

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MUSTAPHA STAMBOULI DE MASCARA
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE**

Polycopié de Cours

**Intégration des Ressources d'Énergies
Renouvelables aux Réseaux
Électriques**

Présenté par :

CHERGUI MOULAY-IDRISS

**Ce cours est destiné aux étudiants l'Electrotechnique
en deuxième année Master Réseaux électriques**

Algérie

2022

Avant-Propos

De nombreuses énergies non polluantes et renouvelables abondantes partout à la surface de la terre pourraient pourtant être utilisées par l'homme, parmi elle on distingue l'énergie éolienne, et l'énergie solaire, qui sont les plus intéressants cars, ces énergies sont disponibles partout à la surface du globe, en quantité égale dans l'année, et elles sont de plus faciles à exploiter. Elles semblent être les énergies les plus prometteuses pour l'avenir. Parmi ces applications, la plus intéressante en Algérie, est l'énergie solaire photovoltaïque en effet cette dernière peut être utilisée pour alimenter des sites isolés ou faire le pompage de l'eau pour la consommation et l'irrigation en agriculture, et même s'intégrer aux réseaux électriques.

L'intégration de l'énergie renouvelable aux réseaux électriques est une matière utile, elle est destinée aux étudiants de la deuxième année master de la spécialité Réseaux électriques en Electrotechnique du régime LMD. Le contenu de ce polycopié est spécifiquement basé sur l'étude et conception des systèmes des ressources d'énergies renouvelables, pour doter aux étudiants des bases scientifiques leur permettant d'intégrer la communauté de la recherche scientifique dans le domaine des énergies renouvelables, des batteries et des capteurs associés à des applications d'ingénierie. Nous enseignons ce contenu de ce polycopié dans le département d'électrotechnique de la faculté des sciences et de la technologie à l'université de Mascara. Cette polycopie permet aux étudiants d'acquérir les connaissances essentielles pour appliquer les techniques de gestion des énergies renouvelables. Ce polycopié s'adresse aussi aux artisans-installateurs, aux bureaux d'études ainsi qu'aux Maîtres d'Ouvrage. Il apporte au lecteur des éléments pointus de conception et de dimensionnement des installations photovoltaïques raccordées au réseau en basse tension. Il est présenté avec un style simple qui permet aux étudiants une compréhension graduelle et très rapide.

Mascara, le 20 Février 2022

Table des matières

Avant-Propos	i
Résumé	v
Notations et Abréviations	vi
Liste des Abréviations	vi
Nomenclature.....	vi
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux	ix
Introduction	10
Chapitre 1. Introduction à l'intégration au réseau électrique.....	12
1.1. Introduction.....	12
1.2. Étymologies et définitions	12
1.2.1. Les sources d'énergie et ressources en énergie.....	12
1.2.2. Energie	12
1.2.3. Energie primaire et énergie secondaire	13
1.2.4. Energie non renouvelable et énergie renouvelable.....	14
1.3 Options de raccordement.....	14
1.3.1 Autoconsommation totale	14
1.3.2 Comptage réversible.....	14
1.3.3 Injection du surplus	14
1.3.4 Injection de la totalité.....	15
1.4 Procédures administratives	15
1.5 Aspects techniques.....	15
1.6 Les systèmes raccordés au réseau de distribution.....	15
Conclusion	16
Chapitre 2. Intégration de l'énergie solaire photovoltaïque au réseau électrique	20
2.1 Introduction.....	20
2.2 Energie solaire	21
2.2.1 Ensoleillement et irradiation solaire.....	21

2.2.2	Spectre solaire	22
2.2.3	Spectre (Coefficient) Air Masse- AM0	24
2.2.4	Spectre Air masse AM1,5	24
2.2.5	Technologies de l'énergie solaire (l'énergie lumière).....	24
2.3	Cellule solaire photovoltaïque	26
2.3.2.	Les convertisseurs de puissance.....	34
2.4	Configurations des systèmes PV reliés au réseau	37
2.5	Problématiques posées par le raccordement des systèmes PVs au réseau électrique	41
2.5.2	Surtension/ chute de tension.....	42
2.5.3.	Déséquilibre entre phases	44
2.6	Aspect techniques et économiques.....	44
2.7	Le générateur photovoltaïque couplé au réseau	44
2.7.1	Système a double comptage	52
2.7.2	Vente totale de la production	52
2.7.3	Rendement de l'onduleur.....	53
2.8	Système d'énergie hybride (se).....	54
2.8.1	La structure du système hybride.....	54
	Conclusion	57
	Exemples d'exercices	

Chapitre 3 : Intégration de l'énergie éolienne au réseau électrique.....65

3.1	Introduction	65
3.2	La transformation de l'énergie éolienne.....	65
3.3	Fonctionnement d'une éolienne	65
3.4	Les modes d'exploitation de l'énergie éolienne	66
3.5.	Description du fonctionnement.....	66
3.6.	Les principaux Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	69
3.7.	Exigences applicables en matière de connexion au réseau électrique.....	70
3.8.	Contribution de l'énergie éolienne à l'équilibre des systèmes	70
3.9.	Conception du marché	70

3.10.	Economie de l'intégration de l'énergie éolienne.....	71
	Conclusion	71
	Exemples d'exercices	72
Chapitre 4	Intégration de piles à combustible au réseau électrique.....	73
4.1	Introduction	73
4.3.	Principe de fonctionnement d'une pile à combustible	75
4.4.	Sources et modes de stockage pour l'hydrogène	75
4.5.	Rendements globaux	76
4.6.	Les champs d'applications.....	78
4.7.	Principe de fonctionnement d'un accumulateur au Lithium	78
4.8.	Les dispositifs stockage	80
4.9.	Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible.....	84
	Conclusion	84
Chapitre 5.	Réseaux intelligents (Smart grid)	86
5.1.	Introduction.....	86
5.2.	Définition et catégories.....	86
5.3.	Fonctionnement	86
5.4.	Enjeux par rapport à l'énergie	87
5.5.	Acteurs majeurs	88
5.6.	Zone de présence ou d'application	88
	Conclusion	89
	Références bibliographiques.....	90

Résumé

L'intégration des énergies renouvelables implique des exigences particulières pour le réseau électrique, qui reste tributaire des sources de production d'électricité traditionnelles pour pouvoir assurer un approvisionnement fiable. En vue d'un approvisionnement en électricité respectueux du climat, la planification du réseau électrique doit donc être optimisée et adaptée aux exigences techniques.

Ces dernières années, les établissements de recherche universitaires et les fournisseurs d'énergie électrique ont concentré leurs efforts à l'étude des impacts possibles des générateurs de puissance distribués (dont les systèmes photovoltaïques) sur le réseau de distribution électrique. La plupart de ces recherches se focalisent sur l'étude des réponses (statiques et dynamiques) et des performances des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique (lors de changements soudains de la tension du réseau, des défauts du système, de fluctuations de puissance dues au caractère intermittent de l'énergie solaire, etc.). Afin de détecter les défauts et de protéger les dispositifs et les systèmes, diverses solutions de contrôle ont été développées. Néanmoins, l'intégration des systèmes d'énergies renouvelables dans les réseaux de distributions basse tension n'a pas eu beaucoup d'intérêt dans le passé, et les efforts de recherche étaient principalement focalisés sur le cas des réseaux de distribution haute et moyenne tension. De nos jours, les réseaux de distribution doivent être plus actifs compte tenu des systèmes de production décentralisés qui y sont raccordés. Il était donc primordial de revoir les approches d'analyse afin de faire des investigations plus précises sur l'impact de l'intégration des systèmes d'énergies renouvelables sur les réseaux.

Mots clés : Energies renouvelables, réseau de distribution électrique, Gestion des ressources d'énergies renouvelables,

Notations et Abréviations

Liste des Abréviations

EnR	Energie Renouvelable
PV	Photovoltaïque
GPV	Générateur Photovoltaïque
GES	Gaz à Effet de Serre
MW	M égawatt
SEH	S ystème d' E nergie H ybride
CC	C ourant C ontinu
CA	C ourant A lternative
GD	G énérateur D iesel C -
Si	C ristallin S ilicium
MPPT	M aximum P ower P oint T racking
UV	U ltraviolet
IR	Infra Rouge
PAC	P ile à C ombustible

Nomenclature

<i>Abréviation</i>	<i>Signification</i>	<i>Unité de Mesure</i>
I	Le courant électrique	[A]
I_c	Courant capacitif traversant le condensateur du bus continu	[A]
I_{cc}	Le courant de court-circuit	[A]
I_D	Le courant dans la diode parallèle	[A]
I_{éol}	Courant de système éolien	[A]
I_{hy}	Courant de système hybride	[A]
I_L	Le photo-courant du module	[A]
I_{pm}	Courant pour la puissance maximale extraite	[A]
I_{PV}	Courant du panneau PV	[A]
V_{c0}	Tension de circuit ouvert	[V]
V_{PV}	Tension du panneau PV	[V]
		[V]

P_m	Puissance maximum extraite	[W]
P_{mec}	Puissance mécanique	[W]
P_{pv}	Puissance du panneau PV	[W]
P_c	Puissance crête	[W]
PPM	Point de Puissance Maximale	[W]
E ou G	Eclairement (Ensoleillement)	[W/m ²]
R_{sh}	Résistance shunt	[Ω]
R_s	Résistance série	[Ω]
V	Vitesse du vent	[m/s]

Liste des figures

- Figure 2.1.** Schéma général d'un système photovoltaïque autonome
- Figure 2.2.** Composants d'un système photovoltaïque relié au réseau
- Figure 2.3.** *Investissements en énergies renouvelables pour l'année 2015*
- Figure 2.4.** Taux de croissance annuel des énergies renouvelables de 1990 à 2014
- Figure 2.5.** Spectre du rayonnement solaire
- Figure 2.6.** *Distribution du nombre de la Masse de l'air (Air Mass) AM*
- Figure 2.7.** Les différents modes d'exploitation de l'énergie solaire.
- Figure 2.8.** Energie solaire thermique (concentrateurs)
- Figure 2.9.** Energie solaire sur tour
- Figure 2.10.** Cellule photovoltaïque en silicone monocristallin.
- Figure 2.11.** Génération et mouvements des porteurs de charges libres dans une jonction *p-n*
- Figure 2.12.** *Structure d'une cellule PV, utilisant le silicium comme matériau PV*
- Figure 2.13.** *Caractéristique Courant-Tension sous obscurité et sous éclairage d'une cellule PV.*
- Figure 2.12.** *Caractéristique I(V) d'une cellule PV (dans le nouveau repère)*
- Figure 2.13.** Modèle équivalent électrique de la cellule photovoltaïque.
- Figure 2.14.** Connexion en série/parallèle de cellules PV avec le courant et la tension résultants
- Figure 2.15.** Modèle équivalent électrique de la cellule photovoltaïque.
- Figure 2.16.** Diode de contournement (bypass)
- Figure 2.17.** Courbes caractéristiques d'une cellule photovoltaïque
- Figure 2.18.** De la cellule PV au champ PV
- Figure 2.19.** Architecture des systèmes PV
- Figure 2.20.** Micro-onduleur commercial de marque
- Figure 2.23.** Onduleurs à 3 niveaux
- Figure 2.24.** Convertisseurs DC-DC pour onduleur multi-string
- Figure 2.25.** Onduleur 3 niveaux triphasé
- Figure 2. 26.** Classification des systèmes hybrides
- Figure 2. 42** Architecture des SEH

Figure 2. 43. Solaire-éolien (site isolé).
Figure 2. 44 Solaire-éolien, stockage de batterie.
Figure 3.1 Composition d'une éolienne
Figure 3.2 Schéma descriptif et explicatif d'une éolienne
Figure 3.3 Modélise du vent, et l'énergie électrique fournir par l'éolienne
Figure 4.1. Les différents constituants d'une PAC
Figure 4.2. Principe de fonctionnement de la pile.
Figur.4.3. Principe de fonctionnement d'un accumulateur au Lithium
Figure 4.4 Vue de l'ensemble des moyens de stockage d'énergie.
Figure 4. 5. Batterie de type NaS, structure d'une cellule et module de
Figure 4.6. Schéma simplifié d'un système PV avec stockage en hydrogène
Figure 4.7. Batterie de type NaS, structure d'une cellule et module de
Figure 4. 8. Diagramme de Ragone pour différents moyens de stockage
Figure 4.9. Système de stockage à air comprimé adiabatique.
Figure 5.1. Principe des compteurs électriques évolués
Figure 5.2. Fonctionnement des smart grids

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Les valeurs énergétiques caractéristiques des photons
Tableau 2.2 Classification des SEH par gamme de puissance
Tableau 4.1 Comparaisons, entre une PAC et une batterie
Tableau 4.2 Les principales applications des piles à combustible

Introduction

L'énergie est à la base du développement de notre société moderne. Ses différentes formes ont évolué, depuis l'utilisation du bois, en passant par le charbon, jusqu'au pétrole, dont nous dépendons presque exclusivement.

De nos jours, l'homme dispose de nombreuses sources d'énergie, les plus utilisées sont les énergies dites fossiles (charbon, Pétrole, gaz) ..etc.). La demande mondiale en énergie est en croissance rapide et les ressources naturelles d'énergie sont en décroissance en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Les réserves d'énergie fossiles commencent à épuiser et lors de leur utilisation:

- Engendre une grande quantité de gaz à effet de serre (GES),
- Engendre des composants gazeux
- Absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre,
- Contribuent ainsi à l'effet de serre,
- Participent fortement au réchauffement planétaire, comme le dioxyde de Carbone; le méthane;
- Le protoxyde d'azote ; l'ozone troposphérique...etc.

Pour répondre au besoin mondial d'énergie, de nouveaux procédés de recherche sur l'énergie alternative sont accentués. Notre avenir énergétique doit se baser sur les énergies nucléaires et renouvelables.

Les énergies renouvelables, éolienne, solaire (thermique et photovoltaïque), hydraulique, marémotrice, géothermique et la biomasse, constituent une alternative essentielle aux combustibles fossiles. Leur utilisation permet non seulement de réduire les émissions de gaz à effet de serre provenant de la production et de la consommation d'énergie, mais aussi de réduire notre dépendance énergétique face aux importations de combustibles fossiles (essentiellement gaz et pétrole).

Les ressources renouvelables sont variées et inépuisables. Leur conversion en énergie thermique, chimique ou électrique présente peu de dangers humains et écologiques. De plus, la production peut être centralisée ou décentralisée. En revanche, elle se caractérise par un rendement relativement faible, un coût important et une intermittence de la ressource. Des systèmes utilisant l'énergie solaire, éolienne, hydraulique ainsi que la biomasse fonctionnent dans de nombreuses régions du monde. Ils deviennent de plus en plus efficaces et rentables. L'énergie alternative qui peut accomplir la demande mondiale jusqu'à maintenant c'est l'énergie solaire.

Le monde est fortement convaincu par le fait que l'unique énergie alternative à l'énergie naturelle conventionnelle est l'énergie renouvelable, en particulier l'énergie solaire [1, 2].

L'utilisation de l'énergie renouvelable en particulier l'énergie solaire PV consiste à convertir directement le rayonnement lumineux en électricité. Elle emploie pour ce faire des modules composés de cellules solaires qui réalisent cette transformation d'énergie. La conversion PV est basée sur l'absorption de photons dans un matériau semi-conducteur qui fournit des charges électriques dont du courant dans un circuit extérieur raccordé, comme le réseau électrique [3-6].

L'impartiaux pédagogique de ce module est de connaître les critères d'intégration des systèmes d'énergie renouvelable aux réseaux électriques convenus et le rôle des dispositifs d'interfaçage d'électronique de puissance utilisés.

Les ressources renouvelables ont des apports potentiels très intéressants en termes d'énergie et d'économie. Cependant, en fonction de leur taux de pénétration, ces nouvelles sources d'énergie pourraient avoir des conséquences importantes sur l'exploitation et la sécurité des réseaux électriques. Pour une insertion massive des ressources renouvelables au système, ces impacts se trouveront non seulement au niveau du réseau de distribution, où la plupart des ressources renouvelables sont raccordées, mais ils affecteront le système entier. Il est donc nécessaire de chercher, d'une part, comment faire évoluer les plans de défense et de reconstitution du système dans le nouveau contexte, et d'autre part, comment se servir efficacement du potentiel des ressources renouvelables pour soutenir le système dans les situations critiques en connaissant les critères d'intégration des systèmes renouvelables aux réseaux électriques conventionnels et le rôle des

dispositifs d'interfaçage d'électronique de puissance utilisés. [1] [8-11].

Tout ceci se traduit par une transition énergétique vers un autre système plus durable, autant du point de vue de l'économie que de l'environnement. La production d'énergie d'origine renouvelable augmente, et entraîne une demande croissante de profils professionnels et d'entreprises spécialisées dans ce secteur.

La notion de qualité de l'électricité apparaît généralement sous les aspects suivants :

La continuité de fourniture : disponibilité de l'énergie électrique en un endroit donné qui peut être interrompue par des coupures brèves (< 1 min.) ou longues (> 1 min.).

La forme de l'onde de tension (fréquence, amplitude, durée). En pratique, la qualité de l'énergie électrique est une combinaison de la qualité de la tension et la qualité du courant.

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, «la qualité de l'énergie électrique» est souvent réduite à «la qualité de la tension».

La qualité d'énergie ou de la tension concerne essentiellement les quatre caractéristiques principales de la tension à savoir :

- La fréquence.
- L'amplitude.
- La forme d'onde.
- La symétrie.

Pour le réseau synchrone algérien, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale mesurée, doit se trouver dans l'intervalle de 50 Hz \pm 1 %. Le maintien de ce niveau de qualité est la responsabilité commune de tous les gestionnaires des réseaux concernés (zones de réglage), qui doivent participer aux réglages de la fréquence.

Le gestionnaire du réseau doit maintenir l'amplitude de la tension dans un intervalle de l'ordre de 10 % autour de sa valeur nominale. Cependant, même avec une régulation parfaite, plusieurs types de perturbations peuvent dégrader la qualité de la tension :

- Les creux de tension et coupures brèves.
- Les variations rapides de tension (Flicker).
- Les surtensions temporaires ou transitoires.
- Les deux premières catégories posent les problèmes les plus fréquents.

Les perturbations dégradant la qualité de la tension peuvent résulter de:

a/ Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients :

- Court-circuit dans un poste, une ligne aérienne, un câble souterrain, etc.
- Causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...).
- Matérielles (vieillesse d'isolants...).
- Humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...).

b/ Installations perturbatrices :

- Fours à arc.
- Soudeuses.
- Variateurs de vitesse.
- Toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent,
- Démarrage ou commutation d'appareils, etc....

En ce qui nous concerne dans cette présente polycopie, il s'agirait d'étudier et d'évaluer quelques ressources d'énergies raccordées aux réseaux électriques. Nous avons divisé et organisé ce polycopié en cinq chapitres:

Chapitre 1: Introduction à l'intégration au réseau électrique

Nous avons commencé par une étude Étymologie, Concepts et définitions des mots utilisés dans ce polycopié, et Introduction aux situations énergétiques globales en mettant en exergue l'énergie solaire, de présenter une Introduction à l'intégration au réseau électrique. Options de raccordement. Pourquoi le raccordement aux réseaux électrique? Fonctionnalités attendues du raccordement d'une source sur le réseau, une introduction aux systèmes photovoltaïques raccordés au réseau. Après un rappel des différents termes couramment utilisés dans ce domaine, les critères d'insertion technique des Energies Renouvelables (EnR) dans le système électrique, système EnR à injection dans le réseau.

Chapitre 2: Intégration de l'énergie solaire photovoltaïque au réseau électrique

Nous exposons en détail, la répartition des systèmes photovoltaïques ; les Technologies de l'énergie solaire, les différentes problématiques que peut engendrer l'insertion des systèmes PV au réseau de distribution, dont chaque impact des systèmes PV sur le réseau du point de vue sécurité, qualité d'énergie; côté consommateur et côté exploitant du réseau, les systèmes PV de faible puissance raccordé au réseau distribué, Centrale PV à injection dans le réseau. Nous avons présenté une compréhension facile du processus de dimensionnement, y compris les schémas électriques, Les calculs ainsi les justificatifs de dimensionnement sont effectués. Ce chapitre est une analyse des niveaux de performance des installations PVs raccordées au réseau et des solutions permettant d'optimiser le rendement, notamment de calculer la production électrique annuelle d'une installation PV.

Chapitre 3: Intégration de l'énergie éolienne au réseau électrique

Le troisième chapitre est consacré particulièrement à la deuxième préoccupation nationale pour la politique de la transition énergétique, c'est la production électrique par l'énergie éolienne et spécifiquement l'intégration de l'énergie éolienne au réseau électrique.

L'énergie éolienne, en tant que source de génération distribuée et à production variable, nécessite des investissements en infrastructures, ainsi que la mise en œuvre de concepts nouveaux en matière de technologie et de gestion des réseaux; l'intégration à grande échelle de l'énergie éolienne nécessite une augmentation sensible de la capacité de transport de l'énergie, ainsi que d'autres mesures de mise à niveau, ces concepts sont présentés dans ce chapitre.

Chapitre 4: Intégration de piles à combustible au réseau électrique

Constitution du stock, dimensionnement de la source de puissance, choix du ou des convertisseurs d'interfaçage, contrôle-commande du système Pile à Combustible. Les domaines d'application de la pile à combustible, La substitution de la pile à combustible aux batteries traditionnelles.

Chapitre 5: Smart grid (réseaux intelligents)

Définition, réseaux intelligents (Smart grid) intégrées au sein des sites de production, jusqu'aux consommateurs. Contribution et exploitation des réseaux intelligents des ressources locales issues du vent, du soleil et des courants marins. Amélioration des réseaux intelligents à la sécurité des réseaux électriques.

1.1. *Introduction*

Dans ce chapitre nous présentons les notions de base indispensables à toute recherche sur les systèmes photovoltaïques. Nous commençons par l'étymologie et définitions et rappel de notions d'énergie: des termes utilisés au quotidien seront illuminés (énergie primaire, énergies renouvelable, énergie photovoltaïques ...). Après il sera suivie par un aperçu du principe de la conversion photovoltaïque, des caractéristiques de panneaux photovoltaïques et puis des composants et topologies des systèmes photovoltaïques.

1.2. *Étymologies et définitions*

1.2.1. *Les sources d'énergie et ressources en énergie*

Les sources d'énergie regroupent tout ce qui permet de produire de l'énergie, elle fait référence à un lieu ou à une origine d'où quelque chose est obtenu, par exemple: le bois, le charbon, l'eau, l'atome. Les ressources en énergie sont les réserves de sources d'énergie que possède par exemple un pays. Les moyens (les ressources d'une richesse (par exemple : minerais), pour un pays. Ainsi elle désigne le matériel, le personnel, les fournitures et les d'autres actifs et éléments nécessaires au bon et efficace fonctionnement de quelque chose. Oxford Dictionary définit qu':

- ❖ Une Ressource en tant que stock ou fourniture d'argent, de matériel, de personnel et d'autres actifs sur lesquels une personne ou une organisation peut puiser pour fonctionner efficacement. Ressource peut également se référer à une caractéristique naturelle ou un phénomène qui améliore la qualité de la vie humaine. Une Ressource est quelque chose qui vous aide à exécuter une fonction. La Ressource est principalement utilisée au pluriel.
- ❖ Une source est un endroit où vous pouvez obtenir quelque chose d'utile ou de précieux. La source est principalement utilisée sous forme singulière.

