, les pertes par évaporation diminuent l'efficacité de ce système [20].

### ZONE DE PRESENCE :

Dans le monde, il existe plus d'une soixantaine de STEP en activité ou en construction d'une capacité supérieure à 1 000 MW. Celles-ci sont principalement situées en Chine, au Japon et aux États-Unis. Citons notamment la STEP de Bath County en Virginie (États-Unis) qui dispose d'une capacité supérieure à 3 000 MW, soit l'équivalent de la puissance moyenne de trois réacteurs nucléaires.

En France, il existe 6 principales STEP en activité offrant une capacité d'appoint significative au réseau électrique national (par ordre de puissance de turbine) [21] :

- Grand 'Maison en Isère, d'une puissance en turbine de 1 790 MW.
- Montézic dans l'Aveyron (910 MW).
- Super-Bissorte en Savoie (730 MW).

- Revin dans les Ardennes (720 MW).
- Le Cheylas en Isère (460 MW).
- La Coche en Savoie (330 MW).

## I.2.4 Les équipement électromécanique d'une STEP :

### I.2.4.1 Turbines :

Une turbine hydraulique est une machine qui transforme l'énergie d'un écoulement d'eau en énergie mécanique au moyen d'un système de pales en rotation. Cette énergie mécanique peut être utilisée pour un générateur électrique. Une turbine simple se compose d'un seul rotor avec des pales, qui assurent l'échange d'énergie avec le flux. Les aubes de turbine deviennent le cours d'eau pour transformer l'énergie cinétique et l'énergie de pression, ou pour échanger la quantité de mouvement fluide avec un moment de force sur l'arbre. Dans la plupart des turbines hydrauliques, le débit d'eau est axial ou radial. Cependant, dans une turbine à courants croisés, l'eau traverse les aubes de la turbine deux fois dans le sens transversal, d'abord vers l'arbre puis en s'éloignant de celui-ci [22].

### Catégories des turbines :

**Turbine à action :** la turbine à action est reposée par le fait que l'énergie de l'aubage est totalement sous forme d'énergie cinétique. La pression reste constante entre l'eau et l'aubage (pression atmosphérique). La roue de la turbine est dénoyée et tourne dans l'air. Un jet entraîne les augets en exerçant une force pour les mettre en mouvement de rotation. Ce mouvement est transformé en couple et puissance mécanique sur l'arbre de la turbine. Comme la turbine Peltonet Banki.

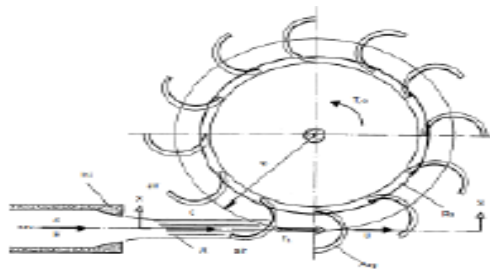


Figure I-13 : turbine a action [22]

**Turbine à réaction :** la turbine à réaction est une machine fermée. Elle utilise deux sources d'énergies ; une énergie cinétique qui est la vitesse de l'eau, et une deuxième énergie qui est la différence de pression. Le principe de fonctionnement de ce type est basé sur :

Création d'un tourbillon au moyen d'une bêche, d'aubages directeurs, ou les deux à la fois.

Récupération du mouvement circulaire du tourbillon par les aubages d'une roue en rotation qui dévient les filets d'eau pour leur donner une direction parallèle à l'axe de rotation.

Comme la turbine Francis, et Kaplan.

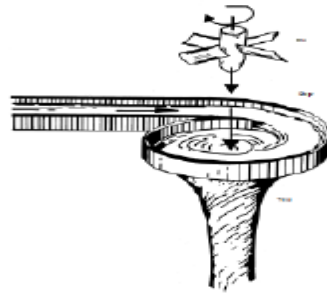


Figure I-14 : Turbine à réaction [22]

### Les principaux types de turbine :

**Les turbines Pelton :** Elles sont généralement utilisées pour les centrales de hautes chutes, à faible débit. Elles sont très peu présentes sous nos contrées. Une 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 ; leur nombre peut varier de 1 à 6.

Les injecteurs sont des tuyères convergentes munies d'un pointeau transformant l'énergie de pression en énergie cinétique. Ils sont disposés autour de la roue et de leur jet, à pression atmosphérique, est dirigé vers le milieu des augets, au « diamètre Pelton ». Une régulation du débit et un réglage du diamètre du jet peuvent être effectués en faisant varier la sortie du pointeau. La roue mobile tourne à pression atmosphérique, il n'y a plus de variation de pression du fluide dans cette roue. Mais lors de son passage dans la roue, l'eau est déviée de presque 180°, ainsi, elle cède toute son énergie cinétique.

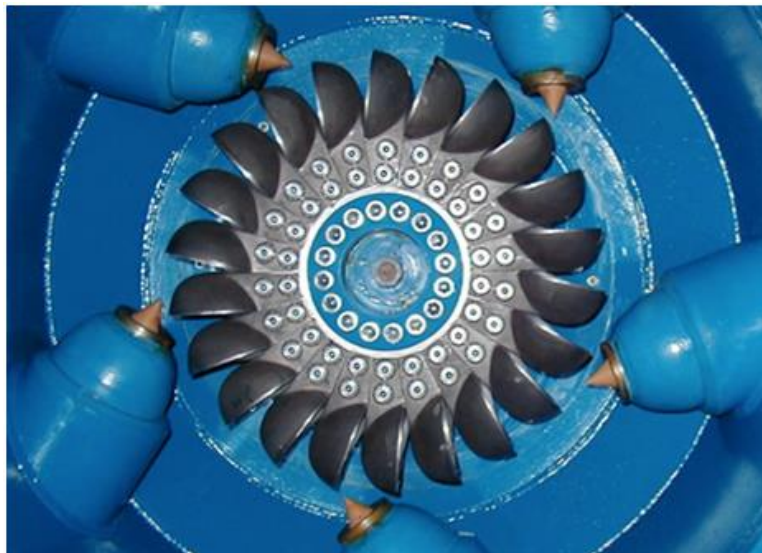


Figure I-15 : La turbine Pelton à 4 injecteurs [22]

**Les turbines Francis :** elles sont utilisées pour les moyennes chutes (de 30 à 400m) et les débits moyens. La turbine Francis est une turbine à réaction de type radiale 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).

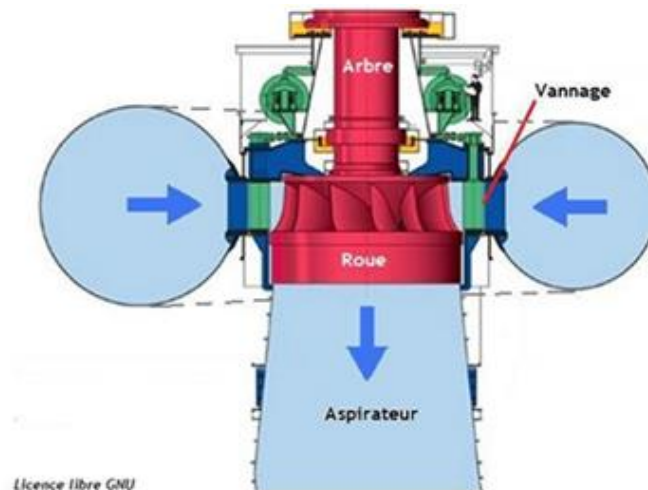


Figure I-16 : Schéma de principe de la turbine Francis [22]

**Les turbines Kaplan :** Elles sont répandues sur les basses chutes à débits importants, la turbine Kaplan est une turbine à réaction de type axial à axe vertical dont la majeure particularité est qu'il est possible de régler l'angle d'inclinaison des pales de manière à adapter le débit qui passe dans la turbine au débit de la rivière. Une variante de cette turbine est la turbine Bulb (qui est en fait une Kaplan à axe horizontal).

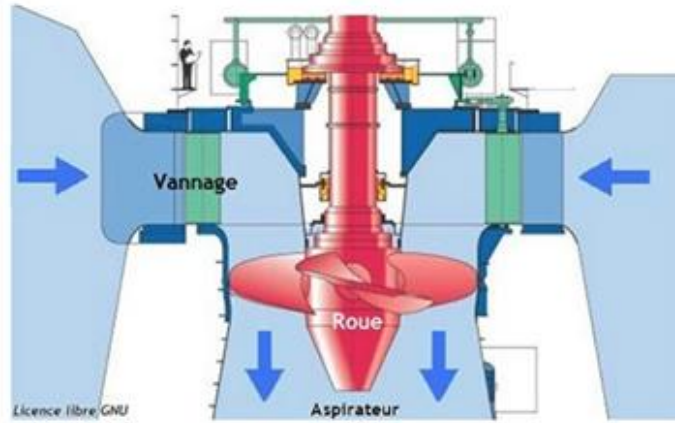


Figure I-17 : Schéma de principe de la Turbine Kaplan [22]

**Les turbines Banki-Michell (Crossflow) :** La relative simplicité de ce type de turbine réside dans l'écoulement bidirectionnel de l'eau. L'eau est injectée sur un rotor cylindrique à axe horizontal à travers un convergent rectangulaire ayant un secteur d'admission de maximum  $120^\circ$  [23]. L'écoulement est doublement dévié au contact des aubes périphériques, qui sont entraînées successivement par un flux radial centripète et radial centrifuge. L'est composée principalement en trois parties :

- 1) Une roue en forme de tambour, dotée d'aubes cylindriques profilées.
- 2) Un injecteur qui contient une aube profilée rotative pour assurer le réglage du débit. Cet injecteur est de section rectangulaire. Un contrepoids qui assure l'arrêt de la turbine sans énergie extérieure, et l'ouverture est assuré par un vérin hydraulique.
- 3) Une bâche recouvre la roue où les paliers de la turbine sont fixés.