1.2.2. *Energie*

L'énergie est un concept qui remonte à l'Antiquité. Le mot français « énergie » vient du latin vulgaire *energia*, lui-même issu du grec ancien *ἐνέργεια* / *enérgeia*. Ce terme grec originel signifie « force en action », par opposition à *δύναμις* / *dýnamis* signifiant « force en puissance » ... (D'après la définition du Petit Larousse).

L'énergie intervient lors des transformations entre phénomènes physiques différents donc qui relié à ceux d'action, de force et de durée : la mise en œuvre d'une action nécessite de maintenir une certaine force pendant une durée suffisante, pour vaincre les inerties et résistances qui s'opposent à ce changement. Après avoir exploité sa propre force et celle des animaux, l'homme a appris à exploiter les énergies contenues dans la nature (les vents, énergie éolienne et les chutes d'eau, énergie hydraulique) et capables de lui fournir une capacité croissante de travail mécanique par l'emploi de machines (machines-outils, chaudières),

et moteurs. L'énergie est alors fournie par un carburant (liquide ou gazeux, issu d'énergie fossile ou non). Ces transformations sont contrôlées par les lois et principes de la thermodynamique. L'unité de l'énergie définie par le Bureau international des poids et mesures (BIPM) dans le Système international (SI) est le joule.

Le sens premier est celui d'une vertu morale : l'énergie morale et physique que l'homme doit mettre en œuvre pour accomplir un travail donné, mais l'énergie est aussi étudiée en physique, et en économie, pour évoquer notamment la production, la distribution et la consommation d'énergie, les enjeux environnementaux associés, ainsi que la question des ressources énergétiques renouvelables ou non.

Dans le langage habituel, le mot « énergie » est utilisé pour désigner "l'énergie utilisable par l'homme". Ainsi quand il est fait référence à la consommation d'énergie, il faut comprendre « consommation d'énergie utilisable par l'homme ». Cette précision est d'autant plus compatible avec le premier principe de la thermodynamique qui stipule que dans un système isolé (notre univers en est un bon exemple) l'énergie totale est perpétuellement conservée, ce qui exclut toute consommation ou déperdition d'énergie. [1]. [12-15].

L'histoire de l'homme a été très marquée par l'évolution des sources d'énergie utilisables qu'il a su exploiter. La première énergie à la disposition de l'homme était sa propre énergie. En maîtrisant le feu, il a pu chauffer, cuire, éclairer et surtout forger des métaux, première étape de sa maîtrise sur l'énergie. Cet apprentissage énergétique lui a ouvert par la suite la voie de l'utilisation de l'énergie animale domestiquée, éolienne, hydraulique, thermique, chimique, électrique, nucléaire, solaire... Chacune de ces phases a été le moteur d'une évolution le plus souvent majeure des structures des sociétés humaines [3]. De nos jours, l'énergie illumine nos villes, alimente nos voitures, trains et avions, chauffe nos foyers, alimente nos téléviseurs, téléphones, entraîne les machines de nos usines, nos engins agricoles... En résumé, toutes nos activités sont liées d'une façon ou d'une autre à l'énergie. Grâce à la maîtrise des technologies de conversion de l'énergie, l'homme a pu augmenter considérablement son niveau de confort et subvenir à ses besoins de plus en plus variés. Toutefois, il s'est vite rendu compte des effets très néfastes de sa surexploitation des ressources énergétiques sur son environnement (pollution, réchauffement de la planète suite à l'effet de serre provoqué par les émissions de gaz carbonique,) et de la nécessité de repenser tout son système énergétique dans une perspective de préserver les ressources naturelles pour les générations futures (développement durable). Pour atteindre cet objectif dont dépend son existence, deux éléments de bases sont requis: des politiques axés sur l'amélioration de l'efficacité énergétique, et l'utilisation des énergies renouvelables. Les énergies renouvelables présentent l'avantage d'être propres et non épuisables à l'échelle de temps humaine. Dans ce contexte, l'énergie solaire est appelée à jouer un rôle de premier rang dans le nouveau système énergétique mondial. C'est un potentiel énorme qui peut être exploité par diverses technologies. Parmi ces technologies, le photovoltaïque offre une solution attractive pour la génération de l'électricité autant que systèmes autonomes (non relié au réseau) ou autant que systèmes reliés au réseau.

1.2.3. Energie primaire et énergie secondaire

On appelle énergie primaire, l'énergie capturée ou extraite directement (sans transformation) de la nature: charbon, pétrole brut, gaz naturel, combustible nucléaire, hydroélectricité, biomasse, énergie solaire, énergie éolienne, géothermique, et énergie des océans.

L'énergie primaire, pour être utilisable, est transformée en énergie secondaire sous forme d'énergie électrique ou combustible comme la gazoline, le méthanol, l'éthanol ou l'hydrogène. Une énergie secondaire peut être le résultat de la transformation d'une énergie primaire ou d'une autre énergie secondaire. Afin de comptabiliser l'énergie produite et consommée, Nous pouvons élargir les concepts d'énergie par les différentes filières et stades suivantes:

- **Énergie primaire** : énergie brute, n'ayant subi aucune conversion. Exemple de source : pétrole non raffiné
- **Énergie secondaire** : énergie primaire transformée avant son transport à l'utilisateur final. Exemple de source: *produits pétroliers raffinés*
- **Énergie finale** : énergie livrée à l'utilisateur final, avant sa consommation. On considère que dans le cas des énergies thermiques renouvelables, l'énergie finale est égale à l'énergie primaire. Exemple de source: *fioul livré en entrée de chaudière*
- **Énergie utile** : énergie finale pondérée par le rendement du système de chauffage. C'est l'énergie restituée à la sortie du système, celle dont bénéficie effectivement l'utilisateur.

Pour certaines sources d'énergie, l'énergie finale est équivalente à l'énergie primaire. C'est le cas de l'énergie solaire, du bois-énergie utilisé dans le résidentiel-tertiaire, le gaz naturel si l'on considère les pertes de transport comme négligeables et les réseaux de chaleur/froid. [4]

1.2.4. *Energie non renouvelable et énergie renouvelable*

Une énergie est dite renouvelable si elle est produite à partir de ressources qui sont naturellement reconstituées et inépuisables sur une échelle de temps humaine, comme le soleil, le vent, les marées, les vagues, la chaleur géothermique et la biomasse.

1.3 *Options de raccordement*

La production peut être utilisée de différentes manières :

1.3.1 *Autoconsommation totale*

La production électrique est consommée sur place par les appareils en cours de fonctionnement (autoconsommation). Si la production instantanée excède la consommation instantanée, l'excédent est injecté au réseau sans être comptabilisé.

1.3.2 *Comptage réversible*

La production électrique est consommée sur place par les appareils en cours de fonctionnement (autoconsommation). Si la production instantanée excède la consommation instantanée, l'excédent est injecté dans le réseau et fait reculer (tourner à l'envers, pour les compteurs électromécaniques) le compteur électrique. Cette solution n'est plus utilisée car elle est incompatible avec les nouveaux compteurs électroniques.

1.3.3 *Injection du surplus*

La production électrique consommée sur place par les appareils en cours de fonctionnement

(l'autoconsommation) n'est pas comptabilisée par le compteur de production, mais vient réduire le décompte de la consommation. Seul le surplus de la production par rapport à la consommation instantanée est vendu ;

1.3.4 Injection de la totalité

L'intégralité de la production est injectée dans le réseau et vendue. Un point de branchement spécifique à la production est alors créé par le gestionnaire du réseau. Toute la consommation est par ailleurs comptabilisée par le compteur de consommation existant, comme dans tous bâtiments raccordés au réseau.

1.4 Procédures administratives

Elles sont obligatoires et doivent formaliser le raccordement au réseau d'une installation de production photovoltaïque. La lourdeur et le changement incessant de ces démarches sont un frein majeur au développement des marchés nationaux de certains pays. En Suisse, dès 2016, une nouvelle loi sur l'énergie, suivie de son ordonnance ont conduit à une évolution du dispositif d'encouragement des énergies renouvelables. Une demande aux autorités fédérales ouvre la possibilité d'une participation financière de la confédération [18- 20].

1.5 Aspects techniques

Le propriétaire du système, premier bénéficiaire de l'électricité produite. L'électricité emprunte toujours préférentiellement le chemin de moindre résistance électrique. Le propriétaire du système, si des appareils électriques sont en fonctionnement chez lui, ou ses voisins les plus proches, reçoivent *a priori* une part importante (mais pas exclusive) de l'énergie produite, sans influence significative de la présence ou non d'un compteur électrique sur le chemin. Seule la résistance (modeste) du compteur intervient. En revanche le choix de l'option d'injection sur le réseau n'intervient pas.

1.6 Les systèmes raccordés au réseau de distribution.

Un système PV connecté directement au réseau est généralement composé des éléments suivants: un GPV qui convertit l'énergie lumineuse du soleil en courant électrique continu et une unité de conditionnement de puissance qui convertit le courant continu généré en courant alternatif La puissance générée est utilisée par une charge injectée au réseau. Un système de stockage peut être ajouté afin d'assurer la continuité de service et d'améliorer la qualité de l'énergie [19].

1.6.1 Pourquoi le raccordement aux réseaux électrique?

Tout comme l'eau, l'électricité doit faire l'objet d'un raccordement pour fonctionner dans les maisons. La mise en service de l'électricité vient ensuite. Le raccordement à l'électricité est un processus important lors de l'emménagement dans une maison neuve. Il arrive parfois que les consommateurs en phase de déménagement se trouvent rapidement dépassés par les démarches administratives, les fournisseurs d'énergie à contacter, les tarifs et les délais : qui s'occupe du compteur, chez quel fournisseur s'abonner? Qui intervient à domicile? En combien de temps? Qui paye les frais de la mise en service? À qui? Quel est le prix pour un

raccordement au réseau d'électricité? Le prix de celui-ci est-il le même pour une maison que pour un appartement? Comment faire le raccordement au réseau d'électricité?

Les démarches pour un raccordement à l'électricité ne sont pas les mêmes que pour un raccordement à l'eau. Pour éviter les malentendus et les mauvaises surprises en arrivant dans le logement, mieux vaut s'occuper du raccordement à l'électricité en avance. Deux étapes principales à retenir pour raccorder son logement à l'électricité: Le raccordement ; La mise en service.

1.6.2 Qui est en charge du raccordement à l'électricité ?

Le raccordement au réseau électrique est une opération gérée par le gestionnaire de réseau, mais il est possible d'en faire la demande auprès du fournisseur d'électricité, qui fera alors office de médiateur. En revanche, faire la demande de raccordement, directement sur le site, pour un meilleur suivi de l'avancée des travaux. Le gestionnaire de réseau se charge du raccordement et de la distribution de l'énergie depuis les centres de stockages jusqu'aux consommateurs. Le raccordement à l'électricité s'effectue de la même façon pour les particuliers et les professionnels. Les étapes à suivre pour les démarches de raccordement à l'électricité :

- De la demande de raccordement
- La proposition du service de gestion des réseaux électriques publics
- Les travaux de raccordement
- La mise en service l'électricité

Etape 1 : La demande de raccordement

Il faut d'abord effectuer une demande auprès du gestionnaire du réseau électrique publique ; et préciser si elle concerne un professionnel ou un particulier, puis fournir quelques informations supplémentaires. Il faudra notamment préciser la puissance souhaitée pour le compteur et la date à laquelle souhaiter avoir l'électricité.

Etape 2 : La proposition du service de gestion des réseaux électriques publics

La demande sera ensuite étudiée et recevoir une proposition de raccordement avec un devis et un descriptif des travaux à réaliser. Pour valider ce devis, il faut envoyer un devis signé et payer l'acompte qui est demandé.

Etape 3 : Les travaux de raccordement

Les travaux sont ensuite programmés et les délais varient en fonction des autorisations obtenues et de l'éventuel besoin de faire une extension de réseau.

Etape 4 : La mise en service de l'électricité

Une fois les travaux terminés, il faut encore procéder à la mise en service de l'électricité. Pour cela il faut transmettre au technicien qui fera la mise en service l'attestation de conformité de l'installation que l'on appelle aussi « Consuel ». Il faudra également payer le raccordement à hauteur du devis.

Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons exposé les notions de bases de l'énergie photovoltaïque. Entamé par une revue des concepts généraux de sources d'énergie dans le contexte énergétique mondial actuel. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons exposé les notions et les démarches pour l'implantation d'un réseau électrique, les notions de bases nécessaires à comprendre le fonctionnement des systèmes d'énergie renouvelable reliés au réseau. Une bonne partie est consacrée à étaler les différentes topologies de ces systèmes. Cet aperçu constitue un support pour la suite de notre étude puisqu'il permet d'avoir une idée plus précise sur la fonction de chaque sous-système constituant les systèmes photovoltaïques reliés au réseau.

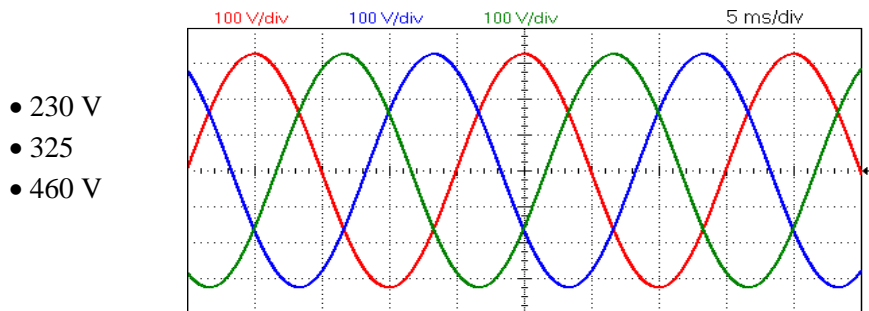
Exemples des Questions

a) Questions portant sur le réseau d'électricité triphasé

1. C'est quoi un poste HTA/BT
2. Maîtriser les niveaux de tension sur le réseau électrique poste THT MT BTB HTB HTA BTA HT
3. Un réseau d'électricité doit subir ces trois phases et dans cet ordre
 - Tension de la centrale de production
 - Tension lors du transport
 - La distribution
4. Le rôle du câble de garde est
 - Protection des conducteurs de phase contre les coups de foudre direct.
 - Transport des courants homo polaires et harmoniques.
 - Transport de l'énergie
5. La distribution d'électricité se fait en:
 - Haute tension
 - Basse tension

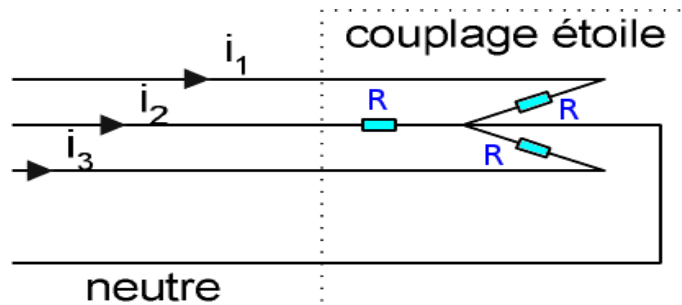
b) Questions portant sur le régime triphasé

Question 1/5 : On donne le chronogramme des tensions entre phase et neutre d'un réseau triphasé 50 Hz : Quelle est la tension efficace entre phases de ce réseau ?



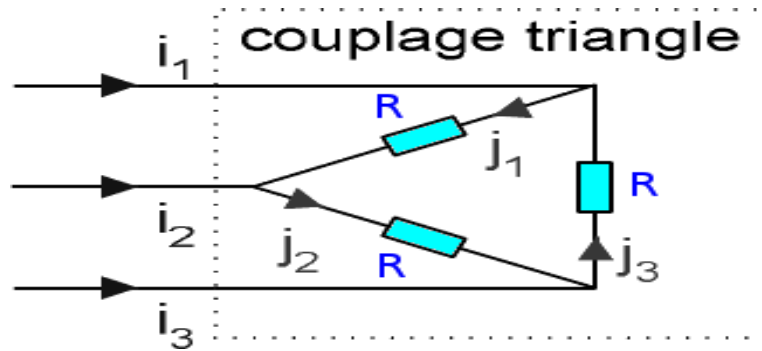
Question 2/5 : Un réseau triphasé 230 V/400 V 50 Hz alimente trois résistances $R = 10 \Omega$ couplées en étoile : Que vaut la valeur efficace I des courants de ligne ?

- 13 A
- 23 A
- 40 A
- 69 A



Question 3/5: Un réseau triphasé 230/400V 50 Hz alimente trois résistances $R=10\ \Omega$ couplées en triangle: Que vaut la valeur efficace I des courants de ligne ?

- 13 A
- 23 A
- 40 A
- 69 A

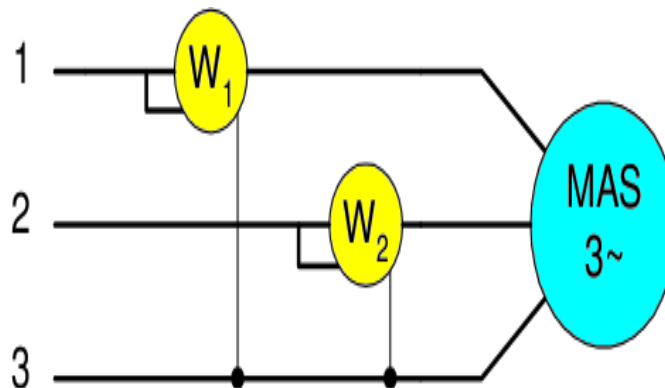


Question 4/5: Un réseau triphasé 400 V/ 690 V 50 Hz alimente un moteur asynchrone. La valeur efficace des courants de ligne est 3,8 A et le facteur de puissance du moteur est 0,86. Quelle est la puissance active consommée par le moteur ?

- 0,75 kW ;
- 1,3 kW ;
- 2,3 kW ;
- 3,9 kW.

Question 5/5 : On utilise la méthode des deux wattmètres pour mesurer la puissance active consommée par un moteur asynchrone : Le wattmètre 1 indique 2500 W et le wattmètre 2 indique 1000 W. La puissance active est

- 3500 W
- 1500 W
- 1750 W
- 2600 W



c) QCM:

1- Cocher les énergies non renouvelables

- Nucléaire
- Solaire
- Charbon

2- Cocher les énergies renouvelables.

- Gaz
- Pétrole
- Éolien

3- Combien d'énergie est consommée chaque année dans le monde ?

- 11 milliards de TEP
- 5 millions de TEP
- 11 millions de TEP

4- Qu'est-ce qu'un TEP ?

- C'est la quantité d'énergie brûlée par 1 tonne de pétrole
- C'est le produit intérieur brut
- C'est une unité de mesure

5- L'énergie produite sur la planète est à

- 87 % renouvelable
- 87% non renouvelable

6- Sur la terre combien n'ont pas accès à l'électricité ?

- 500 millions
- 1 milliard et demi
- 4 milliards

7- Les énergies sont :

- Disponibles partout,
- Inégalement réparties sur la planète

8- Les besoins énergétiques vont d'ici 2030

- Rester stables
- Doubler
- Quadrupler

9- La population mondiale consomme de l'énergie produite

- 20% de la population mondiale consomme 60% de l'énergie produite
- 60% de la population mondiale consomme 20% de l'énergie produite
- 50 % des humains ont accès à l'électricité

10- Qu'est-ce que le choc pétrolier ?

- C'est la forte augmentation du prix du gasoil ;
- C'est la forte augmentation du prix du baril de pétrole ;
- C'est la rareté du pétrole

11- En quelle année a eu lieu le premier choc pétrolier ?

- 1981
- 1913
- 1973

12- Qu'est-ce que le PIC pétrolier ?

- C'est un pic de production de pétrole après lequel les réserves ne pourront que diminuer
- C'est le maximum atteint par le prix du baril de pétrole

13- Combien d'années le rythme de production actuel du pétrole va se maintenir ?

- 40 ans
- 1 siècle
- 200 ans

14- Face à la rareté du pétrole et son prix en augmentation que font certains pays pour subvenir à leur besoin énergétique ?

- Certains se tournent vers les énergies renouvelables
- D'autres se tournent vers l'exploitation du pétrole non-conventionnel
- D'autres se tournent vers le charbon

15- Comment expliquer l'exploitation du pétrole non conventionnel ?

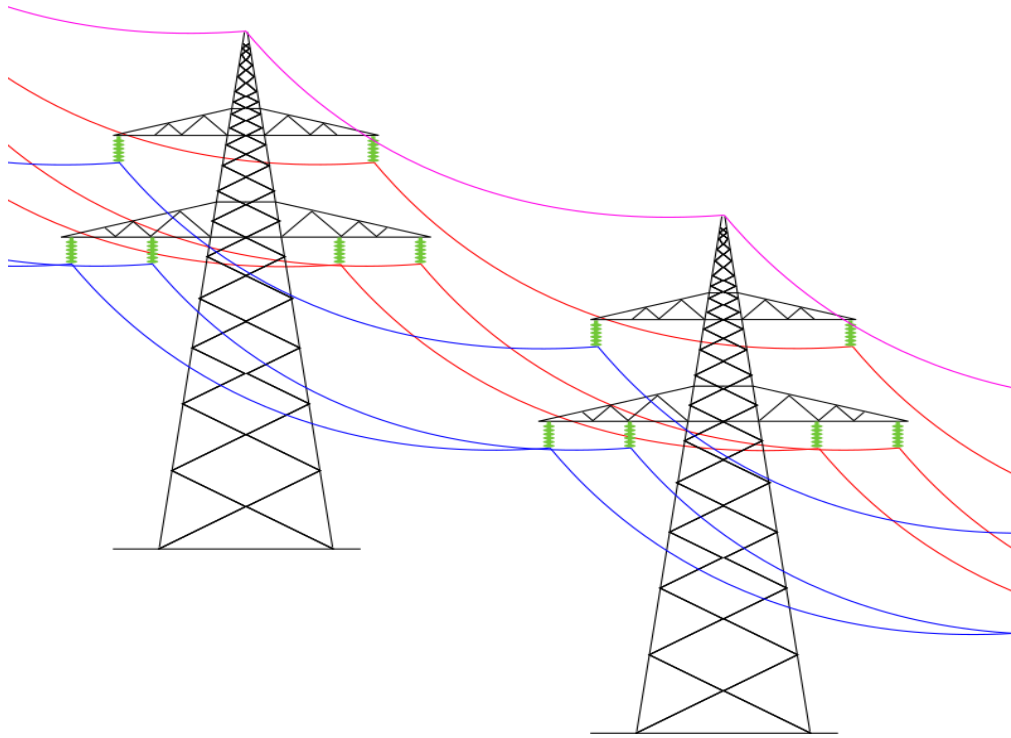
- Cela devient de plus en rentable
- Les hommes n'ont plus le choix
- Ce type de pétrole ne coûte pas cher à produire

16- Qu'est-ce que le développement durable ?

- C'est un développement basé sur les énergies propres
- C'est un développement qui pourvoit à nos besoins sans nuire aux besoins des générations futures

17- Dispose-t-on des moyens technologiques pour diminuer nos besoins énergétiques ?

- Oui
- Non



Réseau électrique

Chapitre 2. Intégration de l'énergie solaire photovoltaïque au réseau électrique

2.1 Introduction

Un système photovoltaïque est conçu dans le but de fournir de l'énergie électrique à une charge en transformant directement l'énergie solaire via l'effet photovoltaïque. Le composant essentiel d'un système photovoltaïque est les panneaux photovoltaïques. La nature modulaire des générateurs photovoltaïques permet de construire des systèmes photovoltaïques pour une gamme de puissances très large (allant du milliwatt au mégawatt) [17]. Dans une application donnée, la structure finale du système est déterminée par le profil de la charge (besoins en énergie électrique). Les systèmes photovoltaïques se répartissent et classés en deux catégories principales :

- Les systèmes autonomes sont surtout adoptés et destinés pour les sites isolés ou un équipement électrique sans fil, où les lignes de transport de l'énergie électrique ne présentent pas une solution économiquement viable. On peut trouver tous les systèmes sur batterie : A cause de la nature intermittente de l'énergie solaire impose l'ajout de moyen de stockage de l'excès de l'énergie récolté pendant le jour pour une éventuelle utilisation pendant la nuit. Comme électrification rural, chalet, sites insulaires, alimentation de relais télécoms, signalisation, appareils de mesure...ainsi on peut avoir les systèmes en alimentation directe (sans batterie), comme le pompage photovoltaïque où le stockage est hydraulique. Une solution alternative consiste à utiliser le GPV dans une configuration hybride avec un générateur diesel ou une pile à combustible [18]. Voir le schéma simplifié d'un système PV autonome sur la figure 2.1.

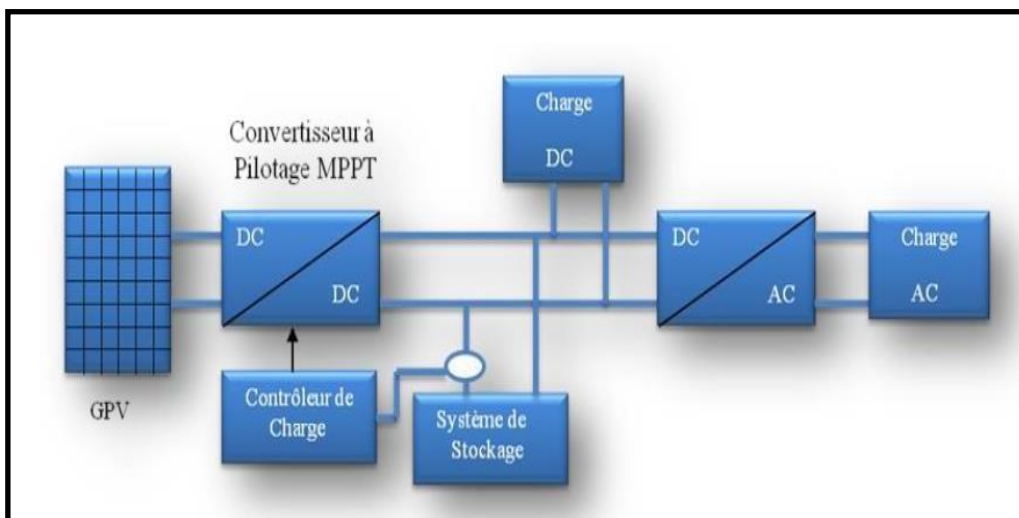


Figure 2.1. Schéma général d'un système photovoltaïque autonome

- Des installations photovoltaïques liées au réseau dont l'électricité produite est injectée dans le réseau public de distribution. Le système peut également être connecté au réseau. L'avantage du raccordement est de se dispenser du coûteux et problématique stockage de l'électricité. Dans ses versions les plus économiques l'onduleur ne peut fonctionner qu'en présence du réseau, une éventuelle panne de ce dernier rend inopérant le système de production d'origine renouvelable. Un onduleur réversible est nécessaire si on a une charge à courant continu. Si la consommation locale est supérieure à la production de la centrale, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs voisins

Un schéma simplifié d'un système PV couplé au réseau est représenté sur la figure 2.2. Le GPV alimente les charges et charge les batteries de stockage quand la lumière du soleil est disponible. Les batteries assurent la puissance aux charges par ailleurs. Un onduleur convertit le courant continu des panneaux PV en un courant alternatif adapté aux récepteurs. Dans de tels systèmes, il est préférable d'employer plusieurs onduleurs et batteries pour assurer la continuité de service. Les efforts de recherche, les avancées dans le domaine des convertisseurs de puissance et la réduction du coût des panneaux PV ont permis une transition réussie des systèmes photovoltaïques autonomes vers les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau. Ceci a permis une amélioration de point de vue économique et sécurité de service des installations (les deux paramètres les plus importants de tout système de puissance) [18]. Le réseau alimente les charges du site si c'est nécessaire et absorbe l'éventuel excès de puissance des générateurs photovoltaïques. Deux façons existent de concevoir un système PV relié au réseau : en tant que générateur photovoltaïque connecté depuis l'utilisateur au réseau ou en tant que grande station de production raccordée au réseau [20].

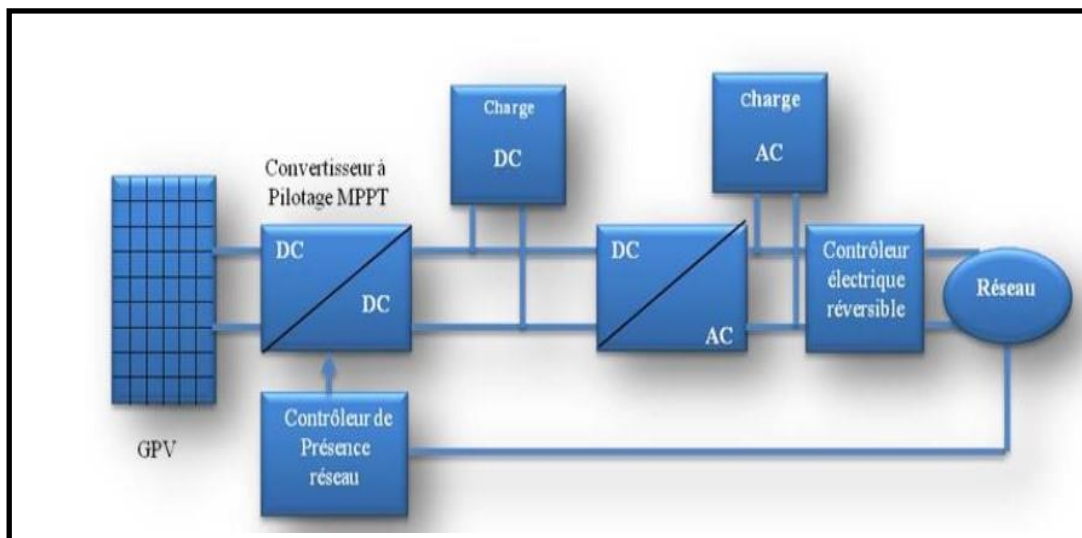


Figure 2.2. Composants d'un système photovoltaïque relié au réseau [19]

2.2 Energie solaire

L'énergie solaire est de loin, l'énergie qui concentre, actuellement le plus d'efforts d'essor (figure 2. 3), et par conséquent enregistre le meilleur taux de croissance annuel depuis 1990 (figure 2.4) ainsi que la plus importante réduction de coût. En 2015, la moyenne mondiale des coûts pour le photovoltaïque à base de

silicium cristallin était de 122\$ par MWh contre 143\$ en 2014. Des projets spécifiques vont encore réduire les coûts de l'énergie PV: le record est attendu à être pour une installation de 200 MW, en phase d'installation à Dubaï par la société ACWA Power International, couronnée par un contrat à seulement 58,50\$ par MWh [4-6].

2.2.1 Ensoleillement et irradiation solaire

Dans le cadre des applications utilisant l'énergie solaire, il est impératif de pouvoir mesurer l'énergie reçue, sous forme de lumière, par une surface donnée pendant un temps donné. Deux mesures sont utilisées à cette fin: La radiation solaire (appelée aussi ensoleillement) et l'irradiation solaire. La radiation solaire (ensoleillement) est la quantité d'énergie, due au flux de la lumière solaire incidente, reçue par une surface de la Terre (en kW/m²). A ne pas confondre avec le terme « irradiation solaire » qui désigne l'énergie, due au soleil, reçue par une surface donnée en un temps donné (en kWh ou kWh/heure ou kWh/jour...): c'est l'intégral par rapport au temps de l'ensoleillement.

Par exemple : si une surface de 1 m² reçoit 1 kW de puissance solaire radiative pendant une heure, alors l'énergie reçue par cette surface est de 1 kWh [1, 3].

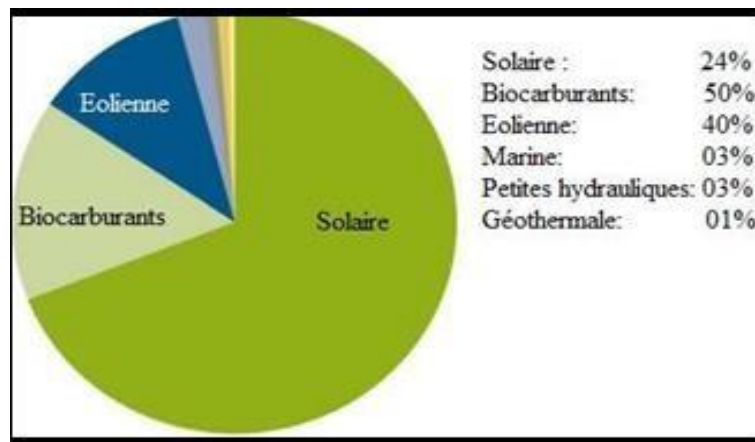


Figure 2.3. Investissements en énergies renouvelables pour l'année 2015[6].

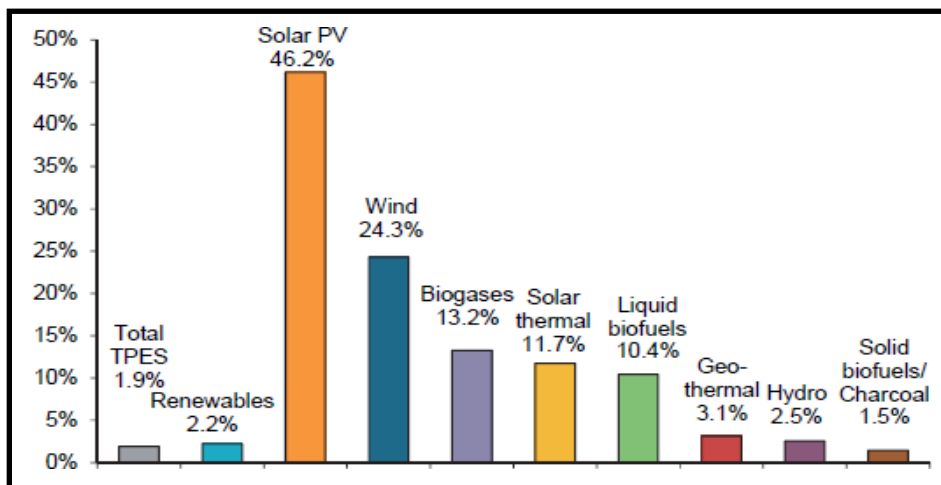


Figure 2.4. Taux de croissance annuel des énergies renouvelables de 1990 à 2014[5].

2.2.2 *Spectre solaire*

Le spectre solaire fait référence à la distribution du rayonnement électromagnétique émis par le soleil en fonction de la longueur d'onde incidente sur la surface externe de l'atmosphère. Le rayonnement solaire atteignant la terre s'étend sur une gamme de longueurs d'ondes allant de 250 nm (nanomètre) à environ 4000 nm (figure 2. 5) [7]. Une partie est réfléchiée par l'atmosphère terrestre tandis que le reste est absorbé par la surface de la Terre.

Dans le tableau 2.1, nous présentons les valeurs énergétiques caractéristiques des photons pour diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux.

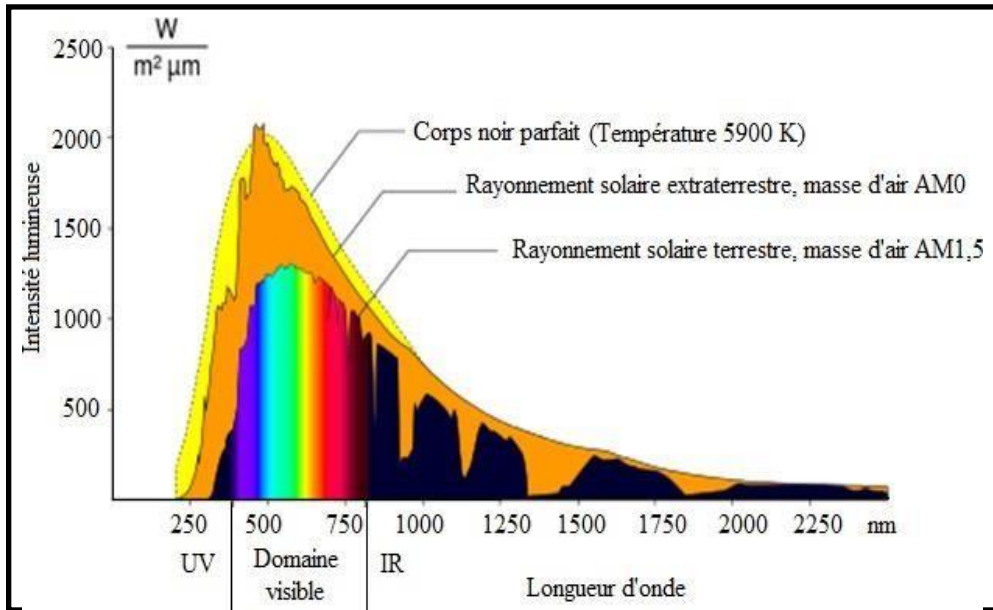


Figure 2.5. Spectre du rayonnement solaire

Tableau 2.1. Les valeurs énergétiques caractéristiques des photons [8].

λ (μm)	E (ev)	Zone		
0,2	6.2	Ultra-violet	Ultraviolet (UV)	$0,20 < \lambda < 0,38 \mu\text{m}$
0.4	3.1	Visible bleu		
0.5	2.48	Visible jaune-vert	Visible	$0,38 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$
0.78	1.59	Visible rouge		
1	1.24	Infrarouge	Infrarouge (IR)	$0,78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$
2	0.62	Infrarouge		
4	0.31	Infrarouge		

En pratique, on distingue deux différentes distributions spectrales solaires dépendant de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser (figure 2.6)

2.2.3 Spectre (Coefficient) Air Masse- AM0

Utilisé pour les applications hors atmosphère terrestre, il correspond à une radiation solaire sans atténuation atmosphérique à une distance Terre-Soleil d'une unité astronomique (l'unité astronomique est la distance moyenne Terre-Soleil et vaut $1,496 \times 10^8$ km).

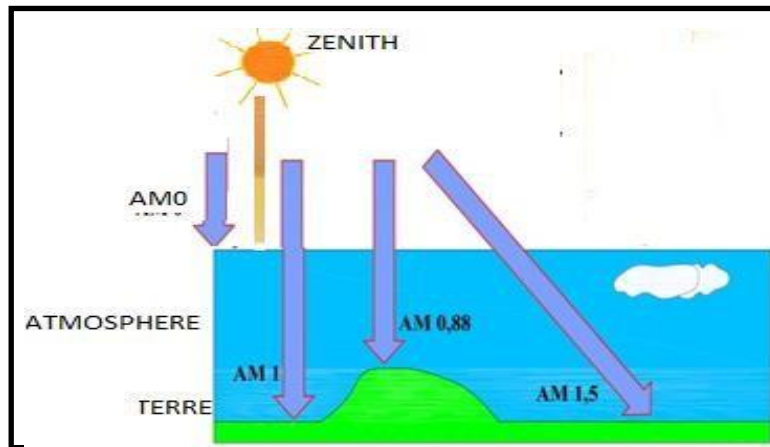


Figure 2.6. Distribution du nombre de la Masse de l'air (Air Mass) AM

2.2.4 Spectre Air masse AM1,5

Utilisé pour les applications terrestres et correspond à un soleil de midi à une inclinaison d'environ 48° (un rayonnement traversant 1,5 fois l'épaisseur de la couche atmosphérique terrestre). AM1 correspond à un soleil au zénith (90°) aux mêmes conditions.

On définit, en plus, la « constante solaire » comme la quantité d'énergie solaire que recevrait un disque d'une surface de 1 m² situé à une distance de 1 unité astronomique du Soleil, exposé perpendiculairement à ses rayons, en l'absence d'atmosphère [8]. Pour la Terre, c'est donc la densité de puissance solaire exprimée en W/m² au sommet de l'atmosphère. La valeur standard de la constante solaire est de 1353 W/m² [8, 9].

2.2.5 Technologies de l'énergie solaire (l'énergie lumière)

Quelle est l'origine de l'énergie fournie par le Soleil ? Un gaz essentiellement constitué d'hydrogène s'échauffe pour atteindre 10 millions de degrés. À cette température extrême, des réactions nucléaires permettent de modifier les noyaux d'hydrogène. Plus précisément, les noyaux d'hydrogène fusionnent pour former des noyaux d'hélium. Cette fusion nucléaire est à l'origine de l'énergie fournie par le Soleil. Autrement dit, l'énergie solaire provient de la fusion nucléaire qui se produit au centre du Soleil. Elle se propage dans le Système solaire et dans l'univers essentiellement sous la forme d'un rayonnement électromagnétique dont la lumière n'est que la partie visible [8].

Quelle sont les différents modes d'exploitation de l'énergie solaire. Pour en produire de l'énergie électrique, l'énergie solaire (figure.2.7) peut être exploitée de deux façons : l'énergie solaire thermodynamique et l'énergie PV. Mais en réalité il existe quatre grandes familles d'énergie solaire :

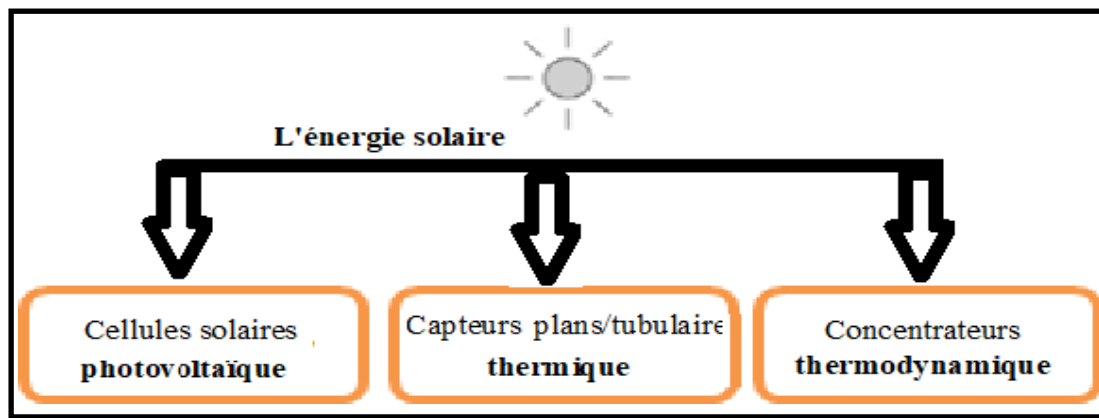


Figure 2.7. Les différents modes d'exploitation de l'énergie solaire.

2.3 Les 4 grandes familles d'énergie solaire

a) L'énergie solaire passive

Utilisation directe de la lumière pour le chauffage (habitat conçu pour capter chaleur et lumière solaire),

b) L'énergie solaire thermique

Production de chaleur, par conversion de l'énergie contenue dans le rayonnement solaire, très rentable pour le chauffage dans les régions ensoleillées. (Production d'eau chaude ou chauffage). L'énergie solaire thermique, quant à elle, produit de la chaleur à partir du rayonnement solaire infrarouge du soleil afin de chauffer de l'eau, de l'air ou un autre fluide. La technologie est plus simple et moins onéreuse, il s'agit de capter les calories grâce à des surfaces absorbantes de la chaleur, des tubes métalliques peints en noir par exemple. Cela permet de réaliser des chauffe-eau solaires individuels ou collectifs.

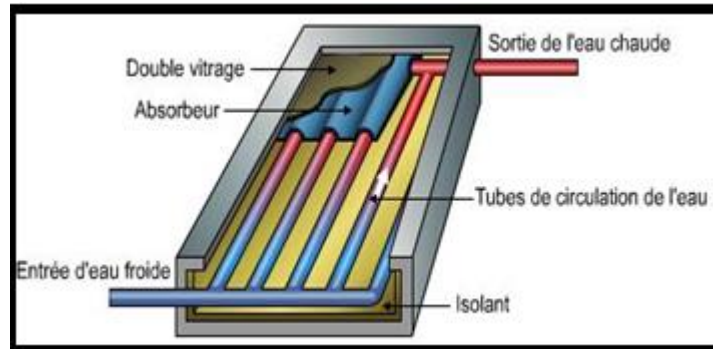


Figure 2.8a. Le Solaire Thermique est récupérée pour fournir de la chaleur pour la production d'eau chaude, ou la climatisation.

c) L'énergie solaire thermodynamique (heli-thermo-dynamique ou thermo-solaire)

C'est la production de vapeur à partir de la chaleur du soleil par concentration, puis conversion de la vapeur en électricité. L'exploitation thermodynamique de l'énergie solaire, concerne de grandes centrales équipées de concentrateurs de rayons solaires, sous forme de miroirs galbés, dont la fonction est de chauffer un fluide (bouillir un liquide généralement de l'eau sur un tuyau) à haute température afin de générer de vapeur par échange thermique qui fait tourner une turbine pour produire de l'électricité au moyen d'une turbine à vapeur par exemple. Dans a figure 2.8, on présente un exemple de l'énergie solaire thermique.

Une autre solution d'utiliser l'énergie solaire thermodynamique est le solaire sur tour: la lumière solaire est reflétée par des milliers de miroirs entourant une grande tour ; cette lumière est concentrée sur un seul point de la tour permettant de chauffer un liquide qui de son côté fait bouillir de l'eau afin de créer de la vapeur pour faire tourner une turbine, comme c'est illustré dans la figure 2.9. Du fait qu'elle nécessite, pour son installation, de grandes surfaces de sol (70 à 100 km² pour 1 GW), la technologie de l'énergie solaire thermodynamique convient plus pour les pays caractérisés par un ensoleillement important et une densité de population faible.