Signalons un inconvénient puisque des travaux de terrassement, parfois importants, sont à prévoir lorsqu'on installe une machine de ce type puisqu'il faut l'installer au sec dans un local à un niveau hors crue.

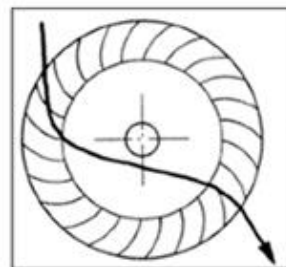


Figure I-18 : La turbine Banki ou Crossflow [22]



Le tableau I-2 suivant représente Résumé des principaux types et leurs caractéristiques :

Type	Hauteur de chute (m)	Débit (litres /seconde)
Kaplan	Basse chute	Grande débit jusqu'à 100000
Pelton	Hautes chutes	Faibles débits
Banki-Michell	Large gamme de hauteurs de 1 à 200	Large gamme de débits 20 à 10 000
Francis	Entre 40 et 200	30 000

**Choix de la turbine :** le schéma suivant représenté les différents types de turbines :

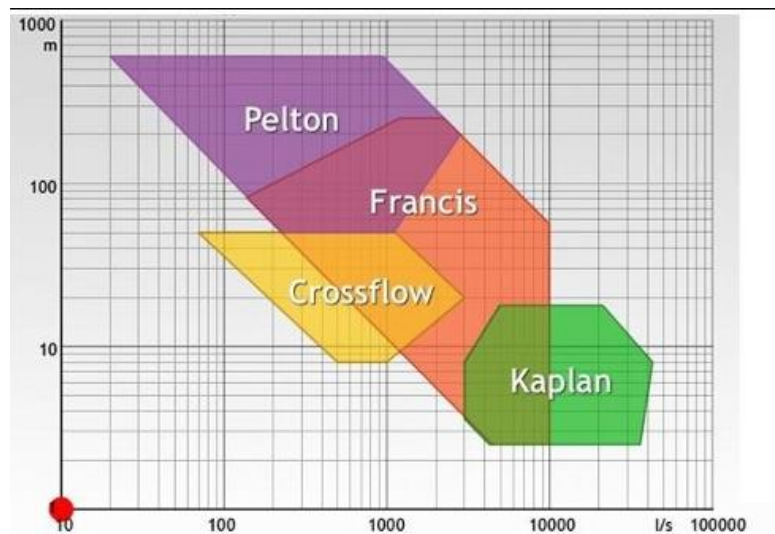


Figure I-19 : Les différents turbines hydrauliques [22]

#### I.2.4.2 Les multiplicateurs :

Lorsque la vitesse de rotation de la turbine est faible, en-dessous de 430tr/min on a besoin alors d'un multiplicateur pour augmenter cette vitesse. Il existe différents types de multiplicateurs :

- . Multiplicateur à engrenages coniques
- . Multiplicateur à arbres parallèles
- . Multiplicateur à courroie



### I.2.4.3 Alternateur :

Un alternateur transforme l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, ils sont des machines très puissantes en service dans les centrales hydrauliques. Un alternateur est composé de deux parties ; une partie mobile appelée ROTOR et une partie fixe appelée STATOR. Un alternateur correspond à l'association d'une bobine et d'un aimant qui peut tourner. Lorsque l'aimant tourne, ses pôles magnétiques sud et nord s'approchent puis s'éloignent successivement de la bobine ainsi l'apparition d'une tension aux bornes de cette dernière, c'est-à-dire lorsque le rotor tourne dans le stator, le mouvement des électrons consiste à créer un courant électrique.



Figure I-20 : alternateur d'une centrale hydraulique [23]

#### Les différents types d'alternateur :

Les principaux alternateurs utilisés dans les centrales hydrauliques (choix de l'alternateur) :

**Les machines synchrones à aimants permanents ou à rotor bobiné :** Ce type de génératrice est le plus utilisé pour créer une tension alternative sinusoïdale. Pour avoir une fréquence constante à la sortie de cette machine, il faut que le débit soit constant, à cause de cette condition il est obligatoire de faire un système de régulation de débit. Le rendement hydraulique global est diminué à cause des pertes de charge introduites par la vanne de régulation.

**Les machines synchrones à cage débitant sur un réseau ou sur charge isolée :** L'utilisation de ce type de génératrice est très limitée. Mais pour des raisons de coût les machines asynchrones sont relativement faibles comparées aux machines synchrones, donc il devrait se développer rapidement. En fonctionnement autonome, la génératrice asynchrone pose des problèmes importants de stabilité en tension et en fréquence. Il faut des capacités d'auto excitation pour magnétiser la machine, et le fonctionnement ne peut se faire qu'avec une plage de vitesse restreinte.

**Les machines asynchrones à double alimentation (MADA) :** La machine asynchrone à double alimentation MADA est utilisée dans les systèmes hydroélectriques ou dans les éoliennes. Elle peut être utilisée dans les applications à vitesse variable [23].

#### 1.2.4.4 Pompes :

##### Définition d'une pompe :

La pompe transforme l'énergie mécanique en énergie hydraulique. Il s'agit d'un dispositif qui prend de l'énergie d'une source (par exemple le moteur thermique, moteur électrique, etc.) et transforme cette énergie sous forme hydraulique.

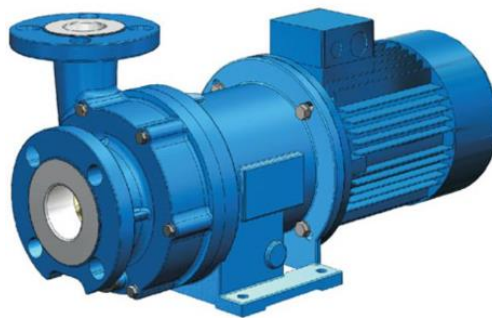


Figure I-21 : pompe du type centrifuge [24]

##### Pour cela il existe deux types de pompes :

- 1) Pompes **centrifuges** qui sont conçues pour des hauteurs limites, et des débits moyens et élevés.
- 2) Pompes **volumétriques** pour les grandes hauteurs et faibles débits.

##### Les pompes centrifuges :

**Définition :** la construction d'une pompe centrifuge est très simple. Cette pompe est constituée d'une pièce en rotation, le rotor tourne dans un carter (corps de pompe). A la sortie grâce à un divergent, l'énergie cinétique se transforme en pression motrice.

##### Avantages :

- Un bon rendement.
- Moins coûteuse.

- Une simple construction.
- Peu d'entretien.
- Un mauvais fonctionnement du circuit de refoulement, la pompe ne subit aucun dommage.

**Inconvénients :**

- En cas de fluide trop visqueux, la pompe ne fonctionne pas.
- La nécessité des dispositifs d'équilibrage.
- Cette pompe n'est pas auto-amorçant.

**Pompe volumétrique :**

Les pompes volumétriques se divisent en deux types, alternatifs et rotatifs :

**Pompes alternatives (à piston) :** Ce type de pompe est classé parmi les anciennes pompes. La pompe à piston utilise les variations de volumes occasionnées par le déplacement d'un piston dans un cylindre. Ce type de pompe nécessite un jeu de soupapes ou de clapets comme son nom l'indique pour obtenir l'aspiration dans le cylindre.

**Pompes rotatives :** Les pompes rotatives nécessitent deux rotors. Ces deux rotors tournent en roulant l'un sur l'autre sans glisser pour ne pas tomber dans le piège de frottement et déplacent un volume de fluide.

**Avantages :**

- Machine robuste.
- Rendement élevé.
- Fonctionnement normale en cas de liquide trop visqueux.
- Amorçage automatique.

**Inconvénients :**

- Machine coûteuse.
- Très lourde et plus encombrante.

- Demande plus d'entretien donc les frais augmentent.
- Impossibilité d'obtenir de gros débits sous faible pression.

### I.2.5 Inverseur électrique :

Un inverseur électrique, appelé aussi « inverseur de source » par les distributeurs d'appareillages électriques, est un organe permettant l'accessibilité à une seconde source d'énergie en cas de défaut de la source principale. Il garantit le bon fonctionnement d'une installation par la permutation de la source principale (réseau) sur une source secondaire de secours (groupe électrogène) [25].



Figure I-22 : un inverseur de source automatique [25]

Les inverseurs électriques peuvent être de 3 types [25] :

**Inverseur manuel** : l'utilisateur doit lui-même enclencher l'inverseur électrique (l'inverseur de source) sur la seconde source dite « de secours ». Un simple geste suffit pour l'inversion des sources, mais il nécessite l'intervention d'une personne.

**Inverseur automatique ou motorisé** : un inverseur télécommandé est associé à un automatisme pour piloter les sources selon des modes programmés (gestion de permutation des sources, régulation, etc.).