Figure 2.8b. Energie solaire *thermodynamique* (concentrateurs)



Figure 2.9. Energie solaire sur tour

d) L'énergie solaire photovoltaïque

Production d'électricité à partir de la lumière (photons), notamment à l'aide de panneaux solaires qui regroupent ensemble des cellules solaires photovoltaïques en séries et en parallèles.

2.3 Cellule solaire photovoltaïque

Une cellule PV est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique, elle convertit directement l'énergie reçue de la lumière du soleil en courant électrique [10]. Le principe de fonctionnement est identique pour toutes les technologies de

cellules PVs. Une cellule PV contient toujours une jonction entre deux matériaux différents séparés par une barrière de potentiel électrique (Voir figure 2.10). L'absorption d'une quantité d'énergie (de photons) supérieure à la bande interdite du semi-conducteur provoque le saut des électrons de la bande de valence à la bande de conduction, créant des paires trou-électron [11].

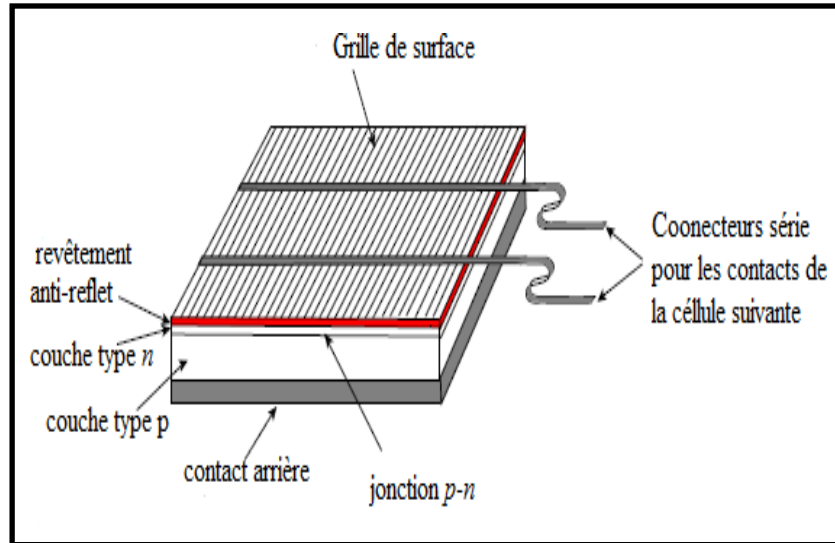


Figure 2.10. Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin.

La jonction p-n force les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau, de ce fait, une différence de potentiel apparaît entre les deux faces. Cette effet, découvert par le physicien français Edmond Becquerel en 1839, est connu sous le nom: "effet photovoltaïque". La figure 1.8 montre les composants essentiels d'une cellule PV. La figure 2.11 montre comment créer un courant électrique en exposant une cellule photovoltaïque à la lumière du soleil.

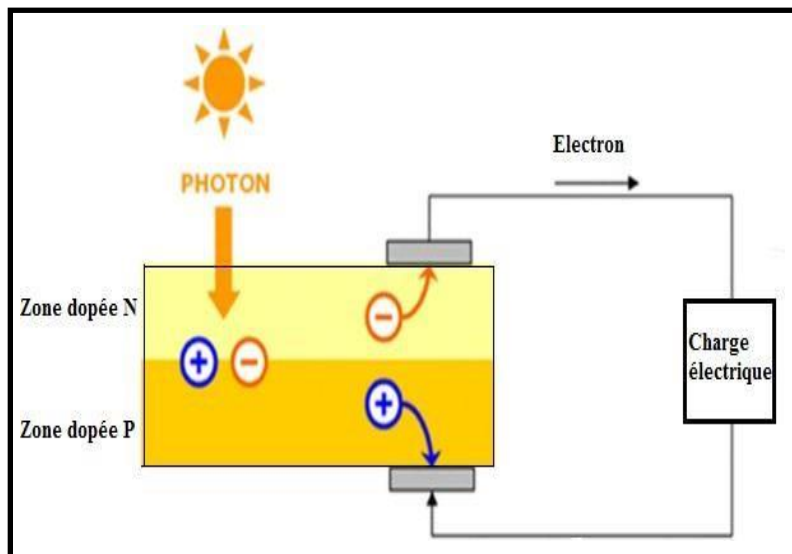


Figure 2.11. Génération et mouvements des porteurs de charges libres dans une jonction *p-n*

Plusieurs matériaux semi-conducteurs de différents rendements et différents coûts sont utilisés pour fabriquer des cellules photovoltaïques [10]. Les principales technologies en qualité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (le marché des cellules photovoltaïques est dominé à plus de 90 % par le silicium cristallin, sont chers, lourds, fragiles et difficiles à installer, et même dans sa forme la plus pure, n'absorbe que peu d'énergie solaire) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium). D'autres matériaux absorbent de 100 à 1000 fois mieux l'énergie solaire. Par ailleurs, 20 % environ de l'énergie des panneaux solaires est perdue à cause des batteries au plomb, qui sont peu performantes. [11-13].

Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Ainsi, le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique de nature continu (Direct Current-DC). L'énergie transportée par les photons constituant le rayonnement solaire est donnée par la relation suivante [5] :

$$\left(E_{ph} = h \cdot \nu = h \frac{c}{\lambda} \right) \quad (2.1)$$

On peut donner cette énergie de photon exprimée en électronvolts avec sa longueur d'onde exprimée en micromètres par la relation suivante :

$$\left(E_{eV} = \frac{1,2419}{\lambda_{\mu m}} \right) \quad (2.2)$$

Avec :

E_{ph} : Energie en joule ; E_{eV} : Energie en eV

h : constante de Plank ($h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s).

ν : Fréquence en hertz

c : Vitesse de la lumière en m/s

λ : Longueur d'onde en mètres

La conversion de photons en électrons dans un matériau pouvant produire un courant électrique nécessite que:

- Les photons soient absorbés par le matériau (absorption optique) en transmettant leur énergie au matériau ;

- L'énergie transmise aux électrons soit une énergie potentielle et non une énergie thermique ;
- Les électrons excités par les photons soient collectés avant de reprendre leur énergie initiale (relaxation), afin de fournir un courant électrique.
- La circulation de ce courant donne alors naissance à une force électromotrice aux bornes du semi-conducteur correspondant ainsi au phénomène physique appelé effet photovoltaïque.

Sous certaines conditions, les photons dont l'énergie est supérieure à E_g (la largeur de la bande interdite du matériau) peuvent passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction laissant ainsi un trou dans la bande de valence. L'électron et le trou ainsi libérés doivent rapidement être collectés pour participer ensuite à la conduction électrique avant leur recombinaison. Les critères d'un convertisseur idéal photon-électron sont les suivantes :

- Le dispositif de collecte nécessite un champ électrique important au niveau de la création des paires électron-trou ;
- Le matériau semi-conducteur dont la largeur de bande interdite est comprise entre 0,7 et 4 eV est un matériau photovoltaïque du spectre solaire.

La jonction PN sous éclairage, caractérisée par une barrière de potentiel importante au niveau de la jonction et réalisée à partir de matériaux semi-conducteurs photovoltaïques constitués d'un cristal, est la solution actuellement la plus répandue de convertisseur photovoltaïque (d'autres structures, comme les hétérojonctions et les diodes Schottky peuvent également être utilisées). Similaire à une diode utilisée classiquement en électronique, une cellule PV peut être réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore). La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et surtout de collecteurs d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode [8-11]., la figure 2.12 nous illustre un exemple d'une constitution d'une cellule PV en silicium comme matériau PV (image gauche).

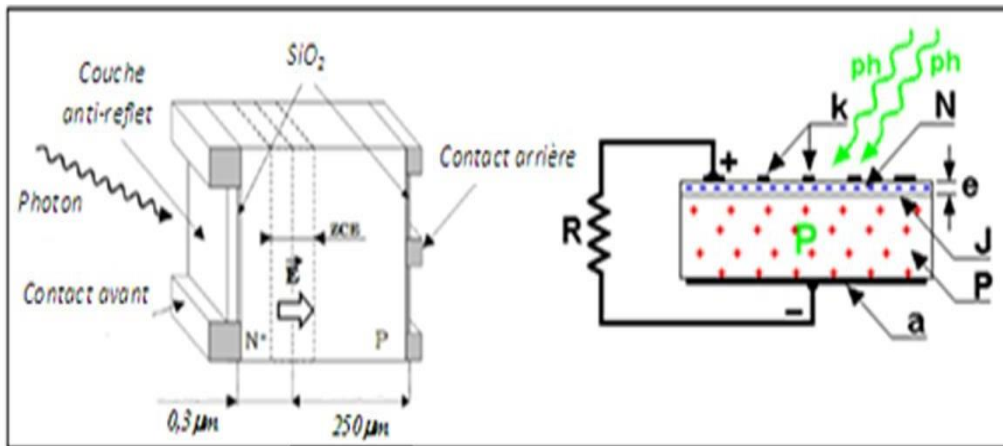


Figure 2.12. Structure d'une cellule PV, utilisant le silicium comme matériau PV (image gauche) ; présentation de la jonction PN d'une cellule PV (image droite).

Examinons le fonctionnement d'un tel dispositif. Imaginons que l'on sépare la jonction en deux parties et qu'on relie la région N au pôle négatif d'un générateur et la région P au pôle positif (polarisation directe). Les électrons libres de la région N, ainsi que les trous libres de la région P, vont vers la jonction, vu le sens de polarisation. Si les deux parties sont en contact, un courant passe. Les électrons sont injectés dans la région P et les trous dans la région N. On dit qu'il y a injection de porteurs minoritaires. Si l'on polarise la jonction en sens inverse, les électrons allant vers le pôle (+) et les trous vers le pôle (-), ils s'éloignent de la jonction, laissant au voisinage de celle-ci des charges dues aux impuretés ionisées. Mais ces impuretés sont des atomes rigidement liés au réseau cristallin, qui ne peuvent se déplacer. Si l'on met les deux parties en contact, on a au voisinage une région isolante, et la résistance du dispositif en polarisation inverse sera donc très élevée. La jonction PN joue donc le rôle d'un redresseur laissant passer le courant électrique en polarisation directe et présentant une très forte résistance en polarisation inverse. Si la polarisation est directe, il y a injection de porteurs minoritaires, par exemple des électrons dans la région P ; ces électrons ont tendance à se recombiner avec les trous présents en grand nombre dans cette région P ; ils le font au bout d'un temps τ appelé durée de vie des porteurs minoritaires.

Cette durée de vie est l'un des paramètres fondamentaux qui détermine la qualité de la jonction. Plus τ est grand, plus l'effet redresseur est marqué. Le silicium est à ce sujet le meilleur semi-conducteur connu (τ peut atteindre la valeur de 1 milliseconde, alors qu'il est de l'ordre de la microseconde pour la plupart des autres semi-conducteurs). Un autre paramètre important est la longueur de diffusion: l'électron injecté dans la région P diffuse sur une certaine distance L avant de disparaître au bout du temps τ ; c'est cette longueur moyenne parcourue par les électrons dans la région P qui est appelée longueur de diffusion. Elle est de l'ordre de plusieurs micromètres pour le silicium.

Si l'on soumet une jonction PN de faible épaisseur à un flux lumineux, des paires électron-trou sont créées par les photons dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite du matériau semi-conducteur. Il en résulte une augmentation du courant inverse de saturation proportionnelle au flux lumineux. Physiquement, cet effet se traduit de deux manières selon le quadrant de fonctionnement du dispositif. Dans le 3^{ème} quadrant, le système fonctionne en récepteur dont la résistance varie fortement avec l'éclairement, c'est la photorésistance. Dans le 4^{ème} quadrant, le système fonctionne en générateur dont le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement et dont la tension à vide est celle de la diode en polarisation directe (0.5 à 0.8V pour Si). C'est la cellule PV à jonction PN, comme c'est illustré dans la figure 2.13.

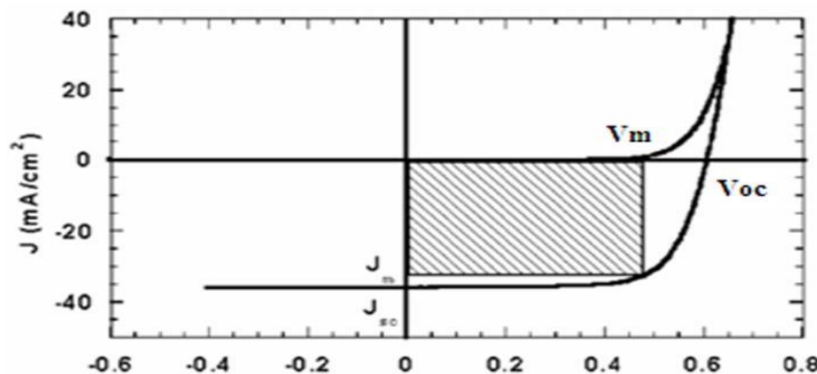


Figure 2.13 : Caractéristique Courant-Tension sous obscurité et sous éclairage d'une cellule PV.

La caractéristique de la cellule solaire $I = f(V)$ dans l'obscurité est présentée comme étant une diode au silicium comme suit, [15] :

$$I_{CELL} = I_D = I_{SAT} \left(\exp\left(\frac{V_{CELL}}{nV_T}\right) - 1 \right) \quad (2.3)$$

Par contre, si la cellule est subie une illumination, la relation devient :

$$I_{CELL} = I_{CC} - I_D = I_{CC} - I_{SAT} \left(\exp\left(\frac{V_{CELL}}{nV_T}\right) - 1 \right) \quad (2.4)$$

Où I_D (A) le courant de la diode,

I_{SAT} (A) correspondant au courant de saturation,

I_{CELL} (A), le courant fourni par la cellule,

V_{CELL} (V), la tension aux bornes de la cellule,

I_{CC} (A), le courant de court-circuit de la cellule dépendant de l'ensoleillement,

n , Le facteur de non idéalité de la jonction,

K_B (J/K), la constante de Boltzmann, ($1.3806504 \times 10^{-23}$ J/K)

T (K), la température effective de la cellule,

e (C), la charge de l'électron, ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C)

$V = k_B T/q$, V_T (V) la potentielle thermodynamique

Pour la réalisation d'un GPV à partir des cellules PVs, nous nous intéresserons uniquement au quadrant IV. Pour cela, nous allons représenter les caractéristiques dans un nouveau repère $I = f(V)$ donné par la figure 2.14, où le courant de saturation inverse est compté positivement. Communément nommée tension de circuit ouvert (V_{OC}) fortement dépendante de la température. Le courant maximal photovoltaïque se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. On parle alors de courant de court-circuit (I_{CC}) dépendant fortement du niveau de (G). [12, 14]. La figure 1.12 illustre les caractéristiques non linéaire $I(V)$ d'un GPV (plusieurs modules ou cellules photovoltaïques) à base de silicium pour un éclairage et une température donnée, avec la présence d'un point de puissance maximal (PPM) caractérisé par sa tension et son courant optimaux (V_{OPT} et I_{OPT}).

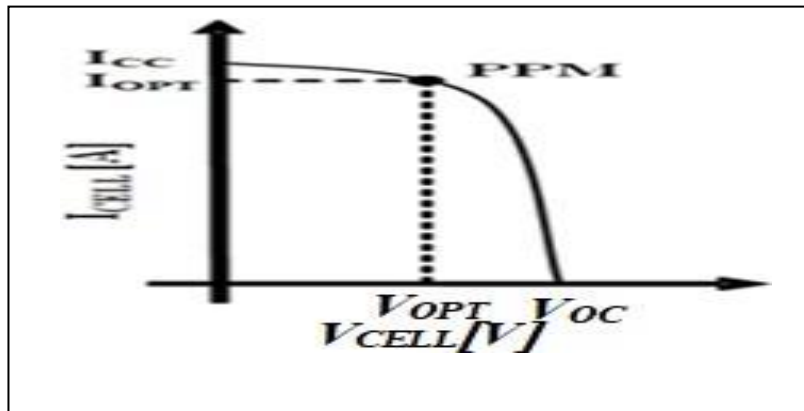


Figure 2.14 : Caractéristique $I(V)$ d'une cellule PV (dans le nouveau repère)

Vu le courant engendré par l'éclairement de la cellule, une cellule PV est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par 2 résistances $R_{s(pv)}$ et $R_{p(pv)}$ modélisant les pertes.

La $R_{s(pv)}$ est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts faces avant et arrière. Elle caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. La $R_{p(pv)}$ est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction, lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule. Elle caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace.

L'existence de fissures et de défaut de structures complexes devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle $R_{p(pv)}$. L'ordre de grandeur de la résistance parallèle pour une cellule au Si : $R_{p(pv)} = 10^2$ à $10^4 \Omega$. $R_{p(pv)}$ augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle. Ainsi, en statique, le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation (2.4) [15-20]:

Le modèle équivalent électrique représentant le comportement statique d'une cellule PV réelle est indiqué dans la figure 2.15.

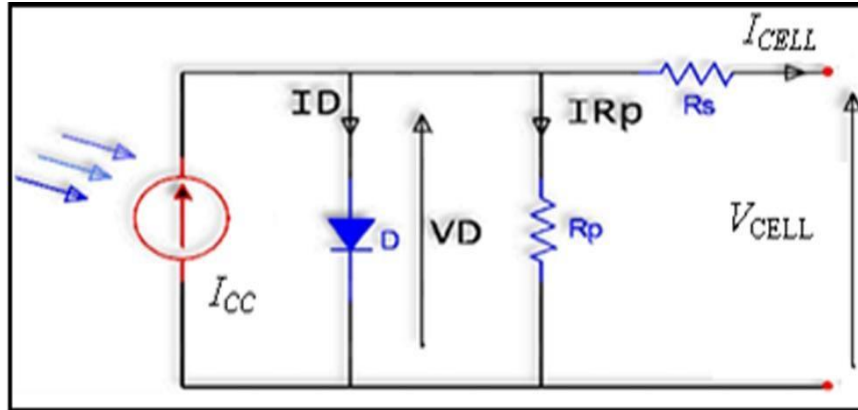


Figure 2.15. *Modèle équivalent électrique de la cellule photovoltaïque.*

Ce modèle simplifié nous permet de modéliser le comportement d'une source d'énergie électrique provenant de capteurs PV. Ainsi, comme illustré sur la figure II.4, la cellule peut être assimilée à une source de tension, à droite du PPM, plus ou moins parfaite en fonction de la pente dI/dV proche de la verticale et à une source de courant à gauche du PPM. Pour la mise au point des commandes MPPT appropriées, cette modélisation s'avère très utile pour en déduire les performances de ces commandes autour du PPM.

2.3.1. Le générateur photovoltaïque

La différence de potentiel d'une cellule PV est relativement faible (0.3 à 0.7 V) avec une puissance entre 1 et 2 W [15], bien insuffisante pour la plupart des applications. Pour avoir une puissance plus élevée, plusieurs cellules solaires sont connectées en série/parallèle pour avoir un panneau PV. La figure 1.14a montre un exemple de connexion en série de 3 cellules PV identiques. La tension résultante, dans ce cas, est 3 fois la tension d'une cellule unique tandis que le courant résultant est le même que le courant d'une seule cellule. On trouve aussi des regroupements de cellules en parallèle (figure 2.16). Dans ce cas, le courant total produit est la somme des courants produits par chacune des cellules et la tension entre les bornes du regroupement est la même entre les borne d'une cellule. Les arrangements de cellules série/parallèle définissent donc les valeurs de la tension et du courant pour des conditions données d'ensoleillement et de charge.

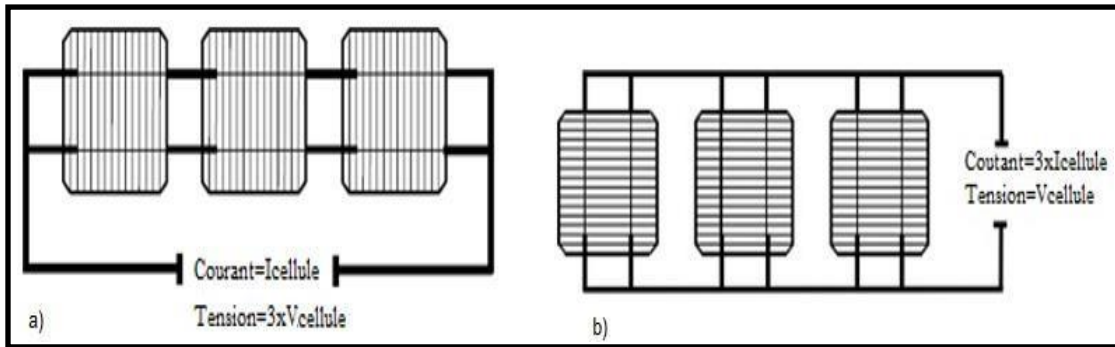


Figure 2.16. a) Connexion en série de cellules PV avec le courant et la tension résultants

b) Connexion en parallèle de cellules PV avec le courant et la tension résultants

Ces arrangements de cellules sont très fragiles et il est impératif de les encapsuler dans un verre trempé et de plastique (généralement du polymère EVA-thylène-vinyl-acetate) pour avoir un module (figure 2.17). Le module est finalisé en le mettant dans un boîtier lui assurant une bonne rigidité et contenant les contacts électriques [21, 22].

Le courant et la puissance d'une cellule PV, peuvent être limités par un ombrage local. Ceci peut provoquer un phénomène appelé « point chaud », si le nombre de cellules en série est important, un courant inverse important traverse la cellule ombragée (pouvant dépasser le courant inverse supporté par la cellule) [22]. Une dissipation de puissance énorme se produit ainsi en une surface réduite causant un point chaud qui peut endommager voire exploser la cellule ombragée. Pour éviter ce phénomène, des diodes de contournement (bypass) sont insérées en parallèle (dans la direction opposée à la diode cellule) à la cellule ou à une série de cellules (figure 2.18)

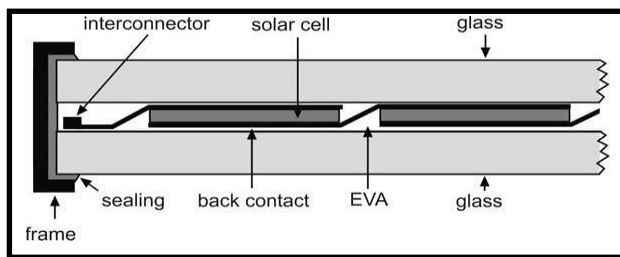


Figure 2.17. Section d'un panneau PV encapsulé

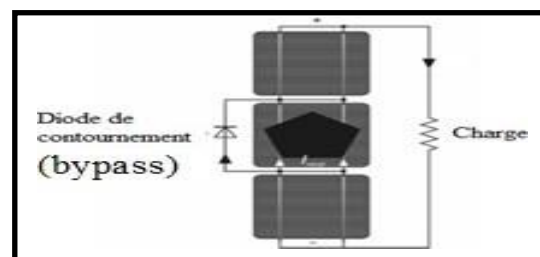


Figure 2.18. Diode de contournement

Les modules sont fabriqués selon les normes de performance européennes et internationales. Il existe différentes normes pour différentes technologies telles que la technologie cristalline (Norme CEI 61215) et la technologie à couche mince (Norme CEI 61646). Les deux normes exigent des essais d'échantillons aléatoires à prélever dans un lot de production. Les essais consistent en un examen visuel des échauffements localisés ou

des cellules fissurées, ainsi que des essais électriques tels que la résistance diélectrique et le courant de fuite en milieu humide. Les modules sont testés dans différentes conditions de rayonnement simulés telles que l'exposition en site naturel, l'exposition aux UV, l'exposition prolongée au rayonnement lumineux, ainsi que dans différentes conditions environnementales. A noter que pour un bon fonctionnement, les cellules doivent être pratiquement identiques, surtout en termes de tension de sortie. Un panneau photovoltaïque (ensemble des cellules photovoltaïques) est caractérisé par:

- La P_c : c'est la puissance produite par le panneau aux conditions standard de Température $T= 25^\circ\text{C}$ et d'ensoleillement $E = 1000 \text{ W/m}^2$.
- La caractéristique courant-tension: C'est une courbe qui donne la variation du courant produit par le module en fonction de sa tension de sortie pour des conditions standard. On peut aussi tracer la courbe puissance-tension pour les mêmes conditions (figure 2.19). Dans ces courbes, un point est le plus remarquable:
- Le PPM est le point de fonctionnement qui fournit le maximum d'énergie. Plusieurs solutions sont développées afin de forcer le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque à s'en approcher le plus possible.
- D'autres points caractérisent aussi le panneau: Le courant de court-circuit I_{cc} . La tension en circuit ouvert V_{co} pour des conditions de fonctionnement données.

Dans le but de permettre une comparaison entre les différents panneaux PVs sur le marché, les normes ont défini des conditions standards de test (STC: Standard Test Condition): Un spectre solaire correspondant à AM1.5, un ensoleillement E de 1000 W/m^2 et une température T de fonctionnement fixée à 25°C .

Un champ PV est obtenu en arrangeant en série/parallèle plusieurs panneaux. La configuration définit la tension et le courant de sortie du champ PV pour un E , une T ($^\circ$) et une charge donnés (figure 2.20).

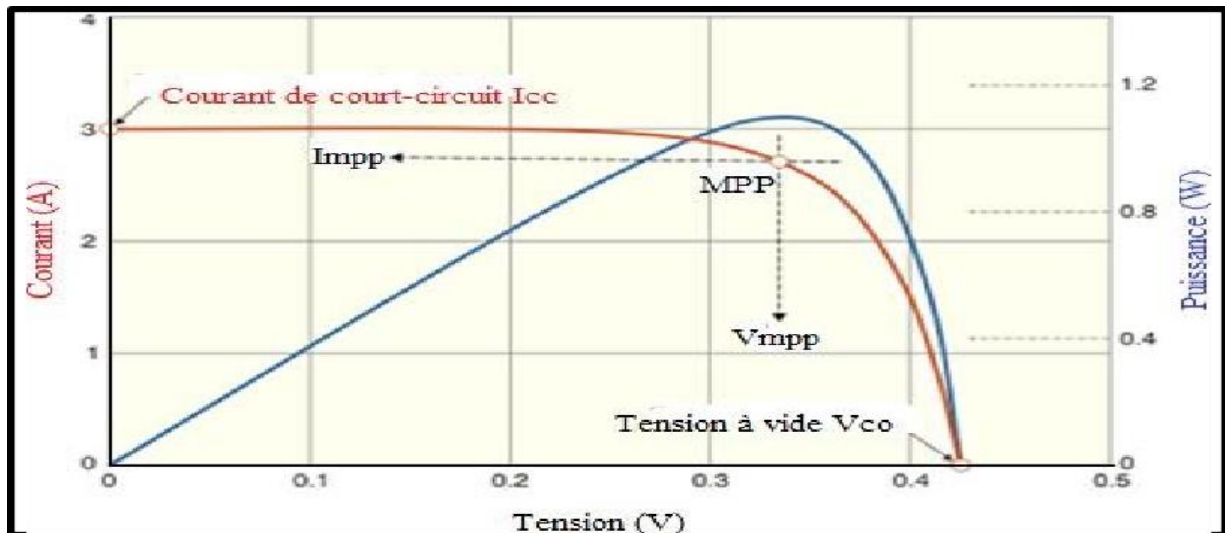


Figure 2.19. Courbes caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

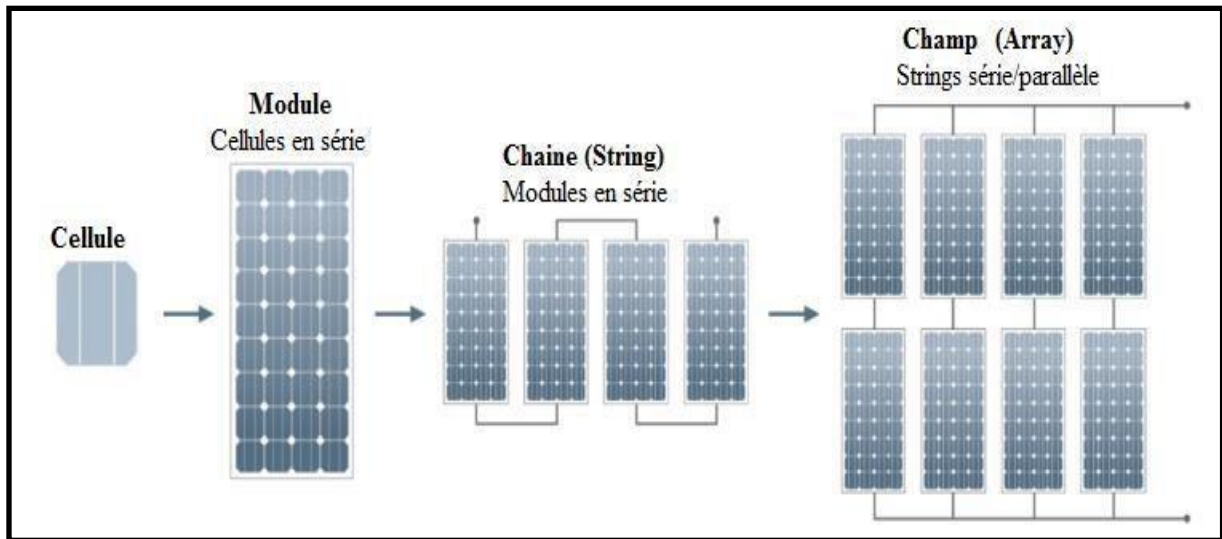


Figure 2.20. De la cellule photovoltaïque au champ

2.3.2. Les convertisseurs de puissance

D'une manière globale, les unités de conditionnement de puissance (UPC) sont utilisées pour contrôler la puissance produite (sous forme de courant continu) à partir du générateur photovoltaïque et de convertir cette puissance en courant alternatif de haute qualité avant de l'injecter dans le réseau de distribution. Les systèmes photovoltaïque peuvent être classés selon le nombre d'étages de conversion adoptés en systèmes à un ou à deux étages. Dans les systèmes à un étage, un seul convertisseur de puissance est utilisé pour effectuer toutes les fonctions de contrôle requises. Dans un système à deux étages, un convertisseur DC-DC est utilisé en amont de l'onduleur et les fonctions de contrôle sont réparties entre les deux convertisseurs de puissance. Comparativement aux systèmes mono-étage, les systèmes à deux étages offrent l'avantage d'une plus grande souplesse de contrôle mais sont plus coûteux et plus volumineux. En se focalisant sur les fonctions de l'électronique de puissance dans les systèmes photovoltaïques reliés au réseau, cinq fonctions de base communes sont identifiées :

2.3.3. La fonction MPPT

L'unité de conditionnement de puissance contrôle la tension continue afin d'assurer, quelques soient les conditions de température et d'ensoleillement, un fonctionnement en point de puissance maximale des modules photovoltaïque.

Dans un système PV, la puissance délivrée par chaque panneau est fonction de la température, de l'ensoleillement et de la charge. Le point de fonctionnement est l'intersection entre la ligne de charge et la courbe courant-tension du générateur PV. Hors, cette courbe change en permanence avec la température et l'ensoleillement. Pour des conditions de fonctionnement données, un point unique de la courbe courant-tension existe où la puissance délivrée par le générateur PV est maximale. Il est primordial que le point de fonctionnement soit à tout instant le plus possible collé à ce point. Pour cela, un système basé sur de

l'électronique de puissance, nommé MPPT (Maximum Power Point Tracker), est généralement ajouté aux systèmes. Un MPPT comprend un algorithme qui fournit une ou plusieurs grandeurs de référence (courant, tension, puissance) permettant de contrôler un convertisseur (souvent un DC-DC) afin de forcer le générateur PV à fonctionner à son point de puissance maximale. Plusieurs méthodes et algorithmes sont développés à cette fin [23]: Méthode P&O (Perturb and observe), Incrémentation d'inductance (Incremental inductance), méthode de la tension constante, méthodes basées sur l'intelligence artificielle...

La variation de l'amplitude de la tension : Si l'onduleur PV utilise une VSI (Voltage Source Inverter) comme interface avec le réseau, sa tension de sortie est toujours inférieure à sa tension d'entrée. Si le système PV délivre une tension inférieure à la tension crête du réseau, un élévateur de tension est nécessaire (transformateur ou convertisseur DC-DC) [22].

2.3.4. *L'interface avec le réseau*

C'est la fonction principale de l'onduleur PV. Les panneaux photovoltaïques produisent un DC inadapté pour une utilisation domestique ou être injecté au réseau. Un onduleur est donc indispensable pour permettre que le courant ainsi généré réponde aux normes fixées par le gestionnaire du réseau, tant au niveau de la qualité d'énergie qu'au niveau de la protection des biens et des personnes en cas de mise hors tension accidentelle ou lors d'interventions sur le réseau. Le découplage entre la tension DC et la tension AC: Les fluctuations de puissance dues aux fréquences de commutation des interrupteurs entre le côté DC et le côté AC du convertisseur doivent être séparées en ajoutant un condensateur formant un DC-link [22].

2.3.5. *L'isolation galvanique*

Cette fonction est assurée par l'emploi de transformateurs. Les transformateurs fonctionnant à la fréquence du réseau présentent beaucoup d'inconvénients (poids, coût, pertes, facteur de puissance...). Ces points faibles poussent au développement de nouveaux transformateurs fonctionnant à haute fréquence ainsi qu'à l'emploi des onduleurs sans transformateurs caractérisés par des rendements très élevés, des poids réduits, et des coûts meilleurs.

En plus de ces fonctions, l'onduleur doit être capable de détecter tout dysfonctionnement et de déconnecter par conséquent le générateur photovoltaïque.

2.3.6. *Classification des onduleurs photovoltaïques*

Le courant continu est transformé en courant alternatif par des dispositifs de l'électronique de puissance (onduleurs): des interrupteurs sont ouverts et fermés successivement, produisant en sortie une forme d'onde carrée. Les onduleurs peuvent être classés, selon le contrôle de commutation des interrupteurs en deux catégories : onduleurs autonomes et onduleurs non autonomes. Non autonome signifie que la tension du réseau détermine la commutation de l'onduleur : en utilisant des thyristors en tant qu'interrupteurs - les thyristors ne pouvant être que fermés -, le passage de la tension du réseau les ouvre de nouveau. En l'absence du réseau électrique, ce type d'onduleur ne fonctionne donc pas. Les onduleurs non autonomes produisent un signal de sortie AC de forme d'onde carrée possédant une faible qualité énergétique et un niveau d'harmoniques élevé.

Les onduleurs autonomes utilisent des dispositifs à semi-conducteurs pouvant être ouverts et fermés. Ils peuvent être utilisés dans des applications autonomes tout comme dans des systèmes PV raccordés au réseau. Dans les applications reliées au réseau, la commutation doit être synchrone à ce dernier. Les onduleurs alimentés à partir d'une source de courant (une source de courant constant, quelle que soit la charge) sont dénommés onduleurs de courant. Par contre, un onduleur de tension est alimenté par une source de tension (tension constante quelle que soit la charge), à laquelle les modules photovoltaïques peuvent être assimilés. Dans les applications PV, les onduleurs autonomes de tension sont généralement les plus utilisés.

Une autre classification des onduleurs peut être faite selon que l'onduleur incorpore un transformateur ou en est dépourvu. La différence principale réside dans le fait que les transformateurs fournissent une isolation galvanique entre le réseau public et le GPV.

Les topologies sans transformateurs sont récemment développées en réponse aux désavantages causés par l'emploi des transformateurs fonctionnant à la fréquence du réseau. Cette solution n'est pas adoptée par les pays où les règles de sécurité exigent l'isolation galvanique, comme aux Etats Unis d'Amérique. Ces pays ont opté pour la solution d'utiliser des transformateurs Haute Fréquence.

De plus, les transformateurs peuvent causer des pertes allant jusqu'à 2% et comportent un noyau métallique ainsi que des enroulements supplémentaires. Les onduleurs sans transformateur ont donc un rendement supérieur, sont 50 à 70% plus petits et sont moins chers à produire. Sans transformateur, le système PV doit être capable de fournir directement une tension sensiblement supérieure au pic de tension du réseau public : soit directement depuis le générateur PV, soit par des convertisseurs DC/DC. Ces convertisseurs causent également des pertes.

Les onduleurs photovoltaïques peuvent être monophasés ou triphasés. Les onduleurs monophasés produisent un signal à une phase qui alimente soit un réseau monophasé, soit une phase d'un système triphasé. Par conséquent, ils sont de conception plus simple que celle des onduleurs triphasés. En outre, le raccordement au réseau est plus facile, d'abord parce que moins de raccordements sont nécessaires et ensuite parce que les configurations monophasées sont utilisées dans les systèmes basses tension et pour des applications plus petites. Les onduleurs triphasés sont utilisés pour de plus grandes applications et peuvent aussi utiliser des niveaux de tension supérieurs. Un avantage des configurations triphasées est qu'elles fournissent un flux d'énergie total constant. Par conséquent, les besoins en stockage d'énergie concernant le condensateur de liaison DC (DC link) sont réduits.

Au cours des dernières années, beaucoup d'efforts étaient focalisés sur l'objectif de réduire le nombre d'étages de conversion de puissance dans l'ordre d'augmenter l'efficacité globale et la densité de puissance et de diminuer le coût. Ces efforts sont couronnés par le développement de convertisseur à un seul étage intégré au module PV satisfaisant toutes les exigences des systèmes photovoltaïques reliés au réseau [24].

Comme la puissance d'un seul module PV est relativement faible et fortement dépendante des conditions climatiques, la tendance est qu'un onduleur intégré intègre soit un convertisseur Boost, soit un convertisseur Buck, soit un convertisseur Buck-boost dans le but d'obtenir une tension continue satisfaisante. Un onduleur intégré peut ainsi fonctionner dans une large plage de tensions.

2.3.7 Les dispositifs de stockage

Vu le caractère intermittent de l'énergie solaire, l'utilisation de dispositifs de stockage d'énergie

électrique dans les systèmes PV reçoit actuellement beaucoup d'attention. Dans le cas des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau, l'ajout de ces dispositifs peut améliorer les performances du système:

Réduction des fluctuations de puissance, Alimentation des charges critiques lors de coupures de courant en plus d'être un support de puissance réactive. Il existe une variété de dispositifs de stockage tels que les batteries, les super-condensateurs, le stockage inertiel, le stockage sous forme d'hydrogène. Ces dispositifs varient en fonction de leurs caractéristiques, fonctionnement, et par conséquent, les fonctions qu'ils peuvent effectuer. Les dispositifs de stockage les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques sont: les batteries électrochimiques, les piles à combustibles, les super-condensateurs et l'air comprimé.

2.4 Configurations des systèmes PV reliés au réseau

Selon le type de connexion du générateur PV à l'unité de conditionnement de puissance, les systèmes PV reliés au réseau peuvent être classifiés en 4 configurations : onduleur par module, onduleur par chaîne de modules, onduleur par multi-chaîne et onduleur centralisé (Voir les configurations des onduleurs dans la figure 2.21).

Chaque configuration est caractérisée par la façon de regrouper les modules PV et la configuration de l'onduleur utilisée.

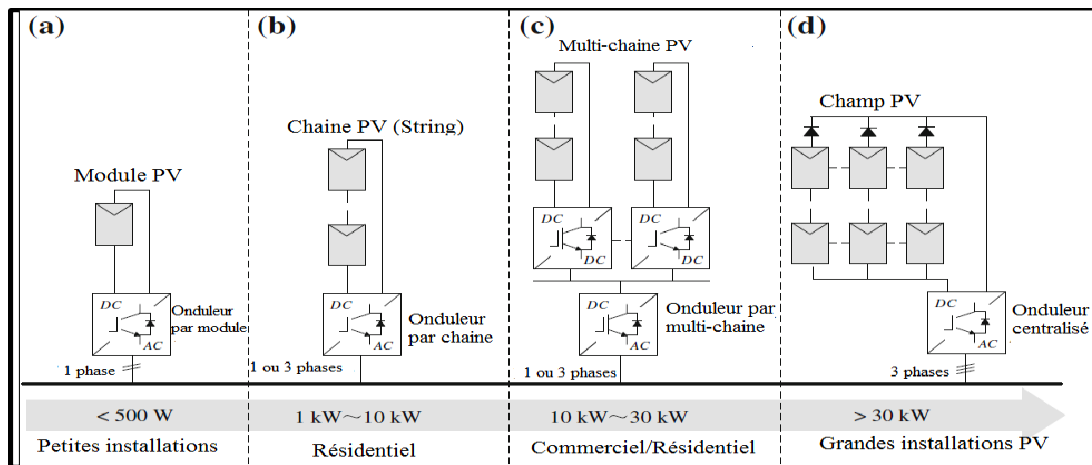


Figure 2.21. Architectures des systèmes photovoltaïques [6, 10]: onduleur par

(a) Module, (b) chaîne, (c) multi-chaîne, (d) onduleur centralisé

2.4.1. Configuration onduleur par module

Dans cette configuration, chaque onduleur élémentaire (micro-onduleur) est connecté à un module unique. Une telle configuration permet d'éliminer complètement les pertes liées au décalage entre les modules conduisant à d'excellents rendements énergétiques [6]. Un autre avantage de cet arrangement réside dans la facilité de son installation et de son extension. En réplique, ces systèmes sont pénalisés par un investissement

plus élevé qui augmente encore en cas de grande installation requérant un nombre important d'onduleurs. Ce type de systèmes est surtout utilisé pour les applications de faible puissance.

Les micro-onduleurs ont en plus l'avantage d'avoir une plus grande longévité (plus de 25 ans) [6]. Les micro-onduleurs de marque 'Enecsys' sont les premiers à être dépourvus de condensateurs électrolytiques (figure 2.22). C'est cette élimination du condensateur électrolytique qui a permis une nette amélioration de la durée de vie de l'ondeur atteignant plus de 25 ans et correspondant à la durée de vie d'un panneau PV [6].

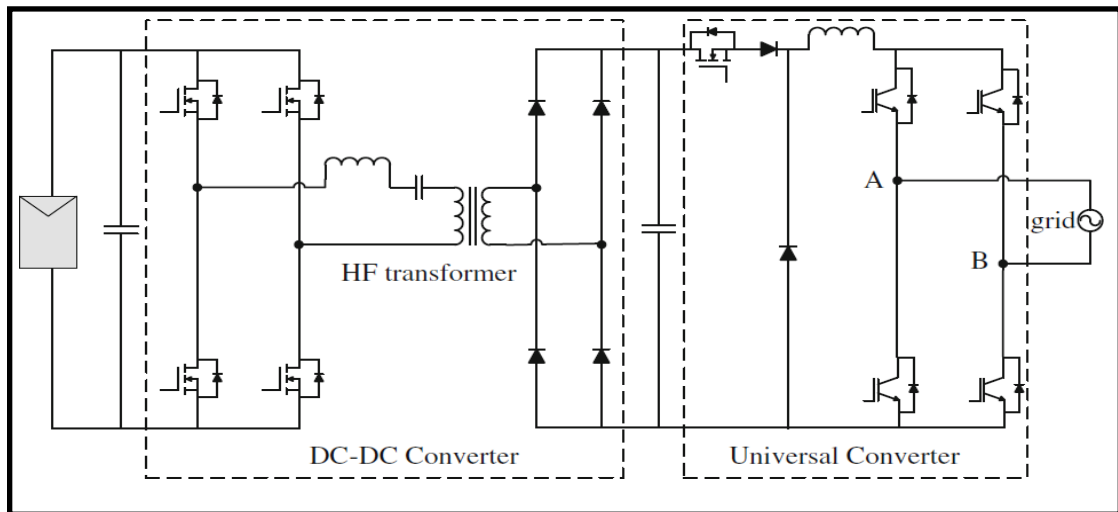


Figure 2.22. Micro-onduleur commercial de marque Enecsys [6]

2.4.2. Configuration onduleur par chaîne de modules

Dans cette configuration, chaque onduleur est relié à une seule chaîne de modules (rassemblés en série appelée aussi « string »). Un excellent rendement énergétique est atteint grâce à l'utilisation de MPPT au niveau de chaque chaîne de modules. Cette configuration est plus appropriée aux applications de faible puissance, typiquement les applications résidentielles sur toit. Sur le marché, on trouve, selon la réglementation en vigueur pour chaque pays, des systèmes avec ou sans transformateurs. La figure 1.21 résume, sans être exhaustive, les topologies les plus rencontrés :

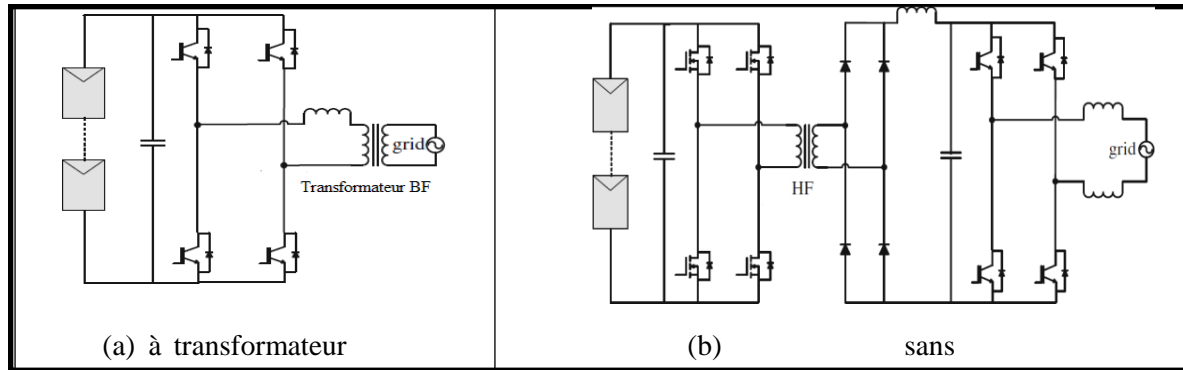


Figure 2.23. Onduleurs à isolation galvanique [6]

L'onduleur sans transformateur le plus simple est de topologie « full bridge » (figure 2.24). Il est commandé par un seul MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions), en anglais PWM: (Pulse Width Modulation) afin d'éliminer le courant de fuite. D'autres types d'onduleurs à deux niveaux sont rencontrés sur le marché: HERIC (Highly Efficient and Reliable Inverter Concept) développé par 'Sunway', à 5 interrupteurs de puissance (H5) et à 6 interrupteurs (H6).