**Inverseur télécommandé** : l'inverseur électrique ne nécessite aucune intervention humaine. Le basculement de source est piloté électriquement.

### **I.2.6 Les STEP 's dans le monde :**

Au niveau mondial, 99% du stockage stationnaire de l'énergie électrique est assuré par les STEP. Les systèmes de stockage par pompage hydraulique totalisaient une capacité de près de 127 GW dans le monde en 2011, pour 400 STEP en 46 MW pour l'ensemble Européen, 45 en Asie, 21 aux Etats Unis. La Chine est le pays le plus en pointe dans ce domaine : en 2009, elle comptait 22 STEP pour une puissance installée de 11 GW qui devrait être portée à 50/60 GW en 2020. En Europe tous les pays qui développent de façon massive leur production d'énergie intermittente ont des besoins importants de stockage.

Les études prospectives de l'AIE prévu un fort développement du potentiel hydraulique existant, spécialement en Afrique, Asie et Amérique Latine, ce qui conduirait d'ici 2050 à un doublement de la puissance installée soit plus de 2000 GW pour une production globale qui pourrait atteindre 7000 TWh. Dans ce cadre [26].

### **I.3 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté l'énergie photovoltaïque et stations de transfert par pompage (STEP), ensuite nous avons entamé leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et les différentes catégories de systèmes.

## Chapitre II :

### Estimation et dimensionnement du système

#### PV-STEP

##### II.1 Introduction :

Les systèmes de stockage sont des composants clés des systèmes autonomes systèmes hybrides d'énergie renouvelable en raison de la nature intermittente de ressources renouvelables. Dans la conception d'un système hybride autonome (PV-STEP), le système de stockage doit être dimensionné de manière optimale pour garantir la qualité de l'alimentation, la fiabilité du système et un approvisionnement énergétique rentable.

La modélisation du système est une étape très importante avant la conception, la simulation et l'optimisation du système. Le système solaire photovoltaïque autonome proposé avec stockage par pompage est présenté dans **la figure** suivant :

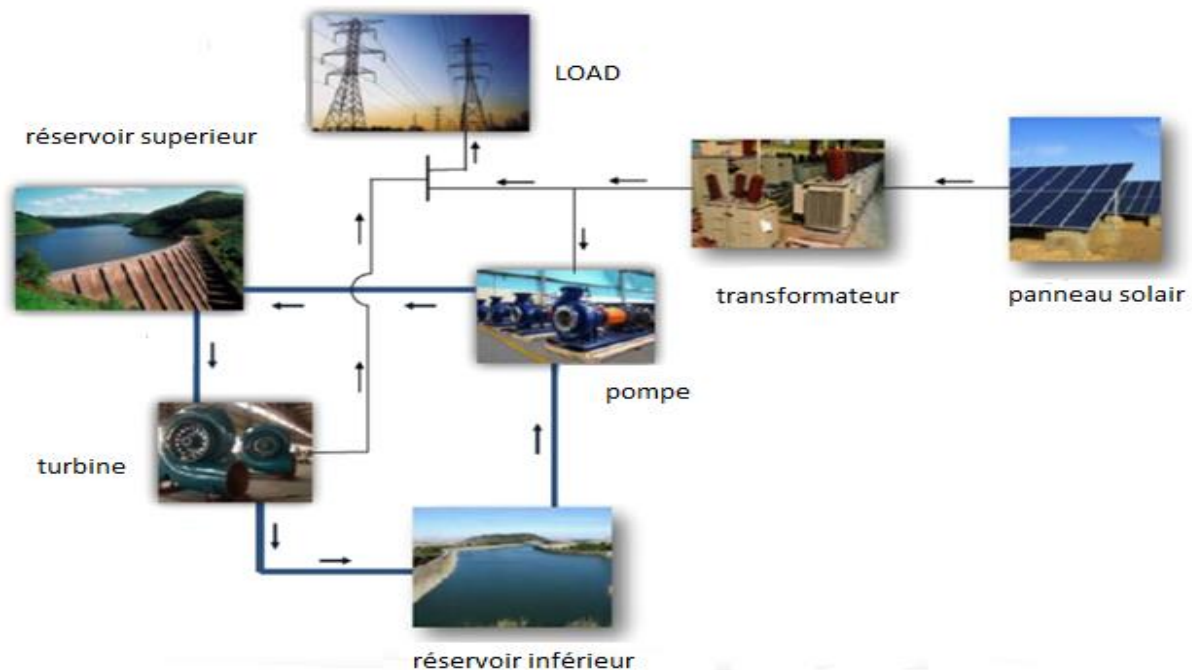


schéma represent le systeme PV-STEP

Figure II-1 : représente le système PV-STEP [27]

Les principaux composants du système comprennent un générateur d'énergie (groupe photovoltaïque), un sous-système de stockage d'énergie (stockage par pompage avec deux réservoirs, pompes et turbines/générateurs), un utilisateur (charge) et une station de contrôle. L'ensemble du système est régulé par le centre de contrôle, qui est l'élément essentiel du système global de gestion de la charge et de distribution d'énergie.

Comme illustré, lorsque la production d'énergie solaire est supérieure à demande d'énergie, le surplus d'énergie est utilisé pour pomper l'eau d'un réservoir bas vers un réservoir haut, stockant l'énergie sous forme d'énergie potentielle gravitationnelle de l'eau (mode charge/pompage). Lorsque l'électricité doit être distribuée, l'eau est autorisée à refluer vers le bas à travers les turbines, libérant l'énergie stockée vers la charge (mode décharge/génération) [27].

De cette façon, une alimentation électrique durable et continue être fourni jour et nuit, et les problèmes environnementaux potentiels des batteries peuvent être évités.

### **II.2 Conception du système et Méthode de dimensionnement :**

#### **Modélisation du système de pompage-turbinage (STEP) :**

Il a été observé dans la littérature que les deux variables les plus significatives pour la conception des systèmes pompés sont le volume du réservoir supérieur et la différence de hauteur entre le réservoir supérieur et inférieur [28].

L'équation de Bernoulli est l'une des équations les plus utiles qui est appliquée dans une grande variété de problèmes liés à l'écoulement des fluides. Cette équation peut être dérivée de différentes manières. Sous une forme simple, l'équation de Bernoulli relie la pression, la vitesse et l'élévation entre deux points quelconques du champ d'écoulement [29].

**La formule du principe de Bernoulli sans pertes est donnée comme suit :**

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 \quad (\text{II.1})$$

#### **Équation de Bernoulli avec pertes :**

Si le système de tuyauterie comporte d'autres types d'accessoires (coudes, vannes clapé anti retour) ; nous pouvons calculer la perte de charge  $\Delta h$  :

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 + \Delta h = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 + \Delta h \quad (\text{II.2})$$

Où  $\Delta h$  : perte de charge qui peut être calculée en utilisant l'équation suivante :

$$\Delta h = K * \frac{v^2}{2g} \quad (\text{II.3})$$

Quelques valeurs du coefficient K en fonction de la forme du tuyau sont illustrées dans le tableau II-1 ci-dessous [30] :

Accessoire	Coefficient K
Jonction du réservoir à tuyauterie connexion au ras de la paroi	0,5
Jonction de tuyauterie au réservoir	1,0
Coude 45°	0,35 à 0,45
Coude 90°	0,50 à 0,75
Tés	1,50 à 2,00
Vannes de contrôle (ouverte)	3,0

### II.2.1 La puissance fournie par la turbine (Mode de génération) :

La puissance de sortie de la turbine hydroélectrique est totalement dépendante de la hauteur de chute h et du débit f disponible sur le site. La puissance de sortie P est donnée approximativement par l'équation suivante :

$$P = \eta \cdot \rho \cdot F \cdot g \cdot h \quad (\text{II.4})$$

### II.2.2 Mode de pompage :

L'apport d'énergie pour les pompes provient directement des panneaux photovoltaïques, et donc du débit d'eau aspiré du réservoir bas peut être exprimé comme suit [31] :

$$F_p(t) = \frac{\eta_p \cdot P_{pv}(t)}{\rho g h} = c_p \cdot P_p(t) \quad (\text{II.5})$$

Par conséquent, le coefficient global de pompage de l'eau  $C_p$  peut être déterminé comme suit :



$$C_p = \frac{np}{\rho gh} = \frac{Q}{P_{pv}} \quad (\text{II.6})$$

### II.2.3 Capacité de Réservoir supérieur :

La quantité d'eau stockée dans le réservoir supérieur à l'instant  $t$  est déterminé théoriquement par :

$$Q_{rs}(t) = Q_{rs}(t-1)(1-\alpha) + \int_{t-1}^t qp(t)dt - \int_{t-1}^t qt(t)dt \quad (\text{II.7})$$

Le niveau d'eau dans le réservoir supérieur peut être considéré comme l'état de charge (SOC) du réservoir de stockage. Par conséquent, le SOC du système de stockage s'exprime comme suit :

$$\text{SOC}(t) = \frac{Q_{rs}(t)}{Q_{rs\max}} \quad (\text{II.8})$$

La quantité d'eau du réservoir supérieur est également soumise aux contraintes suivantes :

$$Q_{rs\min} \leq Q_{rs} \leq Q_{rs\max} = V_{rs}$$

Où  $Q_{rs\min}$  et  $Q_{rs\max}$  sont les limites inférieures et supérieures de Réservoirs, et  $V_{rs}$  est le volume (capacité de stockage) du réservoir d'eau (m<sup>3</sup>) [31].

### II.3 Estimation des besoins annuels en énergie électrique pour une maison algérienne moyenne :

Le tableau II-2 suivant représenté les appareils consommé pendant la nuit.

Appareils	puissance	nombre	Duré	Journalier Wh/j
Lampe LED	10W	6	4h	240wh
TV LCD	150W	2	3h	900wh
Frigidaire	100W	1	6h	600wh
Climatiseur	1000W	1	2h	2000wh
PC	100W	1	2h	200wh
Chargeur Phone	20W	3	2h	120wh

En supposant que les besoins nocturnes en énergie électrique d'une maison algérienne moyenne soient inférieurs à **1620 W**, en particulier après minuit, un système hydroélectrique de **1700 W** pourrait facilement

## Chapitre II : Estimation et dimensionnement du système PV-STEP

satisfaire les besoins annuels en énergie électrique. Cette consommation d'énergie est principalement pour un réfrigérateur de **100W**, une TV de **150W**, un PC de **100W**, climatiseur **1000W**, chargeur téléphone **20W** et quelques lampes LED **10W**. Ces **500W** sont la puissance que la turbine doit fournir pendant une certaine période de temps souhaitée. Dans ce cas, nous devons calculer la capacité du réservoir supérieur (similaire au réservoir inférieur) pour maintenir le débit d'eau descendant pendant cette période. En supposant que cette période souhaitée est  $T = 6H$  et une hauteur de chute de 250m, alors le débit  $f$  et la capacité  $C$  (en litres) du réservoir peuvent être déterminés à l'aide de l'équation (II.4), d'où :

$$F = P/\eta \cdot p \cdot g \cdot h = 1700/0.90 \cdot 9.81 \cdot 250 = 0.77 \text{kg/s} \quad (\text{II.8})$$

Et

$$C = P/\eta \cdot g \cdot h \cdot T = F \cdot 6h \cdot 60 \cdot 60 = 16640 \text{ (L)} \quad (\text{II.9})$$

Ces résultats sont tout à fait possibles si nous pouvions construire des réservoirs plus élevés au sommet des montagnes ou à côté des bâtiments. En fait, il existe une région en Algérie appelée Hauts Plateaux qui se trouve à plus de **1000 m** au-dessus du niveau de la mer. Les hauts plateaux se situent entre les chaînes du Tell et de l'Atlas saharien et s'étendent sur environ **600 km** de la frontière marocaine à l'ouest à la frontière tunisienne à l'est, comme indiqué en violet dans la figure suivante.

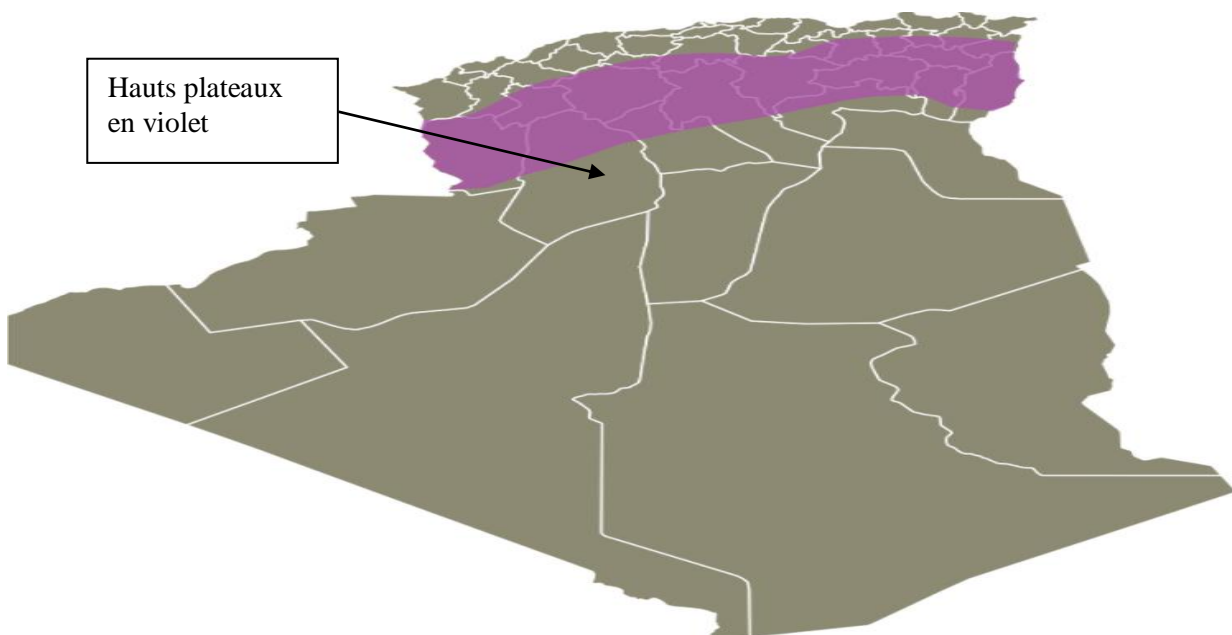


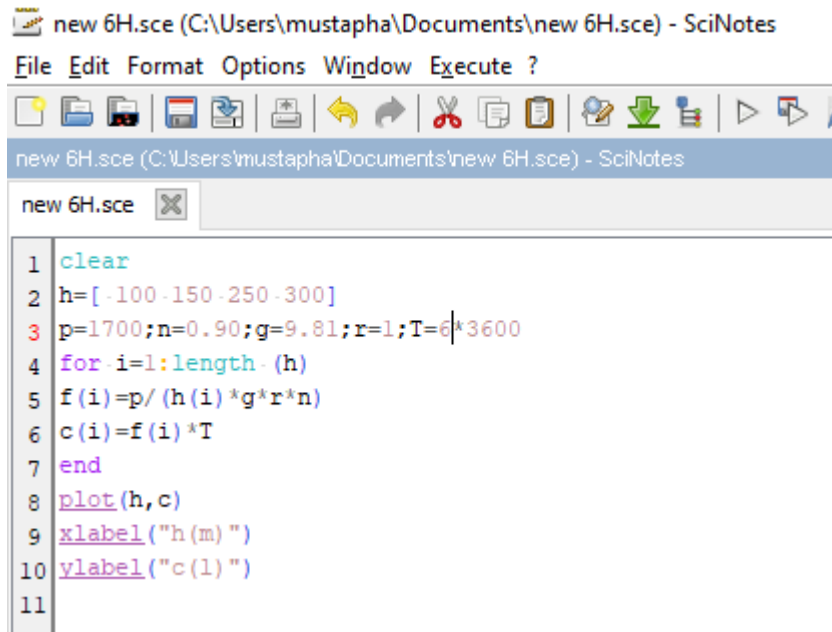
Figure II-2 : Carte géographique algérienne, Hauts Plateaux en violet

## II.4 Comportement du STEP en fonction des paramètres :

Le programme suivant permet d'estimer la capacité du réservoir supérieur en fonction de la hauteur tout en fixant la période et la puissance de la turbine. Les résultats pour chaque durée pendant la nuit sont montrés sur les figure (II-4 ; II-6 ; II-8) ci-dessous. Les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel Scilab (version 5.5.2).

a) pour une période fixée  $T=6H$  pendant la nuit :

1) Programme :



```

1 clear
2 h=[-100-150-250-300]
3 p=1700;n=0.90;g=9.81;r=1;T=6*3600
4 for i=1:length(h)
5 f(i)=p/(h(i)*g*r*n)
6 c(i)=f(i)*T
7 end
8 plot(h,c)
9 xlabel("h(m)")
10 ylabel("c(l)")
11
    
```

Figure II-3 programme d'estimation pour 6h

2) Résultats obtenus par le programme précédent :

Tableau II-3 : résultats de Programme pour 6h

Période	Hauteur(m)	Débit(kg/s)	Capacité de réservoir(L)
6H	100m	1.925	41580
	150m	1.2836	27730
	250m	0.77	16640
	300m	0.64	13830

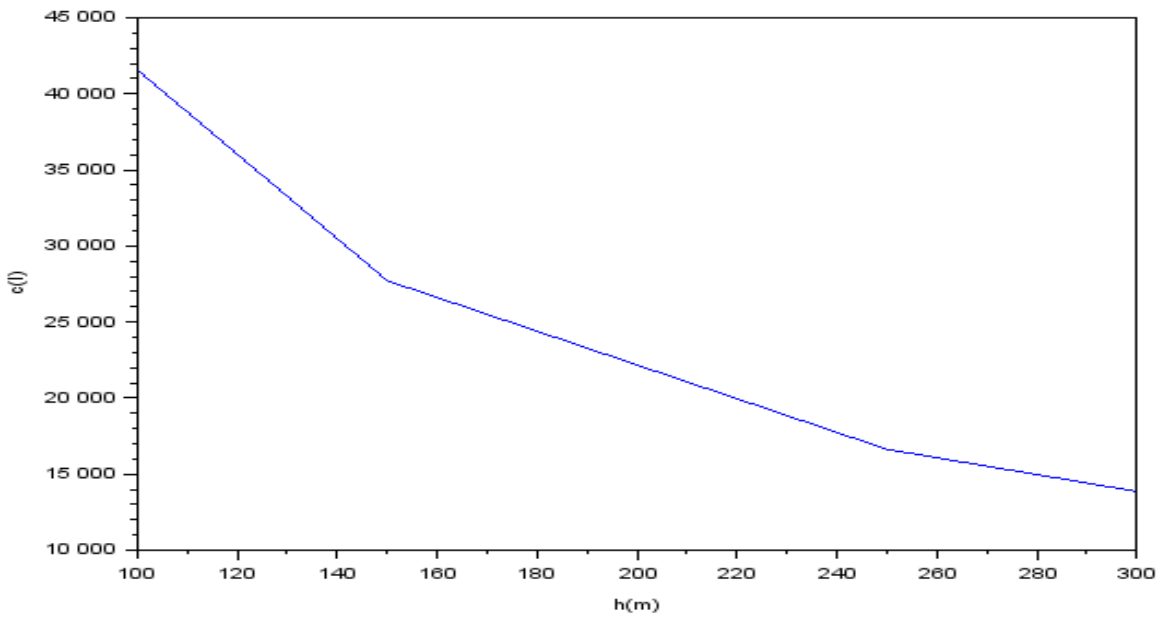


Figure II-4 : variation de la capacité en fonction de la hauteur : cas durés 6h

b) pour une période fixée  $T=8H$  pendant la nuit :