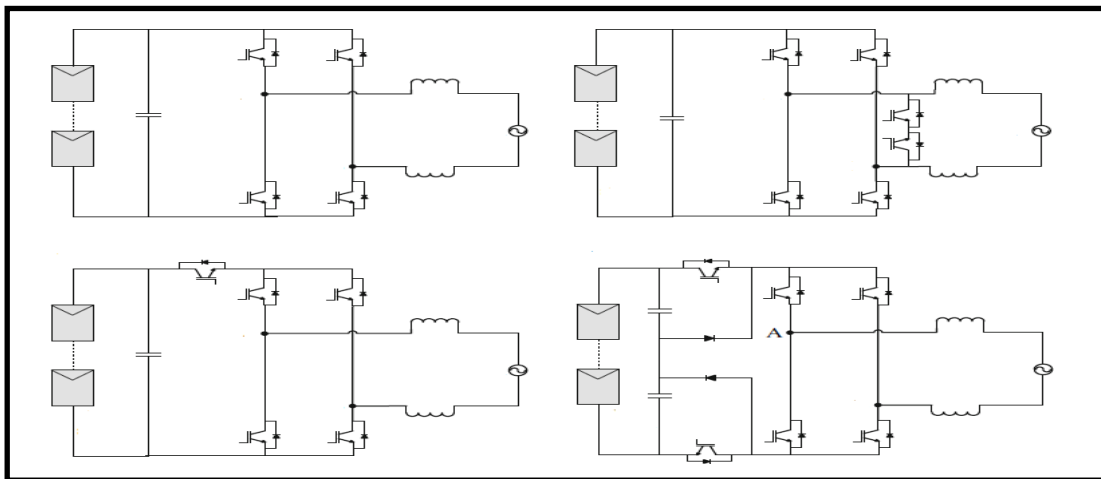


Figure 2.24. Onduleurs à deux niveaux utilisés en configuration onduleur par chaîne

(à pont, HERIC, H5 et H6)

Plusieurs onduleurs à 3 niveaux MLI d'un excellent rendement existent également (figure 2.25). A cause de la qualité d'énergie élevée et des pertes réduites, les configurations onduleur par chaîne de modules sont très utilisées dans les grandes installations, bien qu'elles soient coûteuses et d'un contrôle complexe.

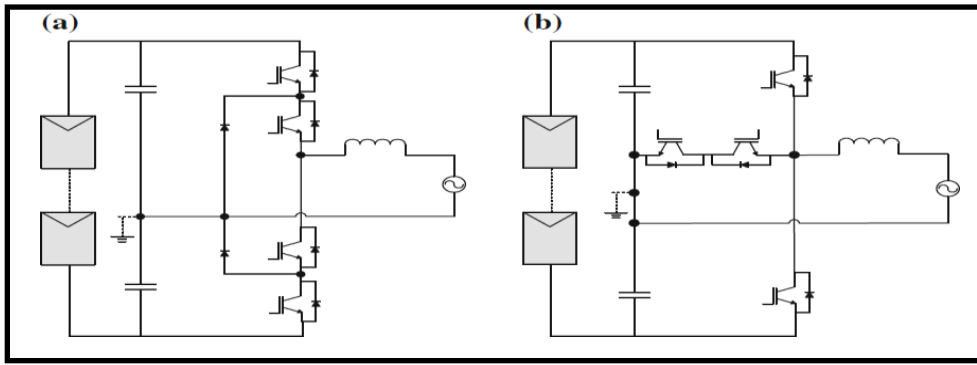


Figure 2.25. Onduleurs à 3 niveaux (a : NPC, (b : Type T) [6]

2.4.3. Configuration onduleur par multi-chaîne

Plusieurs chaînes de modules reliées chacune à un convertisseur DC-DC sont connectées à un onduleur commun [33]. C'est la configuration la plus utilisée de nos jours. Cette tendance est justifiée par la simplicité d'installation, de maintenance et d'extension de ce type d'installation

Deux structures de convertisseurs DC-DC sont principalement utilisées dans les installations multi-chaînes (figure 2.26). Le convertisseur à HF (haute fréquence) permet une large gamme de tensions d'entrée et convient aux pays où l'isolation galvanique est requise. Les convertisseurs Boost sont d'une structure et d'un contrôle plus simple. Ils font fonctionner le MPPT en plus d'augmenter la tension d'entrée [1].

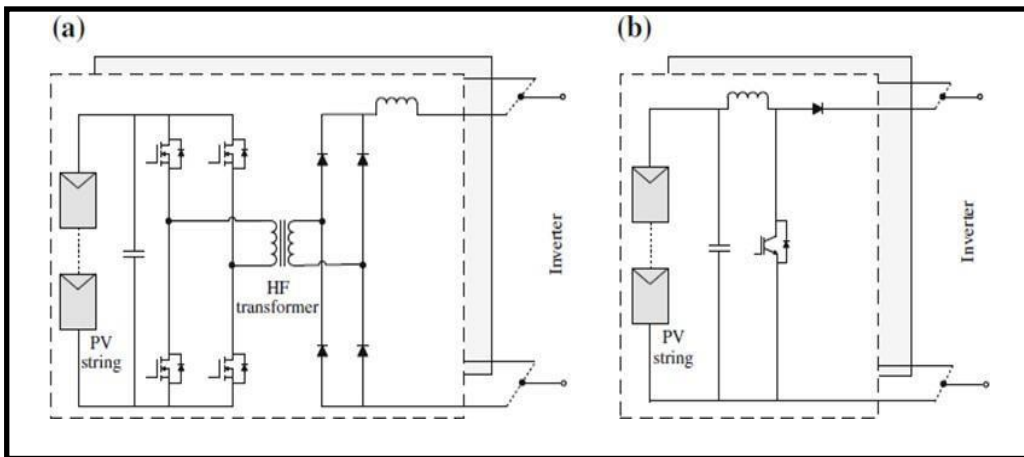


Figure 2.26. Convertisseurs DC-DC pour onduleur multi-string: (a) à transformateur, (b) boost

2.4.4. Configuration onduleur centralisé

Dans ce schéma, communément utilisé pour les grandes installations de plus de dizaine de kW [10], un grand nombre de modules PV sont connectés à un onduleur triphasé unique (centrale). Ces modules sont

organisés en plusieurs chaînes de modules connectés en parallèle afin d'augmenter la tension et la puissance d'entrée. Chaque groupe de modules connectés en série (chaîne) est connecté à une diode anti retour.

La simplicité de cette configuration est pénalisée par des pertes de puissance importantes du fait de l'emploi d'un MPPT commun pour tous les panneaux PV. Pour ces installations, l'onduleur utilisé est communément de type « deux niveaux à pont complet triphasé » (figure 2.27).

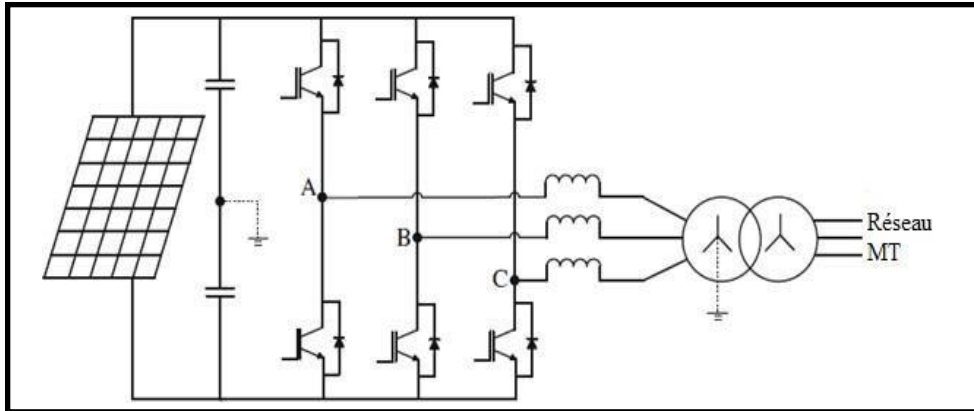


Figure 2.27. Onduleur à trois niveaux triphasé

L'onduleur central est connecté au réseau de moyenne tension via un transformateur pour élever la basse tension (à la sortie de l'onduleur) à la moyenne tension. Les différentes configurations de systèmes photovoltaïques reliés au réseau peuvent être comparées en les points suivants : caractéristiques générales, pertes de puissance, qualité d'énergie et coût.

- Les caractéristiques générales considèrent la robustesse, la fiabilité, la flexibilité et l'efficacité des MPPT. Actuellement, la configuration onduleur centralisé est considérée la moins fiable, la moins flexible et dont le MPPT est le moins efficace. En contrepartie, elle est la meilleure de point de vue robustesse.
- Les pertes de puissance considèrent le décalage entre les panneaux, la commutation, les pertes DC et AC. Le déséquilibre entre les panneaux est causé par le vieillissement des panneaux, l'ombrage, la poussière... En ce point, la configuration onduleur centralisé présente aussi les plus mauvais jugements, dus au fait que plusieurs chaînes de panneaux sont connectées à un seul onduleur. Les pertes de commutation sont importantes côté DC et faibles côté AC.
- La qualité d'énergie concerne les variations de la tension DC et AC et le déséquilibre de tension. La configuration centralisée est caractérisée par une variation de tension DC très élevée car plusieurs chaînes de panneaux sont connectées en parallèle, une faible variation AC et un déséquilibre de tension important.

2.5 Problématiques posées par le raccordement des systèmes PVs au réseau électrique

A propos des systèmes raccordés au réseau de distribution, les avancées technologiques de l'électronique de puissance ont permis de lever la plupart des verrous techniques liés à l'interaction entre les systèmes photovoltaïques et le réseau, ce qui résulte en une croissance rapide de ces systèmes au détriment des systèmes autonomes. La capacité cumulée des systèmes photovoltaïques installés dans le monde a atteint en

2014 plus de 177 GW dont 90% environ est de type connecté au réseau [6].

Ces derniers temps, les chercheurs ont visé leurs efforts pour des solutions d'optimisation sur le renforcement et l'extension des réseaux afin d'intégrer les énergies renouvelables sur le réseau électrique. Ainsi, ils ont concentré leurs distensions à l'étude des impacts possibles des générateurs de puissance distribués sur le réseau de distribution électrique, Notamment sur l'étude des réponses statiques et dynamiques et des performances des systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique (lors de changements soudains de la tension du réseau, des défauts du système, de fluctuations de puissance dues au caractère intermittent de l'énergie solaire, etc.). Afin de détecter les défauts et de protéger les dispositifs et les systèmes, diverses solutions de contrôle ont été développées. Toutefois, l'intégration des systèmes photovoltaïques dans les réseaux de distributions basse tension n'a pas eu beaucoup d'intérêt dans le passé, et les efforts de recherche étaient principalement focalisés sur le cas des réseaux de distribution haute et moyenne tension. De nos jours, les réseaux de distribution doivent être plus actifs compte tenu des systèmes de production décentralisés qui y sont raccordés. Il était donc essentiel de revoir les approches d'analyse afin de faire des investigations plus précises sur l'impact de l'intégration des systèmes photovoltaïques sur le réseau. Parmi les outils créant un vrai enthousiasme chez les chercheurs, les techniques de l'intelligence artificielle sont en pole position. Ces techniques trouvent leur application dans la prédiction des conditions de fonctionnement des systèmes photovoltaïques (température et ensoleillement) ainsi que dans la modélisation, le dimensionnement et le contrôle de ces systèmes

2.5.1 Problèmes liés aux variations de l'ensoleillement

Un des défis des systèmes PV est la gestion de la nature intermittente de l'énergie solaire. Celle-ci provoque des fluctuations de la puissance de sortie des générateurs photovoltaïques. Ces fluctuations engendrent beaucoup de problèmes fonctionnels et rendent la gestion des puissances issues de ces générateurs très compliquée et onéreuse. Ces problèmes prennent de plus en plus d'importance avec l'augmentation du nombre de ces systèmes. Dans le cas des systèmes reliés au réseau, l'irrégularité de l'ensoleillement causée par le passage des nuages, la géographie du lieu d'installation et l'angle d'incidence des rayons solaires, est une cause importante de fonctionnement instable compte tenu des fluctuations de tension résultantes [35]. La durée de fluctuations peut aller de quelques secondes à des heures en fonction du type et de la taille des nuages passants, et de la topologie et la surface couverte par l'installation PV [19].

2.5.2 Surtension et chute de tension

En général, le courant coule d'un point de tension donnée à un point de tension moindre. Pour cette raison, la tension de ligne décroît en s'éloignant de la source de tension. Néanmoins, la tension doit être maintenue dans un intervalle défini par les lois et les normes propres à chaque pays, afin d'assurer un bon fonctionnement du réseau. Par ailleurs, si la puissance générée par un système photovoltaïque est supérieure à la demande à un point, le surplus d'énergie sera injecté dans le réseau. Dans ce cas, le courant coule dans le sens inverse générant de la puissance active impliquant une augmentation du niveau de la tension de certains nœuds. Si un nombre élevé d'installations PV est raccordé à un réseau rural de basse impédance, la tension peut excéder la limite autorisée. Ce phénomène est appelé surtension. Le schéma conceptuel de surtension est indiqué dans la figure 2.28.

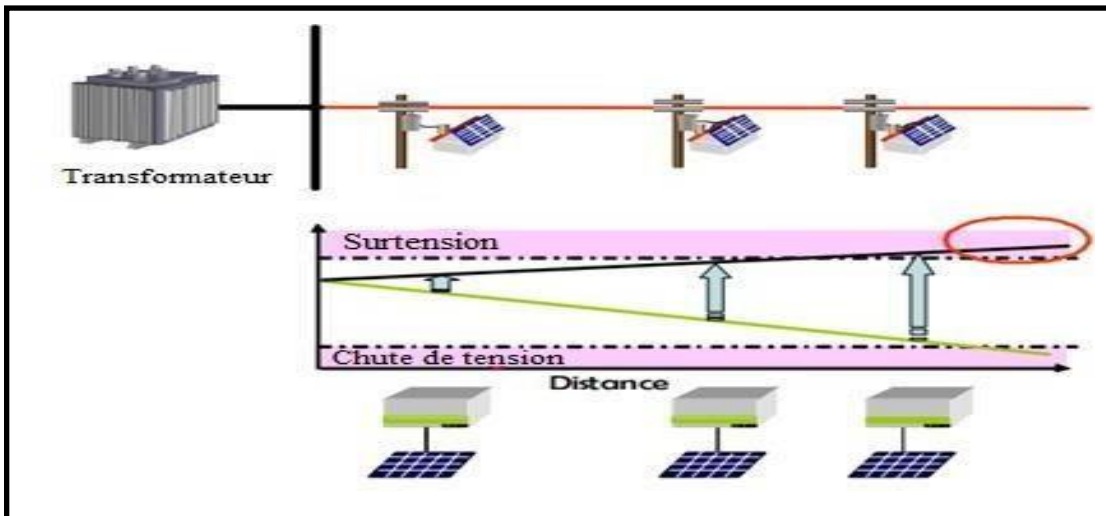


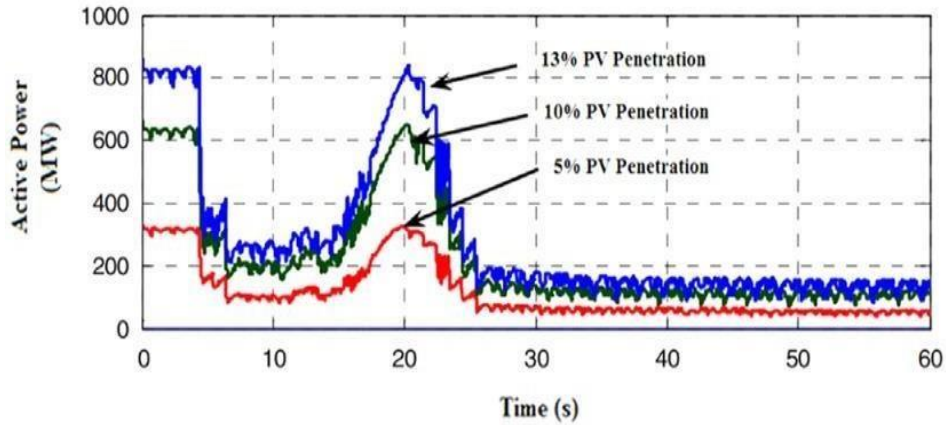
Figure 2.28. Schéma conceptuel de surtension causée par les systèmes PV reliés au réseau [36]

La variation de tension ne doit pas dépasser les limites définies par les normes propres à chaque pays. Il est possible de contrôler la tension de la ligne en diminuant la tension envoyée par le transformateur de distribution; mais ceci peut causer des chutes de tension dans les lignes connectées au même transformateur. Les chutes de tension et les surtensions peuvent avoir des effets néfastes sur les équipements côté générateur et côté consommateur. Le système doit être capable de détecter les variations de la tension au point de la connexion au réseau et de déconnecter le système PV, et de le reconnecter dès le retour du fonctionnement normal du réseau. Le contrôle de ces deux phénomènes reste parmi les verrous les plus importants à une intégration massive des systèmes photovoltaïques.

Par ailleurs, les opérations de commutation sur un générateur provoquent des variations de tension. Afin de pouvoir contrôler la tension, il est important que le taux de variation de la tension n'excède pas certaines limites. Les variations brusques de tension doivent être évitées.

Des études ont montré que le phénomène de surtension et sa régulation dépendent du taux de pénétration des systèmes PV (Voir la figure 2.29). Le taux de pénétration étant le rapport entre l'énergie produite par les installations photovoltaïques et l'énergie totale produite en une année. Dans l'étude présentée par M.Thomson et D.Infield [37], plusieurs valeurs de taux de pénétration sur le réseau BT ont été considérées. Une élévation de tension inadmissible a été constatée à midi dans le cas d'un taux de 50%. Il a été conclu que ce problème peut être évité en limitant le taux de pénétration des systèmes photovoltaïques à 30% [32, 37].

a)



b)

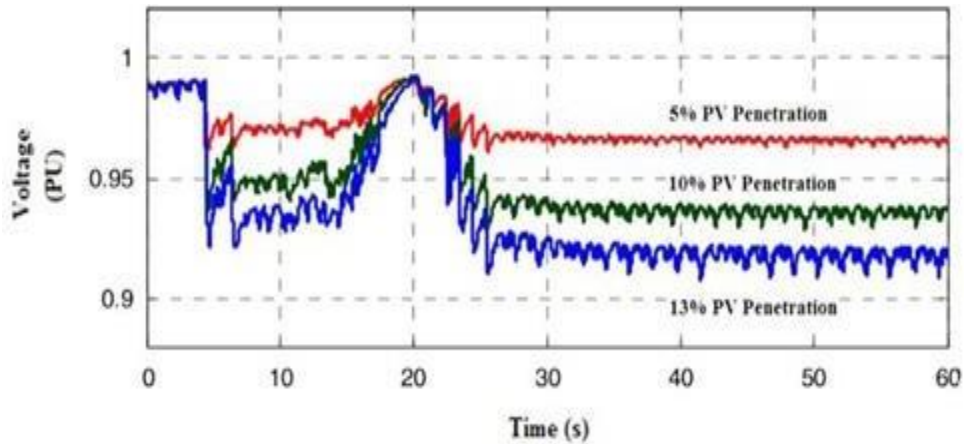


Figure 2.29. Influence du taux de pénétration des systèmes photovoltaïques sur la puissance active b) la tension du réseau [36]

La norme IEEE 519 [38] spécifie les limites permises de la perturbation de la tension: la tension à la sortie du convertisseur ne doit pas dépasser la tension du réseau au point de contact de plus de 5%. Le convertisseur doit être capable de détecter ce fonctionnement anormal et se déconnecter immédiatement. La déconnexion est aussi préconisée après 10 cycles en cas où la tension de la ligne chute de plus de 50% de sa valeur nominale ou augmente à plus de 110% de sa valeur nominale. Si la tension de la ligne est entre 50% et 92% de sa valeur nominale, le convertisseur doit se déconnecter en 2 secondes [21].

Une revue de la littérature permet de constater que les efforts de recherche dans cette thématique visent à proposer des contrôles de plus en plus améliorés dans l'objectif d'augmenter le taux de pénétration des systèmes PV reliés au réseau (BT et MT) [39-41].

2.5.3. Déséquilibre entre phases

On désigne par le terme « déséquilibre entre phases » la situation où les amplitudes des tensions des phases dans un système triphasé équilibré n'ont plus la même valeur ou un déphasage pas exactement égal à 120° [41]. Cet effet qui altère la qualité de l'énergie fournie est essentiellement causé par les systèmes PV reliés à une seule phase du réseau. Les tensions aux trois phases ne sont donc plus équilibrées car les systèmes PV sont connectés d'une façon aléatoire aux différents points de connexion. Le déséquilibre de phases peut causer surchauffe des générateurs, bruits et vibrations. Il peut aussi affecter les machines à induction et les composants électroniques. Du côté du consommateur, ce phénomène peut endommager les moteurs [41].

2.5.4. Problèmes liés à l'îlotage (Islanding)

Le phénomène de l'îlotage apparaît quand une partie du réseau (contenant un ou plusieurs systèmes PV) en est déconnectée et que le GPV continue de façon accidentelle à alimenter les charges de cette partie du réseau (Figure 2.30).