1) Programme :

```

6h.sce (C:\Users\mustapha\Documents\6h.sce) - SciNotes
File Edit Format Options Window Execute ?
6h.sce (C:\Users\mustapha\Documents\6h.sce) - SciNotes
6h.sce [X]
1 clear
2 h=[100 150 250 300]
3 p=1700;n=0.90;g=9.81;r=1000;T=8*3600
4 for i=1:length(h)
5 f(i)=p/(h(i)*g*r^n)
6 c(i)=f(i)*T
7 end
8 plot(c,h)
9
10
    
```

Figure II-5 programme d'estimation pour 8h

2) Résultats obtenus par le programme précédent :

Tableau II-4 : résultats de Programme pour 8h

Période	Hauteur(m)	Débit (kg/s)	Capacité de réservoir(L)
	100m	1.925	55450

8H	150m	1.2836	36970
	250m	0.77	22180
	300m	0.64	18440

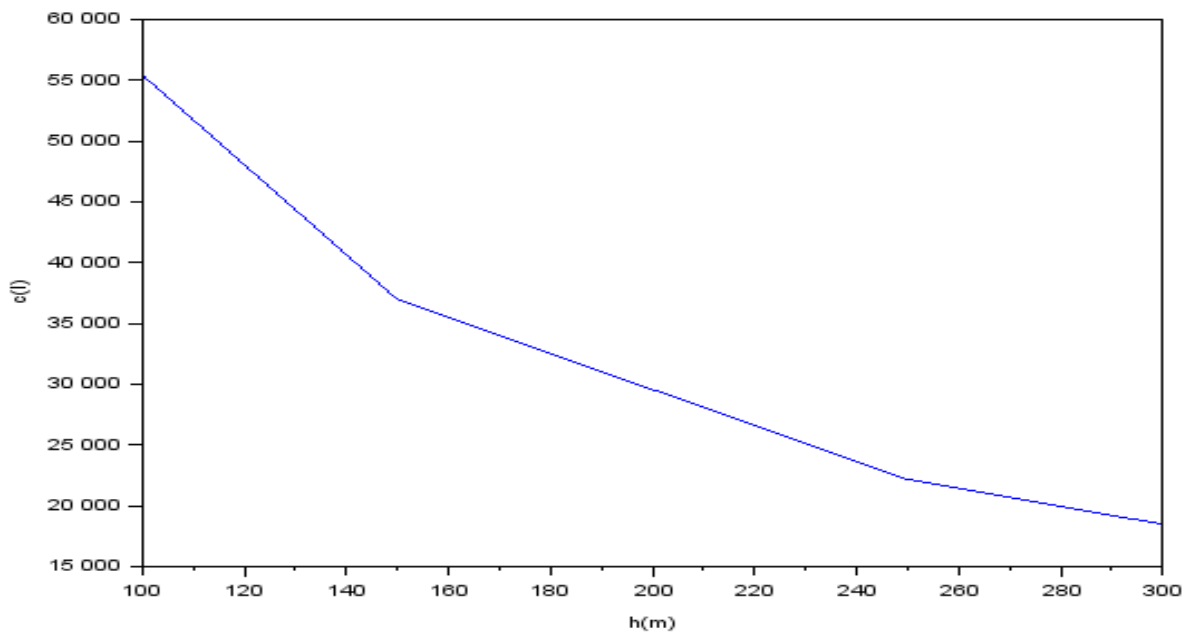


Figure II-6 : variation de la capacité en fonction du la hauteur : cas durés 8h

**b) pour une période fixée T=14H pendant la nuit d'été :**

Le tableau II-5 suivant représenté les appareils consommé pendant la nuit d'été :

Appareils	puissance	Nombre	duré
Lampe LED	10W	6	4h
TV LCD	150W	2	3h
Frigidaire	100W	1	14h
Chauffage électrique	2000W	1	4h
PC	100W	1	3h
Chargeur Phone	20W	3	2h

Donc puissance générée par la turbine est :  $p_t=2700w$

1) Programme :

```

1 clear
2 h=[ -100 -150 -250 -300]
3 p=2700;n=0.90;g=9.81;r=1;T=14*3600
4 for i=1:length(h)
5 f(i)=p/(h(i)*g*r*n)
6 c(i)=f(i)*T
7 end
8 plot(h,c)
9 xlabel("h(m) ")
10 ylabel("c(l) ")

```

Figure II-7 programme d'estimation pour 14h

2) Résultats obtenus par le programme précédent :

Tableau II-6 : résultats de programme pour 14h :

Période	Hauteur(m)	Débit (kg/s)	Capacité de réservoir(L)
14H	100m	3.058	154130
	150m	2.04	102760
	250m	1.22	61660
	300m	1.02	51380

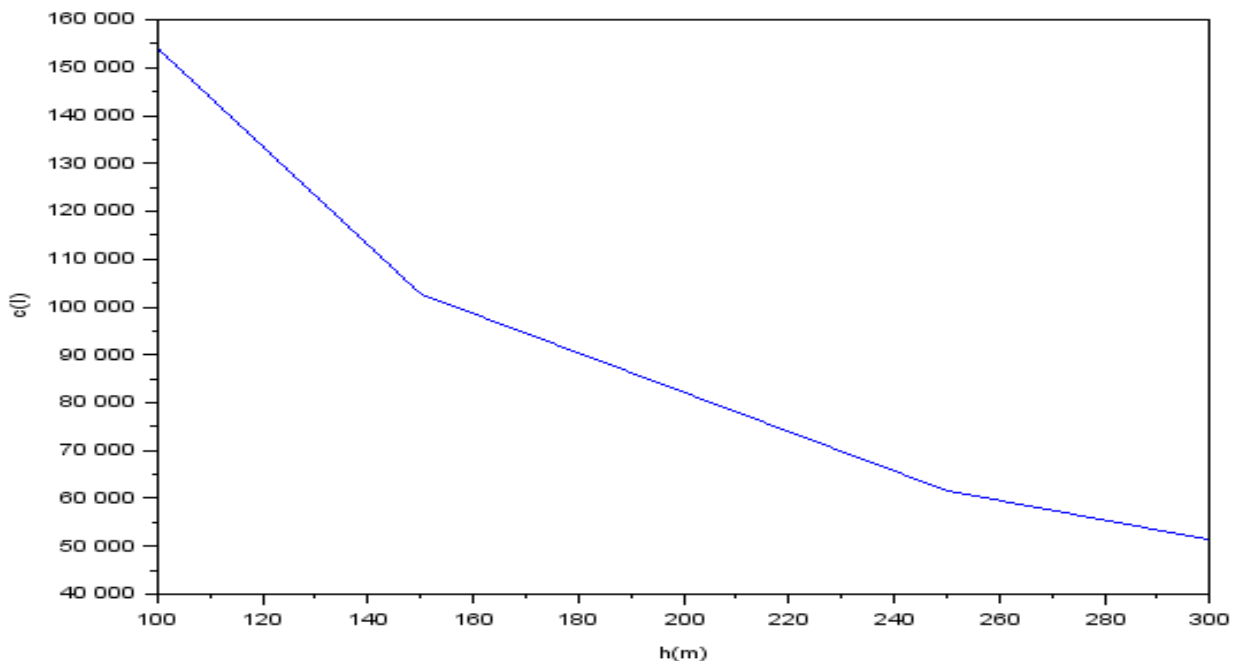


Figure II-8 : variation de la capacité en fonction du la hauteur : cas durés 14h

Commentaire :

Nous avons terminé avec l'estimation des besoins en énergie électrique pour une maison algérienne moyenne, nous avons découvert que plus le réservoir supérieur est élevé moins nous avons besoin de capacité pour produire de l'électricité pendant la nuit.