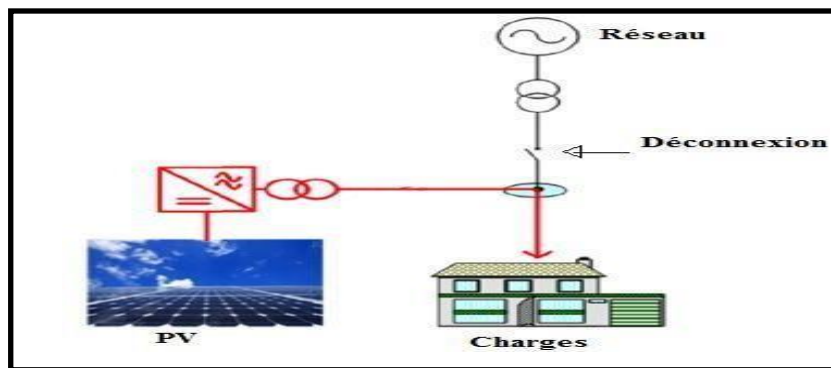


Figure 2.30. Schéma conceptuel de fonctionnement en îlotage accidentel

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau sont conçus de façon à détecter tout défaut de tension, fréquence ou impédance et de se déconnecter immédiatement du réseau. Mais, si la puissance générée par le système PV et celle consommée par la charge sont identiques, le système PV peut ne pas détecter l'îlotage et continue de fournir de l'énergie électrique. Ceci peut présenter des risques pour les personnes et le matériel. Le vrai risque augmenté par ce phénomène est surtout celui de l'électro-choque des agents travaillant sur le réseau en cas de maintenance du réseau (planifiée ou suite à un défaut). En plus, l'îlotage accidentel peut endommager les équipements côté consommateur. Le point rassurant est que ce phénomène survient très rarement dans les systèmes actuels [42]. Plusieurs méthodes de détection de l'îlotage sont développées par différents pays [42]. La figure 2.31 montre la classification de ces méthodes [32].

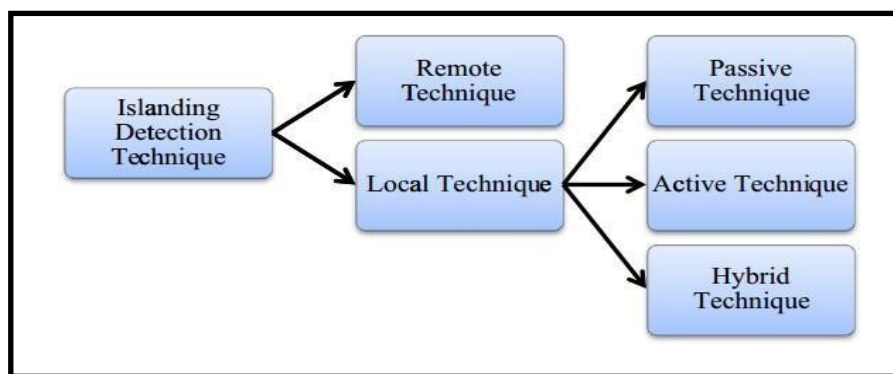


Figure 2.31 Classification des techniques de détection de l'îlotage

Les techniques de détection de l'îlotage sont divisées en deux catégories: les techniques à distance et les techniques locales. Les techniques locales comportent des méthodes passives, des méthodes actives et des méthodes hybrides [32, 43, 44].

Les techniques à distance, basées sur un système de communication entre le réseau public et les installations PV, sont très efficaces mais plus onéreuses.

Les méthodes passives se basent sur la mesure de grandeurs de fonctionnement (tension, fréquence et phase). L'onduleur PV est déconnecté si ces mesures indiquent un fonctionnement en mode îlotage. Les méthodes passives, adaptés à tout type d'onduleur, ne modifient pas les paramètres de fonctionnement du système [42]. Ces méthodes souffrent du problème de large « zone de non détection (ZND) ». Une zone de non détection est une région définie dans un espace (de paramètres de charge ou de déviation de puissance) où le fonctionnement en mode îlotage peut ne pas être détecté par la méthode anti-islanding choisie. Ce phénomène peut subvenir dans le cas des méthodes passives, quand la valeur de la puissance de la charge coïncide avec celle de l'onduleur [43].

Les méthodes actives, par contre, causent délibérément de petites perturbations au système de connexion. Si ces petites perturbations causent une déviation des paramètres de la charge des limites permises, une déconnexion est requise [42]. Ces techniques sont classées selon le paramètre perturbé (phase, fréquence, tension au point de raccordement, courant, puissance). L'avantage de ces techniques est leur aptitude à minimiser voire éliminer le phénomène de « zone de non détection » [43, 45]. En contrepartie, elles présentent le point faible d'éventuellement causer un fonctionnement instable du réseau de distribution. Des méthodes anti-islanding hybrides combinant les techniques passives et actives sont développées [46]. Cette combinaison est couronnée par une amélioration des performances.

2.5.5. Problème de la composante continue du courant injecté (DC offset)

La composante continue est une déviation (+ ou -) de la valeur moyenne de la tension (figure 2.32).

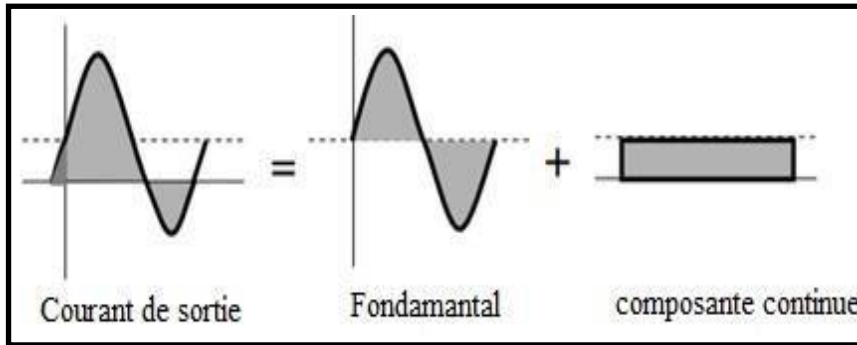


Figure 2.32. Schéma conceptuel de l'injection de composante continue [36]

Le fonctionnement du réseau ne permet aucune présence de composante continue et impose à zéro la limite des composantes continues produites par les convertisseurs qui y sont raccordés. En effet, l'injection de courant continu au réseau peut causer beaucoup de désagréments: augmentation des pertes, détérioration des composants du réseau, réduction de la durée de vie des transformateurs, mauvais fonctionnement des dispositifs de protection, mesures erronées [42], en plus d'affecter le fonctionnement du système photovoltaïque raccordé. Malencontreusement, la plupart des convertisseurs de puissance utilisés dans les systèmes PV sont des convertisseurs à transformateurs afin d'en réduire le poids et le coût. Ce type de convertisseur ne peut éliminer complètement la composante continue. Dans le but de prévenir l'injection de courant continu du côté de la sortie alternative, les unités de conditionnement de puissance sont munies de détecteurs de composante DC qui déconnectent le système PV en cas d'insertion de composante continue de grande valeur. L'impact de ce phénomène dans le cas de forte densité de systèmes PV sur la ligne de distribution n'est actuellement pas assez cerné bien qu'aucun problème sérieux n'a été noté [36]. La norme IEEE519 stipule que la valeur de la composante continue ne doit pas dépasser 05% de la valeur nominale du courant de sortie du convertisseur [21]. La norme IEC 61727 propose une injection de composante continue maximale tolérée de 1%. Plusieurs travaux proposent des méthodes de contrôle afin d'éliminer la composante continue du courant injecté au réseau par les systèmes PV [47- 49].

2.5.6. Hautes fréquence (CEM)

Les convertisseurs de puissance des systèmes PV fonctionnent à de hautes fréquences (10 à 20kHz) pour convertir le courant continu issu des panneaux PV en un courant alternatif. Ceci peut causer des interférences dans les régions RF (Radio Fréquence) et nécessite l'emploi de filtres appropriés [42]. La technique MLI, très répandu, dans les onduleurs PVs, peut être source de perturbation électromagnétique puisqu'elle nécessite des variations de tensions importantes en des temps très brefs (de quelques nanosecondes à microsecondes). Distorsion harmonique (Injection d'harmoniques de courant).

Tout signal $S(t)$ périodique de période T (de pulsation ω) peut mathématiquement se décomposer en somme (infinie) d'ondes sinusoïdales et d'une composante continue. Ceci est possible grâce à la décomposition en série de Fourier selon la formule suivante :

$$S(t) = S_0 + S_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) + S_2 \cdot \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + S_n \cdot \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (2.6)$$

où: S_0 : valeur moyenne (composante continu) du signal $S(t)$,
 n : rang de l'harmonique,

S : valeur maximale de l'harmonique de rang n ,

ω : pulsation du fondamental

φ_n : phase de l'harmonique de rang n ,

Cette décomposition permet d'identifier un terme fondamental correspondant au rang 1, appelé fondamental, de fréquence f ; puis des composantes sinusoïdales de rang n , de fréquences multiples de celle du fondamental. Le rang d'un harmonique est donc le rapport entre la fréquence de l'harmonique et celle du fondamental. On distingue les harmoniques de rangs pairs et les harmoniques de rangs impairs. Cette distinction est importante en électrotechnique: les harmoniques de rang impairs sont plus importants et plus influents sur les performances des systèmes industriels. En résumé, l'harmonique d'une onde est donc une fréquence composante du signal qui est multiple de la fréquence du fondamental. La représentation spectrale monolatérale du signal périodique permet une visualisation des amplitudes des harmoniques en fonction de la pulsation ou de la fréquence (figure 2.33).

Dans un système énergétique idéal, la tension fournie au client doit être parfaitement sinusoïdale. Toutefois, ces tensions sont souvent déformées. Cet écart de la sinusoïdale pure est exprimé en termes de distorsion harmonique. En fait, les convertisseurs de puissance utilisés dans les systèmes de production reliés au réseau et la présence de charges non linéaires génèrent des harmoniques qui distordent la forme de la tension du réseau comme montré sur la figure 2.34.

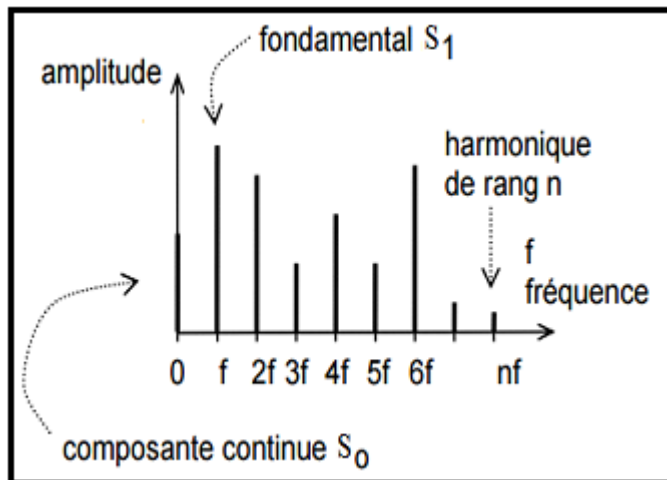


Figure 2.33. Représentation spectrale mono latérale

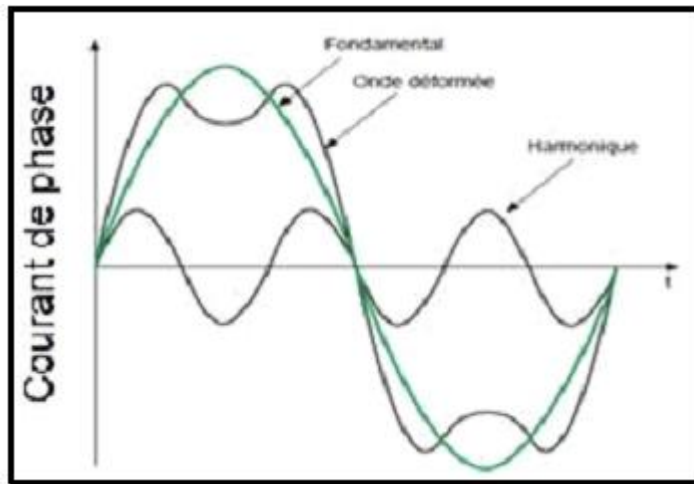


Figure 2.34. Déformation du signal sinusoïdal [1]

L'influence de l'harmonique de rang n est (en courant ou en tension) est exprimée en « Facteur de distorsion harmonique » appelée aussi « Taux individuel de distorsion harmonique ». Le facteur de distorsion harmonique. Par définition, le facteur de distorsion (Total harmonic distortion-THD) d'un courant ou d'une tension est égal à la valeur efficace de l'ensemble des harmoniques, divisé par la valeur efficace de la fondamentale. Dans le cas d'un courant distorsionné le THD est donné par l'expression suivante:

$$\text{THD} = \frac{I_H}{I_F} \quad (2.7)$$

Pour une tension le THD est donné par une formule analogue

$$\text{THD} = \frac{E_H}{E_F} \quad (2.8)$$

Il s'ensuit que les tensions et les courants sinusoïdaux ont un THD nul.

Un autre facteur appelé « taux de distorsion harmonique totale $FDHT$ » est utilisé pour caractériser l'influence de l'ensemble des harmoniques. Cet indice peut être calculé par rapport au fondamental (dans ce cas c'est le rapport de la valeur efficace des harmoniques à celle de la valeur efficace du fondamental) ou rarement par rapport au signal déformé (dans ce cas c'est le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du signal déformé).

Les modèles récents de convertisseurs génèrent moins d'harmoniques. Généralement, ils utilisent, pour générer un signal sinusoïdal, la technique MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion). En plus, on peut ajouter des filtres pour enlever la majorité des harmoniques de la sortie PV. Les avancées récentes dans les systèmes de conditionnement de puissance font que le problème de la distorsion harmonique n'est plus un problème qui freine le développement des installations PV. A noter que ce phénomène a des effets indésirables côté consommateur: vibrations, échauffement des composants, perturbation des moniteurs et lampe fluorescentes, dégradation de la qualité du son, et mauvais fonctionnement des équipements de contrôle et de mesure. L'intégration des générateurs PV dans le réseau peut générer une augmentation d'harmoniques au point de connexion. Chaque système PV connecté au réseau y injecte des harmoniques. Plus des systèmes PV sont connectés, plus d'harmoniques sont injectées. La présence d'une ou plusieurs charges non linéaires peut augmenter la distorsion harmonique à des limites inacceptables. De ce fait, le taux de pénétration maximal des systèmes PV installés dépend du niveau de distorsion harmonique acceptable sans perturbation.

Afin de limiter les effets néfastes des harmoniques sur la qualité d'énergie et les composants des systèmes énergétiques, IEEE a développé la norme IEEE 519-192 définissant les pratiques recommandées pour le contrôle de fréquence. Cette norme définit la distorsion harmonique maximale permise (en courant et en tension) pour les différents types de systèmes. Des filtres d'harmoniques peuvent être obtenus en ajoutant une inductance en série avec un condensateur de correction de facteur de puissance. Le circuit peut être réglé pour une fréquence proche de celle de l'harmonique perturbatrice qui est souvent celle du rang 5. Ceci atténue l'harmonique indésirable. Le filtrage n'est pas la seule solution pour réduire les harmoniques. L'angle de commutation du convertisseur peut être sélectionné de telle façon à éliminer certaines harmoniques de la tension de sortie et avec un moindre coût.

Les harmoniques du courant sont responsables de chauffage par effet de peau. Il est, par conséquent, possible de diminuer ce phénomène indésirable en optant pour des conducteurs de surfaces plus grandes. Dans le but de protéger les transformateurs contre l'échauffement provoqué par les harmoniques, les concepteurs proposent, dès leur conception, des transformateurs surdimensionnés en tenant compte des pertes spéciales supplémentaires générées par ces harmoniques. Cette solution de surdimensionnement n'est applicable que si la pollution harmonique est quantifiée et communiquée au fabricant avant la conception du transformateur. Une alternative moins coûteuse consiste à utiliser des transformateurs spéciaux appelés « transformateurs de facteur K ». Le facteur K, qui fournit une mesure des effets thermiques des harmoniques du courant de charge sur les transformateurs, est défini dans les normes ANSI/IEEE C57.110 et UTE C15

112. Un facteur K d'une valeur de 1 correspond à une charge parfaitement linéaire (pas de présence d'harmoniques). Plus ce facteur s'accroît, plus les phénomènes d'échauffement par la présence d'harmoniques sont importants. Les transformateurs de facteur K ont, en effet, une capacité thermique accrue et dont les limites sont connues, ce qui constitue un gage de sécurité important.

2.5.7. Perturbation de la fréquence du réseau (inter-harmoniques)

En plus du problème de la distorsion harmonique, la tension et le courant de la charge peuvent être affectés (comme défini dans la norme IEC 61000-2-1) par la présence de fréquences parasites dont les valeurs ne sont pas des multiples du fondamental. Ces fréquences parasites, appelées aussi inter-harmoniques, sont principalement créées par les charges non linéaires et les circuits de l'électronique de puissance comme les onduleurs présents dans tous les systèmes PV reliés au réseau. Les principales sources d'harmoniques sont les cyclo-convertisseurs de fréquence, les convertisseurs de fréquence statiques, les fours à arc, les moteurs à induction, les générateurs éoliens, les lignes de transmission basse fréquence et les charges contrôlées par cycle complet [56]. Si la fréquence dépasse 50.2 Hz dans un réseau de distribution BT de 50 Hz, une déconnexion immédiate est requise.

Généralement, un contrôle de puissance active dépendant de la fréquence est utilisé dans le but d'éviter ces problèmes. Dans un réseau de 60 Hz, la limite est entre 59,5 Hz et 60,5 Hz (norme IEEE 519).

2.5.8. Problématique du facteur de puissance

Trois types d'énergie sont à considérer dans un système de distribution d'énergie électrique :

1. L'énergie active : Résulte de la puissance active et est intégralement transformée en énergie mécanique (travail) et chaleur (pertes).
2. L'énergie réactive : Correspond à la puissance réactive des récepteurs et est utilisée principalement pour alimenter les circuits magnétiques des machines électriques.

3. L'énergie apparente : Correspond à la puissance apparente des récepteurs et est la somme vectorielle de l'énergie active et l'énergie réactive. Dans le cas de charges alimentées du réseau public, les courants et les tensions sont supposés parfaitement sinusoïdaux et le diagramme des puissances peut être dérivé de la représentation de Fresnel des tensions et courants (figure 2.35).

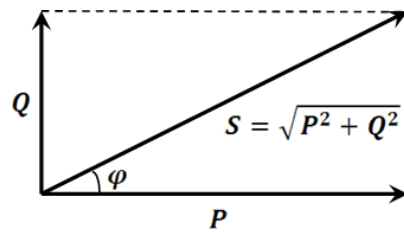


Figure 2.35. Diagramme de puissances

On définit ainsi pour une tension de valeur efficace U_{eff} et un courant de valeur efficace I_{eff} déphasé d'un angle φ par rapport à la tension:

La puissance active :

$$P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos\varphi \text{ [w]} \quad (2.9)$$

La puissance réactive:

$$Q = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \sin\varphi \text{ [VAR]} \text{ (Voltampère réactif)} \quad (2.10)$$

La puissance apparente:

$$S = U_{eff} \cdot I_{eff} \text{ [VA]} \text{ (Voltampère)} \quad (2.11)$$

On définit, le facteur de puissance comme le rapport de la puissance active et la puissance apparente:

$$F_p = P/S \quad (2.12)$$

Le facteur de puissance nous informe sur combien l'énergie totale est réelle. Un facteur de puissance égale à 1 indique que seulement la puissance active est présente et que le courant et la tension sont en phase. Un facteur de puissance égale à 0.8 indique que 80% de la puissance présente est réelle (active). Dans ce cas, le courant et la tension ne sont plus en phase : les récepteurs capacitifs causent un retard de la tension par rapport au courant tandis que les récepteurs inductifs causent un retard du courant par rapport à la tension. Le facteur de puissance doit (généralement) être maintenu à la valeur de 1 ou très proche de 1. Ça permet d'éviter le surdimensionnement de certains équipements.

Le facteur de puissance peut être influencé par la présence de sources photovoltaïques reliées au réseau en raison de l'écoulement de puissance inverse. Cet obstacle technique requiert le contrôle de la tension dans les onduleurs afin de maintenir la tension dans les limites acceptables en absorbant ou en fournissant de la puissance réactive. La norme IEEE 519 stipule que le facteur de puissance ne doit pas être inférieur à 0,85.

2.5.9. Temps de déconnection de défaut inter-système

Dans les transformateurs MT/BT les enroulements côté MT sont isolés des enroulements côté BT. Cependant, cette isolation peut être interrompue en cas de tension anormale (par exemple en cas de foudre s'écoulant

dans le transformateur). Ce phénomène est dénommé « défaut inter-système ». Lorsqu'un défaut inter-système se produit, les centrales de production doivent se déconnecter du réseau. Toutefois, les systèmes photovoltaïques ne peuvent détecter l'incident que lorsque la partie du réseau concernée ouvre le disjoncteur et un fonctionnement en mode îlotage se produit [36].

Des recherches affirment que, dans ce cas, le système photovoltaïque prend trop de temps pour se déconnecter. Ceci peut présenter un risque pour les personnes et le matériel. Afin d'y remédier, des onduleurs PV sont conçus pour avoir une réponse plus rapide (voir figure 2.36).

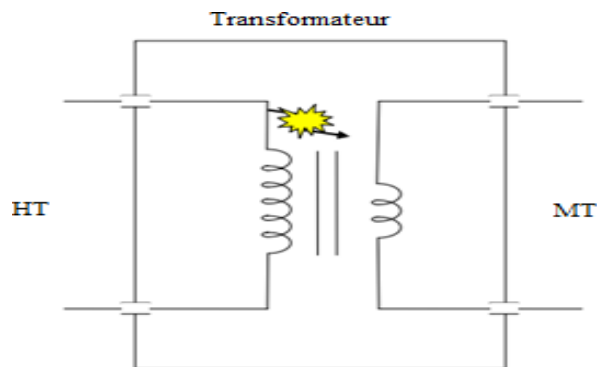


Figure 2.36. Schéma de défaut inter-système

2.6. Aspect techniques et économiques

Il faut installer 3 à 4 MW d'électricité renouvelable pour en injecter 1MW en moyenne sur les réseaux. En premier lieu, ce bilan nous permet de quantifier précisément l'ampleur de la variabilité dans le temps des installations renouvelables classiques: pour une puissance installée éolienne de 13800 MW la puissance moyenne fournie peut être de 3 231 MW et la puissance maximale peut atteindre de 10 269 MW.

Pour ce qui concerne le parc photovoltaïque, la puissance installée de 8 015 MW a délivré une puissance moyenne de 1 426 MW et une puissance maximale de 5 805 MW. Ces chiffres nous renseignent sur le défi colossal sous-tendu par les scénarios « 100% EnR » avancés par plusieurs prospectivistes. En effet, puisqu'il faut installer entre 3 et 4 MW d'électricité renouvelable pour en obtenir 1 en moyenne injecté sur les réseaux, il en découle que si l'on estime à 60 000 MW la puissance moyenne appelée dans une année par les consommateurs cela dimensionne à plus de 200 000 MW la taille théorique du parc d'électricité renouvelable nécessaire pour le scénario 100% EnR, c'est-à-dire près du double du parc actuel toutes filières confondues... Les conséquences techniques et économiques de ce fait inédit en matière de gestion et de développement des grands réseaux électriques sont immenses et ne sont qu'entraperçues aujourd'hui,

2.7. Le générateur photovoltaïque couplé au réseau

Il est possible d'utiliser un générateur photovoltaïque non autonome, en le reliant au réseau public de distribution d'électricité. Le courant produit par le générateur sera soit consommé sur place par l'utilisateur, soit

rejeté sur le réseau au même titre que le courant fourni par une centrale nucléaire ou un barrage hydroélectrique mais avec une puissance injectée beaucoup plus faible.