## II.5 Dimensionnement du micro STEP-PV :

### II.5.1 Partie 1 : dimensionnement du STEP :

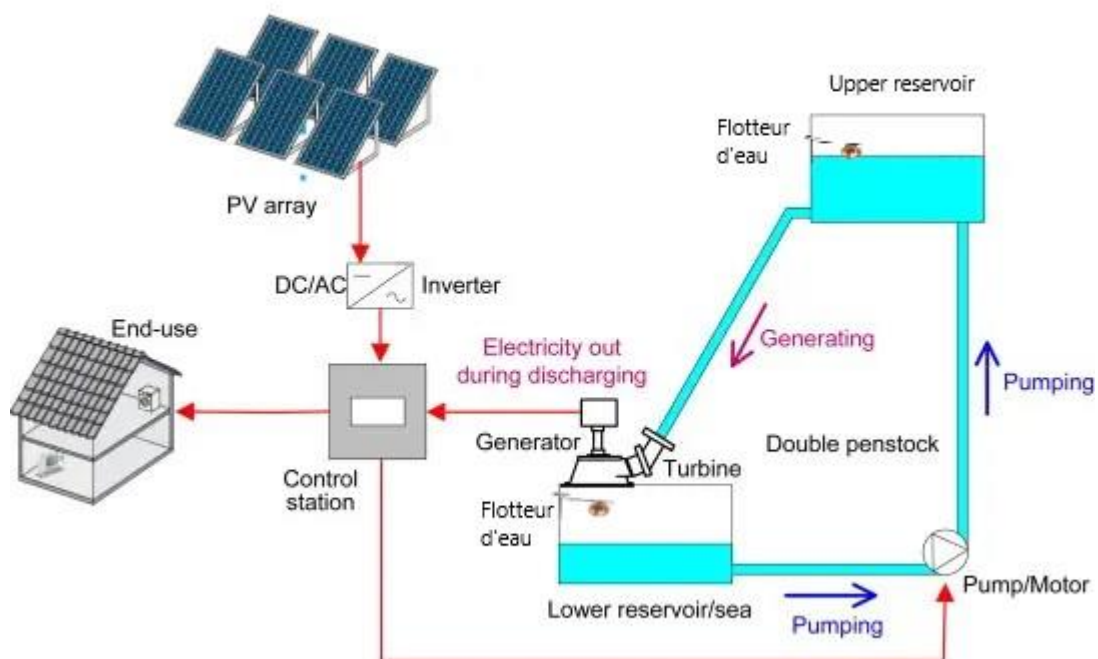


Figure II-9 : schéma de micro STEP-PV pour une maison

Micro STEP-PV : est composé des panneaux solaires, onduleur, contrôleur, turbine/générateur, pompe, réservoirs supérieur et inférieur et flotteur d'eau plus les tuyaux avec leur accessoire tels que valves et clapé anti retour.

#### **Exemple :**

Dans cet exemple nous avons choisi la hauteur entre deux réservoirs de 30 mètres et d'un diamètre de tuyau ( $D=15\text{cm}$  ;  $V=0.4\text{m/s}$ ) .donc nous avons besoin d'une turbine de 1.7kw pour alimenter la maison pendant la nuit d'une durée 6h, on va donc calculer la capacité du réservoir nécessaire pour ce système et la puissance de la pompe nécessaire pour remplir le réservoir supérieur pendant la journée, on utilisant l'équation du Bernoulli suivante :

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 + \frac{P}{\rho g Q} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \quad (\text{II.1})$$

$$F = \frac{P}{n \cdot \rho \cdot g \cdot h} = \frac{1700}{0.9 \cdot 1000 \cdot 9.81 \cdot 30} = 0.0064 = 6.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = \mathbf{6.4 \text{ l/s}} \quad (\text{II.8})$$

$$C = F \cdot T = 6.4 \cdot 10^{-3} \cdot 6 \cdot 3600 = \mathbf{138.4 \text{ m}^3}$$

**Le Calcul de la puissance de la pompe pour une hauteur H=30m :**

Le débit de la pompe est donné par :

$$F = V \cdot S = 0.4 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 0.4 \cdot \frac{3.14 \cdot 1.5^2}{4} = \mathbf{7 \text{ l/s}} \quad (\text{II.9})$$

On applique l'équation de Bernoulli entre la surface des deux réservoirs :

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \Rightarrow \frac{P_A}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2g} + h_1 = \frac{P_B}{\rho g} + \frac{V_B^2}{2g} + h_2$$

$$\Rightarrow P = Q \rho g (h_2 - h_1) = 7 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 9.81 \cdot 30 = \mathbf{2.06 \text{ kw}}$$

En introduisant le rendement pompe-moteur ( $\eta_{\text{pompe}} = 80\%$ )

$$P_{\text{elec}} = \frac{P}{\eta_{\text{pompe}}} = \frac{2.06 \cdot 10^{-3}}{0.80} = \mathbf{2.575 \text{ kw}}$$

Donc il nous faut une pompe de puissance **2.6kw**

## II.5.2 Partie 2 : dimensionnement du système PV :

### Introduction :

Le dimensionnement d'un générateur PV a pour but de déterminer l'optimum technico- économique entre la puissance crête du champ des panneaux solaires liés aux besoins électriques de l'utilisateur d'une part, et d'autre part des données d'ensoleillement du site et du prix et de la qualité des composants.

Dans la 2ème partie du dimensionnement, le travail que nous avons effectué est penché vers le dimensionnement des composants suivants de notre système PV :

Le champ PV.

Les câbles.

L'onduleur.

Régulateur



### Calcul de la consommation énergétique :

Les besoins seront déterminés à partir des équipements électriques existants dans la maison, en doit identifier les puissances et la consommation qui l'on a besoin par jour.

### Les besoins de l'application en énergie :

Il est indispensable de connaître précisément le besoin en énergie d'une installation avant de passer au dimensionnement afin de concevoir un système photovoltaïque adapté. Au vu du coût encore élevé du watt solaire, Il est souhaitable d'éviter de sur-dimensionner le système photovoltaïque en privilégiant l'économie d'énergie au niveau des récepteurs. La puissance photovoltaïque du générateur à installer est déduite du calcul de la consommation de l'application. Le calcul de dimensionnement prend en compte la puissance, la tension des appareils ainsi que la durée d'utilisation. Tous les consommations disponibles (lampes, radio, réfrigérateur, ordinateur, etc.) sont listées en précisant leur tension, leur puissance et leur durée d'utilisation par jour.

Il faut rajouter un onduleur CC/CA, devenant lui-même un consommateur d'énergie non négligeable (marche/mode veille) à prendre en compte dans le bilan global de la consommation. Pour chaque appareil consommateur, la consommation journalière (en Wh/j), est définie à partir de sa puissance (en W) et de sa durée d'utilisation (en h/j), afin d'en déduire la consommation totale journalière.

Le tableau II-7 suivant décrit la consommation d'énergie par jour [33] :

APPAREILS	NOMBRES	PUISSANCES (W)	Durée utilisation (heures)	ENERGIES (WH /jour)
Ampoule LED	4	10	2h	80wh/j
Chargeur téléphone	3	20w	1h	60wh/j
Chargeur PC	1	100W	2h	200wh/j
TV (LCD)	2	150W	4H	1200wh/j
Réfrigérateur	1	100w	12H	1200wh/j
Climatiseur	1	1000W	4H	4000wh/j

POMPE STEP	1	2.6kw	4h	10400wh/j
------------	---	-------	----	-----------

La consommation totale journalière d'énergie de l'application est calculée en additionnant la Consommation journalière de chaque récepteur :

$$80+60+200+1200+1200+4000+10400=17140\text{wh/j}$$

Besoins journalier : 17140wh

Besoins mensuels :  $17140\text{wh} \times 7 \times 4 = 479920\text{wh}$

Besoins annuels :  $479920\text{wh} \times 12 = 5759040\text{wh} = 2.264640\text{MWh}$

### Détermination d'irradiation du site pour le dimensionnement :

#### Période de l'ensoleillement :

Plus la puissance lumineuse (ensoleillement) augmente, plus la puissance générée par la cellule PV augmente aussi. D'autre part plus la température des cellules augmente, plus la puissance générée par les cellules est faible. La carte ci-dessous nous montre l'ensoleillement moyen annuel.

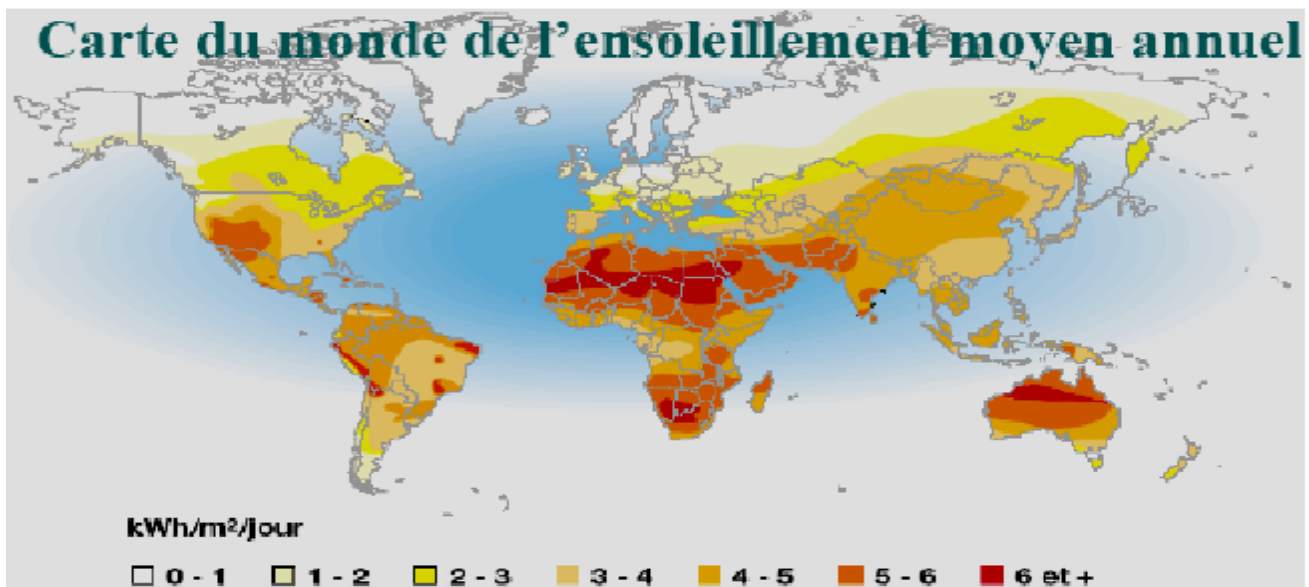


Figure II-10 : Représentation de l'irradiation moyenne dans le monde [33]

L'énergie solaire est définie par le produit du nombre d'heure équivalente (la durée d'ensoleillement

maximale pendant une journée par le rayonnement de référence 1000W/m<sup>2</sup>) [34].

$$E_{sol} = N_e * 1000$$

(Soit  $N = N_e / 1000$ )

$$\text{Soit } N_e = E_{sol} / 1000$$

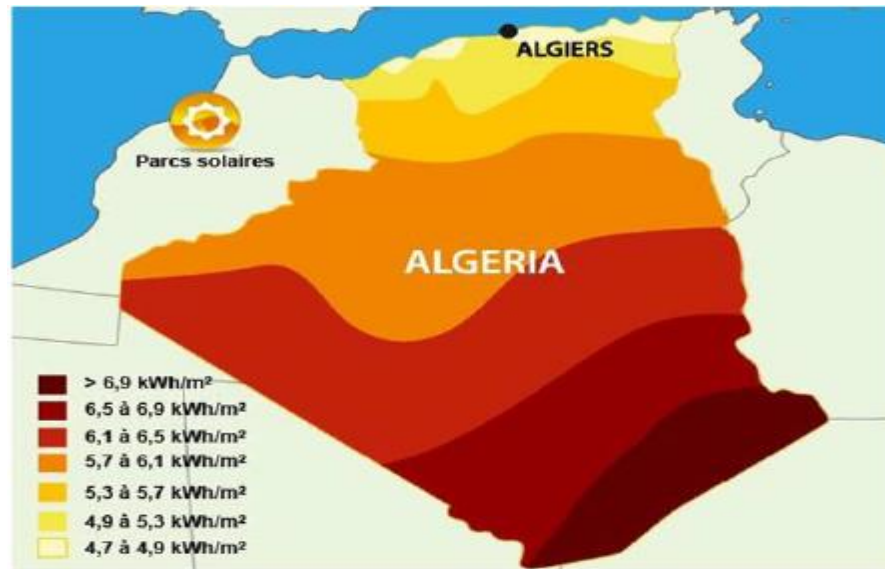


Figure II-11 : représente rayonnement global moyen annuel en Algérie [34]

**Le coefficient de perte :**

Tableau II-8 suivant présente les différents types de pertes énergétiques :

Type de perte :	Pourcentage :
Pertes par salissure	5%
Pertes Onduleur	10%
Pertes de câbles	1%

**Irradiation moyenne dans l'année :**

## Chapitre II : Estimation et dimensionnement du système PV-STEP

Pour optimiser la production l'énergie d'une installation solaire, Il est important d'estimer l'orientation et l'inclinaison du panneau solaire.

**L'orientation** : est l'angle entre le panneau solaire et l'axe plein Sud. À  $0^\circ$  l'angle d'orientation correspond à un panneau faisant face au Sud, à  $90^\circ$  à l'Est ou l'Ouest, à  $180^\circ$  au Nord [35].

**L'inclinaison** : est l'angle entre le plan du panneau solaire et le sol. Un panneau incliné à  $0^\circ$  est à plat contre le sol ou horizontal, un panneau à  $90^\circ$  est à la verticale [35].

Le logiciel Pvsys permet de faire des mesures et dimensionnement (en choisie la wilaya de Mostaganem pour faire notre projet,) :

La figure suivante illustre les résultats pour la ville de Mostaganem :

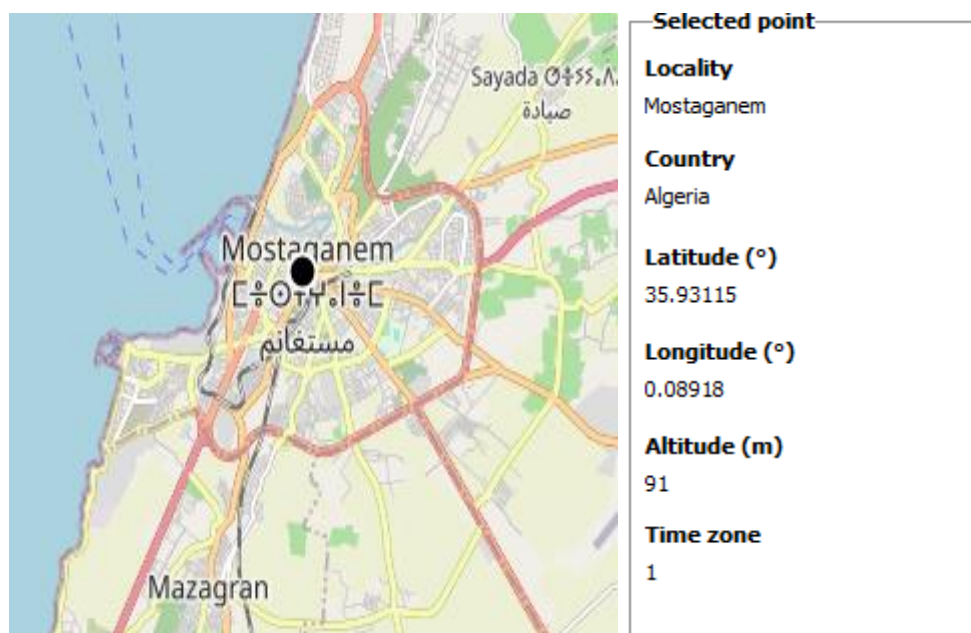


Figure II-12 : représente les données du site Mostaganem

**Les données météorologiques du site de Mostaganem :**

	<b>Global horizontal irradiation</b> kWh/m <sup>2</sup> /mth	<b>Horizontal diffuse irradiation</b> kWh/m <sup>2</sup> /mth	<b>Temperature</b> °C	<b>Wind Velocity</b> m/s	<b>Linke turbidity</b> [-]	<b>Relative humidity</b> %
January	81.8	27.3	10.6	2.90	2.651	79.9
February	96.7	39.8	11.6	3.30	2.934	76.4
March	144.3	57.6	14.2	3.50	3.726	72.4
April	173.5	72.5	16.3	3.70	4.005	70.1
May	196.2	86.9	20.0	3.70	4.501	64.8
June	215.5	86.8	23.9	3.80	4.893	61.8
July	218.6	88.0	27.6	3.59	6.040	57.0
August	201.4	77.1	27.8	3.39	5.223	59.5
September	154.0	61.7	24.0	3.10	4.500	67.7
October	122.6	50.6	20.5	2.69	3.741	70.7
November	84.2	32.2	14.7	2.90	3.132	76.4
December	72.8	26.9	11.8	2.60	2.752	80.2
<b>Year</b> ?	<b>1761.6</b>	<b>707.4</b>	<b>18.6</b>	<b>3.3</b>	<b>4.008</b>	<b>69.7</b>

**Global horizontal irradiation year-to-year variability 2.9%**

Figure II-13 : tableau du météo du site Mostaganem

**Calcul de l'énergie à produire pour l'alimentation électrique :**

**L'énergie produit journalière :**

Energie produit= consommation journalier/ efficacité d'onduleur =Ec/0.90

L'efficacité de l'onduleur est donnée entre 80 % et 95 %. Pour nos calculs nous avons choisi la valeur une efficacité de 0,90%. Il faut rajustez cette valeur au besoin, lorsque on choisit le modèle d'onduleur.

$$E_p = 17140 \text{wh} / 0.9 = 19045 \text{watts}$$

**Calcul de la puissance crête Pc du générateur photovoltaïque :**

La puissance crête Pc de modules (en W) est donnée par la formule suivante :

$$P_c = \frac{\text{énergie produite}}{\text{Heures ensoleillement maximal}} = \frac{19045}{5} = 3809 W_c$$

**Calcul de nombre des panneaux photovoltaïque :**

Le nombre de modules pour fournir la puissance de l'installation est déterminé par l'équation suivante :

$$Nb = \frac{Pc}{Pu} = \frac{3809}{320} = 11.9$$

Donc nombre total de panneaux est : **12 modules**

### II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons estimé des besoins annuels en énergie électrique pour une maison algérienne moyenne et les paramètres du STEP nécessaire pour alimenter la maison pendant la nuit, et nous avons fait un dimensionnement d'un micro STEP-PV de maison.

# **Chapitre III :**

## **Réalisation Pratique du système**

### **III.1 Introduction :**

Dans ce chapitre nous présentons notre prototype de système STEP-PV, Nous avons testé dans le cas d'une lampe de 6W avec une hauteur de 10.5m.

### **III.2 Conception de modèle :**

Le tableau II-9 suivant résume les paramètres et les composants de système STEP-PV

Les appareils	Quantité
panneaux photovoltaïque	4
Onduleur	1
Régulateur de la charge (MPPT)	1
Lampe	1
Micro-hydro	1
Réservoirs	2
Pompe	1

### **III.3 Descriptions des composites :**

#### **1) Panneau photovoltaïque :**

La figure suivant représente Les panneau photovoltaïque utilisées dans notre projet, et sont de modèle polycrystalline.



Figure III-1 : les panneaux solaires

2) **Onduleur** : l'onduleur utilisé est du mark Victron Energy représenté dans la figure suivant



Figure III-2 : L'onduleur

3) **Régulateur MPPT** : Régulateur utilisé est du type 150/35 du mark (Victron energy).



Figure III-3 : régulateur MPPT



- 4) **Générateur Micro hydro (turbine) avec la lampe** : la puissance sortie de ce générateur est de 10W et lampe de 6W.



Figure III-4 : Micro-turbine avec une lampe

- 5) **Réservoirs (supérieur et inférieur)** : nous avons utilisé deux réservoirs d'eau de 800L de capacité. Ces réservoirs permettent d'effectuer nos expérimentations.



Figure III-5 : réservoir supérieur



Figure III-6 : réservoir inférieur

- 6) **Pompe** : une pompe du SPCO



Figure III-7 : une pompe

Caractéristiques de la pompe :



Figure III-8 : caractéristique de la pompe

#### III.4 Résultat de la réalisation :

Durant la journée les panneaux photovoltaïques alimentent la pompe qui assure l'absorption d'eau du réservoir inférieur et l'injecter vers le réservoir supérieur. Pendant la nuit (pas de rayonnement du soleil) l'eau qui se trouve dans le réservoir supérieur va s'écouler (chuter) vers le réservoir inférieur en passant par la turbine hydroélectrique qui à son tour génère l'électricité pour allumer la lampe. Ceci est illustré sur l'image ci-dessous.



Figure III-9 : une lampe allumée par la turbine

### **III.5 Conclusion :**

Dans cette expérience, nous avons constaté que le projet est techniquement et économiquement réalisable car l'installation de ce système est simple et le cout faible et nous concluons que nous pouvons utiliser des réservoirs d'eau pour stocker et pour produire de l'électricité pour notre consommation.

### **Conclusion Générale :**

Dans ce travail, nous avons présenté une alternative pour le stockage de l'énergie solaire. Cette alternative est basée sur le concept suivant ; construire un réservoir plus haut sur une hauteur et d'une capacité suffisantes pour stocker l'eau pendant la journée et un plus bas pour recevoir cette eau qui traverse la turbine hydroélectrique pour générer l'électricité durant la nuit. Ainsi, ce système fonctionne de la même manière qu'une batterie ; stocker de l'énergie sous forme d'eau pendant la journée et fournir de l'électricité pendant la nuit. L'avantage d'utiliser ces réservoirs de stockage par pompage pour alimenter les maisons en électricité est qu'ils sont assez petits et leurs coûts de construction sont généralement faibles par rapport aux barrages hydroélectriques. Pour valider ce travail, nous avons réalisé un microsystème composé d'une petite turbine hydroélectrique d'une puissance relativement faible, deux réservoirs séparés par une hauteur de 10m, une pompe à eau pour pomper l'eau du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur et une ampoule de quelques watts. Cette dernière s'est bien allumée et le système a donc bien fonctionné, ce qui nous permet d'envisager, en perspective, de généraliser ce projet pour alimenter des villages, des villes voir même le territoire national.

## Bibliographie :

- [1] <https://les-energies-renouvelables.eu/conseils/photovoltaique/comment-fonctionne-le-panneau-solaire-photovoltaique>
- [2] <https://terresolaire.com/comprendre-le-solaire/photovoltaique/histoire-du-photovoltaique>
- [3] **Uni. Kassel**, 'PhotovoltaicSystemsTechnology', Kassel, Germany, 2003, [www.uniKassel.de](http://www.uniKassel.de)
- [4] **Djarallah, Mohamed**, "CONTRIBUTION A L'ETUDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES RESIDENTIELS COUPLES AU RESEAU ELECTRIQUE," UNIVERSITE DE BATNA Thèse de Doctorat en Science, 2008 )
- [5] **Nedjma Abdelhafidi**, Estimation du Gisement Solaire par Traitement des Images Meteosat publier March 2014
- [6] **S. NAOUAL**, "Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur," Université Ferhat Abbas de Sétif Mémoire de Magister, Département d'électrotechnique 2010
- [7] <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/la-cellule-photovoltaique-comment-ca-marche#:~:text=Le%20fonctionnement%20de%20la%20cellule,et%20de%20neutrons...%20>
- [8] <https://allo.solar/base-de-connaissances/quelles-differences-entre-pwm-et-mppt.html>
- [9] **Violaine Didier** sous la direction de Bruno Gaiddon, Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances, Août 2007
- [10] **Antoine luque** and **Steven Hegedus**, « Handbook of Photovoltaic Science and Engineering », Jhon Wiley & Sons Ltd, 2003
- [11] **Pierre-Louis VIOLLET** : Président du comité scientifique et technique de la Société hydrotechnique de France
- [12] **ournery-jean-francois** Ingénieur INPG Hydraulique et ENSG Géologie Nancy, publier en 16 janvier 2016
- [13] **K. Zach, H. Auer, G. et Lettner** – D2.1 report summarizing the current status, role and costs of energy storage technologies. Facilitating energy storage to allow high penetration of intermittent renewable energy. stoRE Project, 49 p., mars 2012.)
- [14] **M. Rossi, M. Righetti, and M. Renzi**, "Pump-as-Turbine for energy recovery applications: the case study of an aqueduct," Energy Procedia, vol. 101, pp. 1207-1214, 2016
- [15] **E. C. Walseth, T. K. Nielsen, and B. Svingen**, "Measuring the Dynamic Characteristics of a Low Specific Speed Pump-Turbine Model," Energies, vol. 9, no. 3, p. 199, 2016).
- [16] **H. Hahn, D. Hau, C. Dick, and M. Puchta**, "Techno-economic assessment of a subsea energy storage technology for power balancing services," Energy, vol. 133, no. 15, pp. 121-127, 2017

## Bibliographie

---

- [17] **D. Connolly**, "A review of energy storage technologies: for the integration of fluctuating renewable energy," 2010
- [18] **Dr. Klaus Krueger** - Head of Plant & Products Safety and Innovation, Voith Hydro)
- [19] **H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, and Y. Ding**, "Progress in electrical energy storage system: A critical review," Progress in Natural Science, vol. 19, no. 3, pp. 291-312, 2009
- [20] **K. Ghaib and F.-Z. Ben-Fares**, "A design methodology of stand-alone photovoltaic power systems for rural electrification," Energy Conversion and Management, vol. 148, pp. 1127-1141, 2017
- [21] SHF : «PumpedstoragePowerplants», Lyon, 23-24 novembre 2011 - X. Ursat et al. - Expérience EDF
- [22] **Oriol Planas** - Ingénieur Technique Industriel, spécialité mécanique Date de publication : 3 avril 2018
- [23] Wanlin, centrale hydroélectrique de Commune Houyet
- [24] **Gérard HEMERY** Ingénieur de l'École nationale supérieure d'électricité et de mécanique de Nancy Basic Design Engineering Manager à la Société ALSTOM Hydro France
- [25] <https://installation-electrique.ooreka.fr/astuce/voir/537477/inverseur-electrique>
- [26] Projection de développement de la capacité mondiale des STEP Selon l'IAE Technology Road map Hydropower 2012
- [27] **Ardizzon G, Cavazzini G, Pavesi G**. A new generation of small hydro and pumped-hydro power plants: advances and future challenges. RenewSustainEnergyRev 2014;31:746–61
- [28] **Kousksou T, Bruel P, Jamil A, El Rhafiki T, Zeraouli Y**. Energystorage: applications and challenges. Sol Energy Mater Sol Cells 2014;120(Part A):59–80
- [29] [byjus.com/physics/bernoullis-principe](http://byjus.com/physics/bernoullis-principe)
- [30] **R.V. Giles**, "Mecánica de Los Fluidos e Hidráulica", Schaum-McGraw-Hill, Mexico, 273 p., 1970.
- [31] Spyrou ID, Anagnostopoulos JS. Design study of a stand-alone desalination system powered by renewable energy sources and a pumped storage unit. Desalination 2010 ; 257:137–49
- [32] **Sylvain Brigand** << Installations solaires photovoltaïque >> Dimensionnement Installation et mise en œuvre Maintenance " Groupe Moniteur (Editions du Moniteur) Paris, 2011
- [33] **F Harouadi**, Les potentialités d'exploitation d'hydrogène solaire en Algérie dans un cadre euro – maghrébin Partie I : Phase d'étude d'opportunité et de faisabilité
- [34] **Bouziane Afaf** , Évaluation du rayonnement solaire en Algérie pour des application photovoltaïques
- [35] <https://news.dualsun.com/installation-entretien/inclinaison-orientation-panneau-solaire>