Cette solution est plus rentable qu'une utilisation directe de l'électricité. Ceci est valable dans la mesure où le prix de vente du kWh est supérieur au prix d'achat.

Un système de double comptage (achat-vente) permet de revendre le courant produit en excédent, sur le réseau, et de consommer le courant disponible sur le réseau lorsque le soleil n'est pas là.

Pour effectuer un raccordement au réseau de distribution d'électricité, il est nécessaire d'adapter la tension continue du PV à la tension alternative du réseau de distribution. Il faut donc utiliser un onduleur. L'ensemble est entièrement automatisé et géré par un onduleur. La distribution intérieure de la maison est identique à toute autre.

Le dimensionnement est basé sur l'investissement que souhaite apporter l'utilisateur ainsi que sur la part de la consommation qu'il souhaite couvrir. Le système couplé au réseau est, à puissance égale, moins onéreux que le système autonome car il ne nécessite pas de batterie ni de régulateur.

2.7.1 Système à double comptage

Pour ce système, deux compteurs sont montés tête à tête. Le premier enregistre l'énergie rejetée sur le réseau (le surplus de la production qui n'a pas été directement consommé), le second enregistre la quantité d'énergie achetée au réseau, voir figure 2.37.

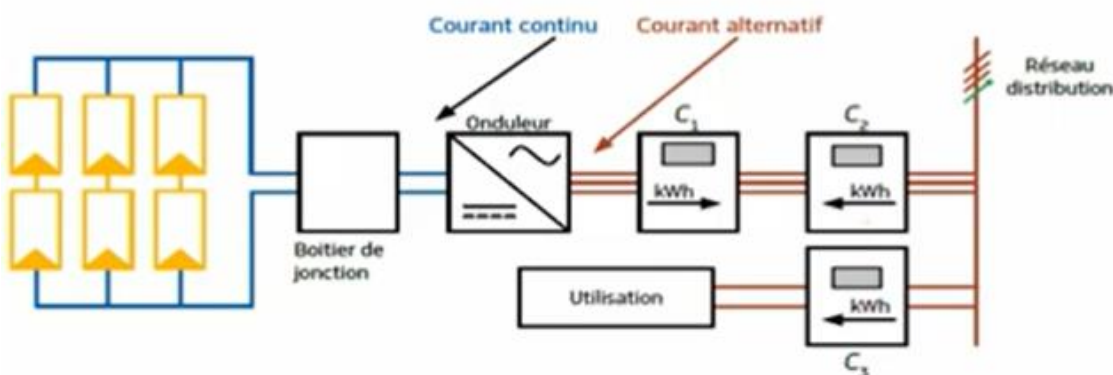


Figure 2.37: Synoptique d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau

- C_1 est le compteur de vente de l'électricité d'origine photovoltaïque
- C_2 est le compteur de non-consommation qui sert au fournisseur pour vérifier que le particulier ne se sert pas de ce branchement pour consommer de l'électricité sur le réseau
- C_3 est le compteur de la consommation habituelle

2.7.2 Vente totale de la production

Ce système permet de vendre l'intégralité de la production au réseau. En plus du compteur habituel on installe un compteur qui enregistre la quantité d'électricité rejetée sur le réseau, comme c'est présenté dans la figure 2.38.

Remarque: Comme vous le constatez il y'a 2 compteurs branchés coté générateur photovoltaïque (C₁, C₂) : celui du dessous permet de compter ce que vous produisez et le second (au-dessus sur le schéma) permet de contrôler que rien n'est consommé de ce côté, il sert à éviter les fraudes, c'est le compteur de "non-consommation".

La surface des modules photovoltaïques peut être calculée en fonction de la quantité d'électricité consommée par l'habitation et de la part que l'on souhaite alimenter par le GPV. En première approximation, on peut estimer que 10 m² de modules photovoltaïques produisent environ 1000 kWh/an. On peut ainsi choisir la proportion entre l'électricité solaire et l'électricité du réseau.

Table 2.1 Exemples de Proportion solaire/consommation

Surface	Production solaire	Consommation Réseaux	Solaire/consommation
10 m ²	1000 kWh/an	1000 kWh/an	100%
10 m ²	1000 kWh/an	2000 kWh/an	50%
20 m ²	2000 kWh/an	3000 kWh/an	66%
30 m ²	3000 kWh/an	2500 kWh/an	120%

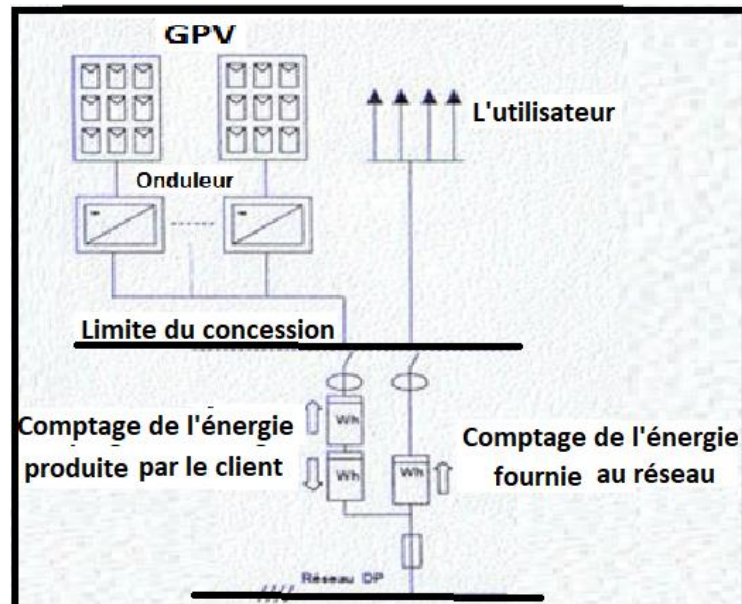


Figure 2.38: Vente totale de la production.
Ne rejetant que le surplus de sa production sur le réseau.

2.6.1 Rendement de l'onduleur

Toute l'énergie produite par le générateur photovoltaïque n'est pas injectée sur le réseau car une partie

est perdue lors de la conversion du courant continu en courant alternatif via l'onduleur.

Le graphique suivant présente la courbe de rendement de l'onduleur, voir la figure 2.39. Ce rendement dépend notamment de la tension d'entrée de l'onduleur (tension en sortie des panneaux).

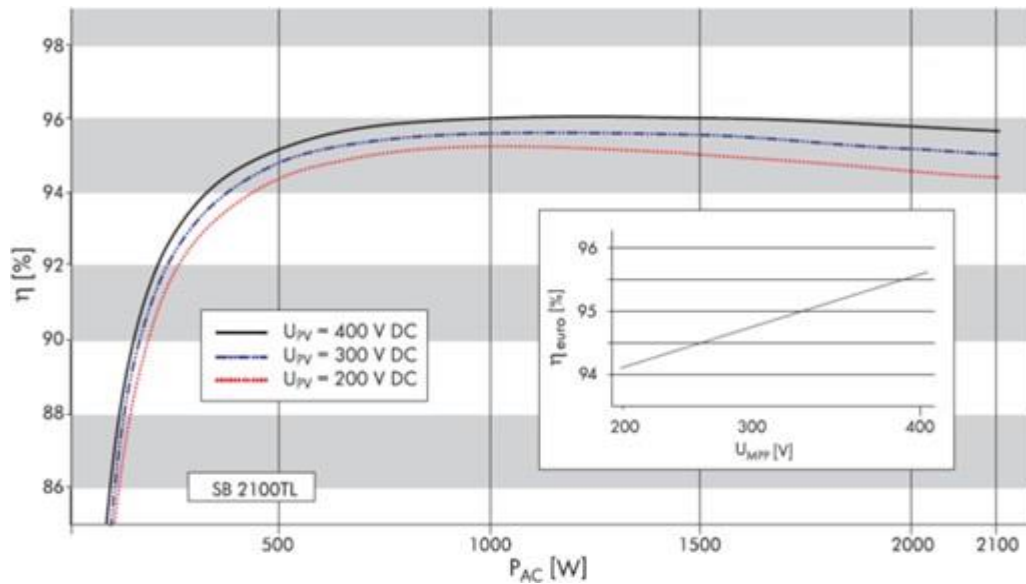


Figure 2.39. Courbe de rendement de l'onduleur [1]

2.7. Protection de l'installation d'un système photovoltaïque intégré au réseau électrique

2.7.1 Du côté continu:

Il faut protéger l'installation contre les courts-circuits (Un court-circuit est un phénomène électrique qui se produit lorsque le circuit électrique comporte un défaut : le courant électrique prend alors un raccourci (d'où le nom de court-circuit) et les surtensions atmosphérique. Il faut également prévoir la mise en place d'un interrupteur général permettant la coupure de l'ensemble des panneaux solaires en cas d'urgence.

2.7.2 Du côté alternatif:

Il faut protéger l'installation contre les surintensités et les surtensions atmosphérique, Il faut également prévoir la mise en place d'un interrupteur sectionneur afin de déconnecter l'installation ainsi que la mise en place de protection des personnes. La figure 2.40 présente les dispositifs de protection pour différents défauts d'une installation d'un système photovoltaïque intégré au réseau électrique

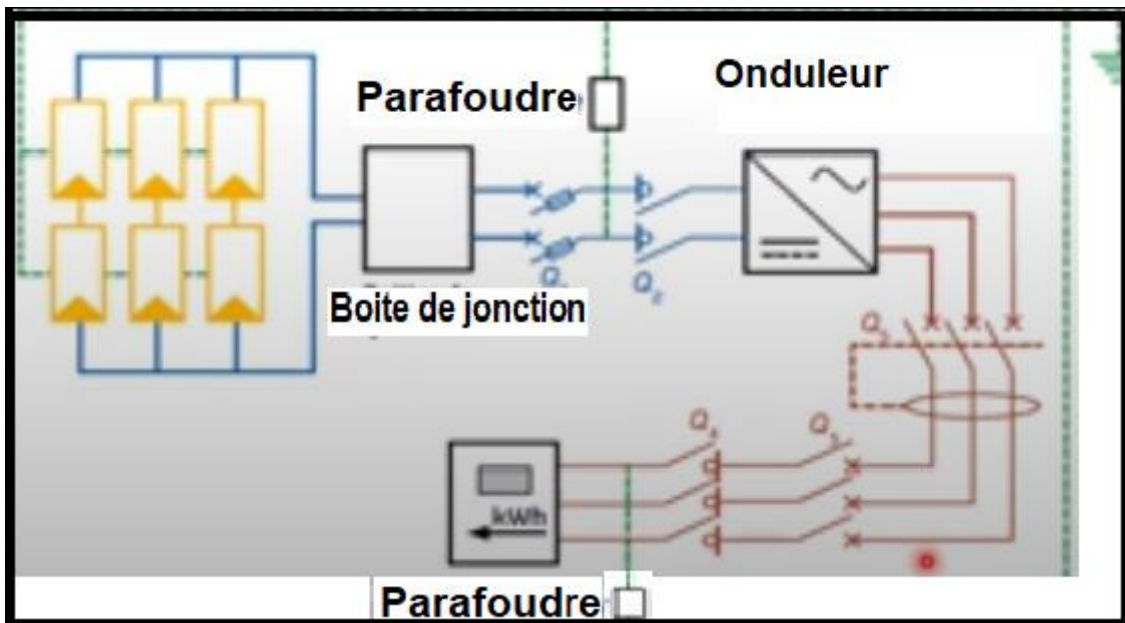


Figure 2.40: *Protection de l'installation d'un système photovoltaïque intégré au réseau électrique*

2.8 Système d'énergie hybride (SEH)

2.8.1 La structure du système hybride

Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables, peut être résolu par la combinaison et l'exploitation de plusieurs sources disponibles facilement mobilisables [48-50].

Il consiste en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie par une meilleure disponibilité. Par exemple, les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue. Dans bien de régions, les journées ensoleillées sont en général caractérisées par une activité éolienne faible alors que les vents forts sont observés plutôt lors de journées nuageuses ou la nuit [48].

Les performances d'un SEH (le rendement et la durée de vie) sont influencées d'une part par sa conception, c'est-à-dire le dimensionnement des composants, le type de composants, l'architecture etc., et d'autre part par le choix de la stratégie de fonctionnement. Quelques paramètres permettant d'évaluer ces performances sont :

- L'économie de carburant, le coût du kW, le nombre et la durée des pannes, le nombre d'arrêts pour l'entretien etc.
- La configuration optimale pour les systèmes hybrides devrait être déterminée en minimisant le coût du kilowatt heure.
- La durée de vie des composants d'un SEH peut être beaucoup plus courte que la durée de vie normale des composants individuels (fonctionnement en réseaux interconnectés).

Les points les plus critiques sont en général la dégradation des batteries, l'endommagement des démarreurs diesel et du système mécanique de freinage des éoliennes, ainsi que la carbonisation excessive des cylindres du moteur diesel.

**Un système hybride doit notamment:*

- a) 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, tout en maintenant une qualité déterminée d'énergie fournie.
- b) obéir à des règles d'exploitation temps réel basées sur une priorisation économique des ressources énergétiques disponibles. [21].
- c) compter sur une gestion automatisée des composants du système afin de garantir la stabilité du système en tout temps, y inclus dans les transitions entre les différents modes d'opération du système, trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système.

❖ Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet – une centrale tout entière.

❖ Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc.

❖ La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système PV, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources.

Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride.

Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle etc. Une généralisation de la classification présentée est illustrée sur la Figure 2.41. [49-52]

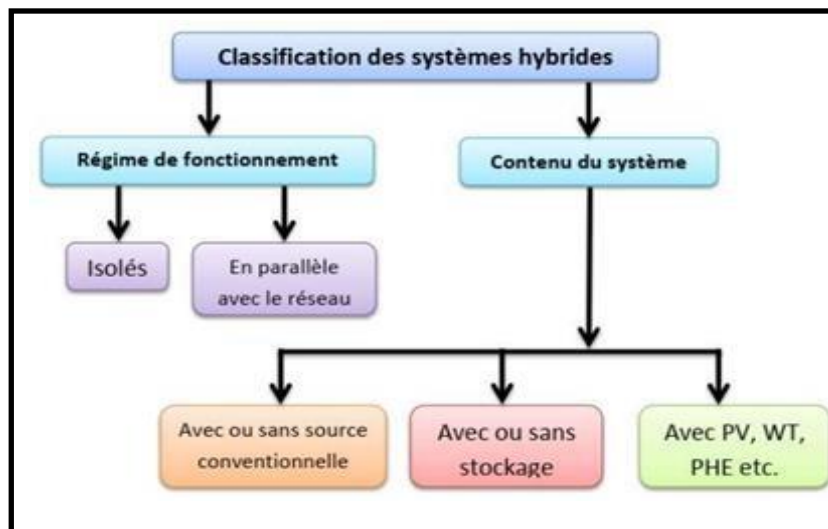


Figure 2.41. Classification du système hybride

Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus : un bus à courant continu pour les sources, les charges à courant continu et les batteries et un bus à courant alternatif pour les générateurs à courant alternatif et le système de distribution [24].

Les sources d'énergie renouvelable peuvent être connectées au bus à courant alternatif ou à courant continu en fonction de la dimension et la configuration du système.

L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'intermédiaire de l'électronique de puissance: onduleurs/redresseurs ou convertisseurs bidirectionnels. À trois part la charge principale, un système hybride peut contenir aussi des charges auxiliaires (charge différée, charge optionnelle, charge de délestage) pour réaliser l'équilibre énergétique.

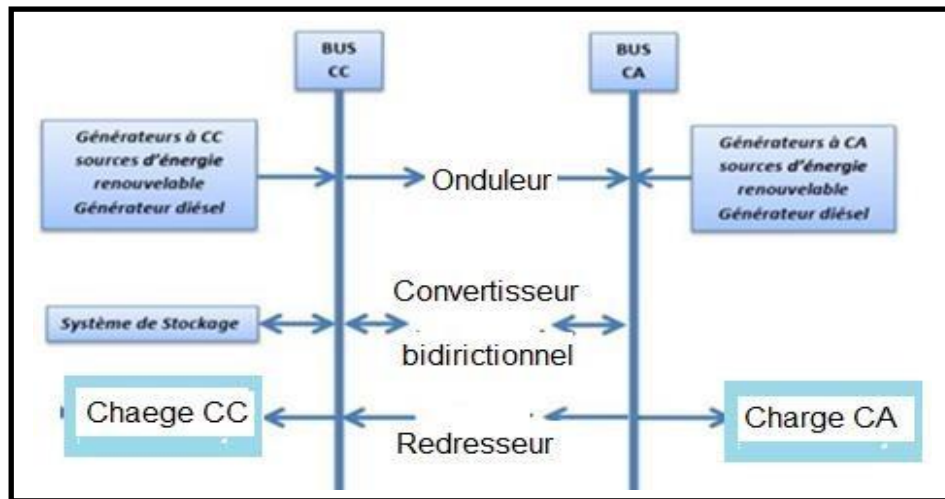


Figure 2.41. Architecture des SEH.

Si la charge principale est alimentée sans interruption, les charges auxiliaires sont alimentées en énergie par ordre de priorité, seulement quand il existe un surplus d'énergie. Ainsi, dans un SEH avec des batteries de stockage et charges auxiliaires, s'il existe un excès d'énergie (venant des sources d'énergie renouvelable et des diesels), celui-ci passera d'abord dans les batteries et ensuite, il sera utilisé pour alimenter les autres charges auxiliaires en fonction de leur priorité. Dans un tel système, les batteries de stockage jouent un double rôle: charge et source. Celles-ci sont résumées dans les figures 2.41, 42, 43 et le tableau 2. 2 [53].

Tableau 2.2. Classification des SEH par gamme de puissance [28]

Puissance du SHE [kW]	Application
Faible: < 5	Système autonome: Station de télécommunication, pompage de l'eau, ...
Doyenne: 10-250	Micro-réseaux isolés: alimentation d'un village isolé, des zones rurales...
Fort: > 500	Grands réseaux isolés: réseaux insulaires...

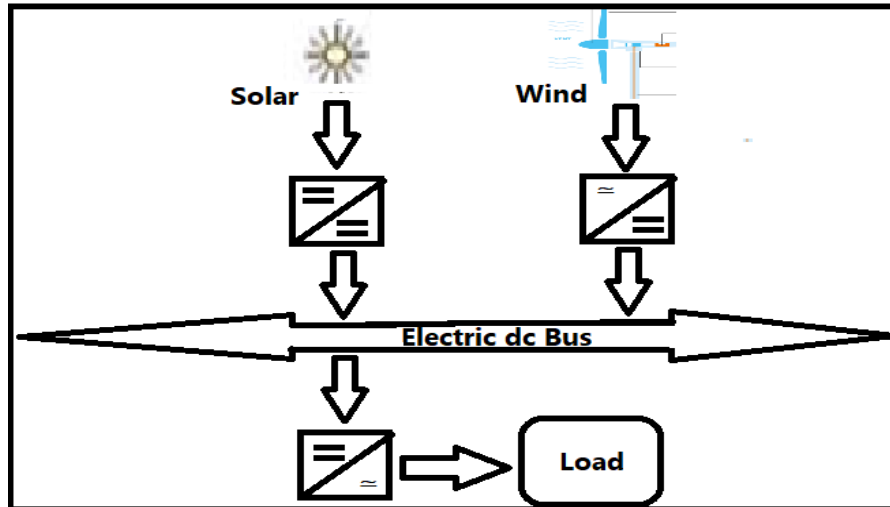


Figure 2.42. Solaire-éolien (site isolé).

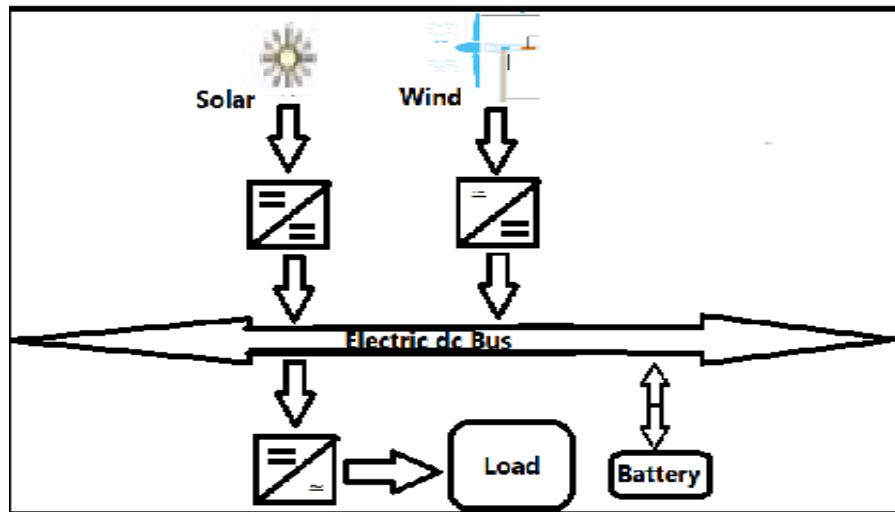


Figure 2.43 Solaire-éolien, stockage de batterie.

Remarque: Chaque source doit être exploitée indépendamment

Conclusion

Ce chapitre, nous a permis de mieux envelopper les problématiques liées à la connexion des systèmes photovoltaïque au réseau public. Les systèmes solaires photovoltaïques devraient être l'une des sources d'électricité les plus répandues durant les prochaines décennies. Néanmoins, ils ont de

nombreux impacts indésirables sur les réseaux de distribution électriques. Il n'y a pas d'accord sur les limites de pénétration maximale autorisées pour l'électricité photovoltaïque dans un réseau déterminé. Cette limite peut en effet varier en fonction des caractéristiques du réseau ainsi que les types, les emplacements et la répartition géographique des systèmes photovoltaïques dans le réseau. Ceci n'affecte en rien la certitude que le caractère transitoire du rayonnement du soleil, causant des perturbations perpétuelles de tension, l'influence des dispositifs de puissance sur la stabilité de la fréquence du réseau ainsi que le problème de l'îlotage constituent le goulot d'étranglement contre une adoption massive des systèmes photovoltaïque reliés au réseau. On peut dire que les réseaux électriques dans les circonstances actuelles ne sont pas encore prêts à tenir compte de l'augmentation prévue de la pénétration des systèmes photovoltaïque. Plus d'efforts de recherche sont clairement requis pour faire face à ces impacts et, par conséquent, étendre les limites techniques admissibles liées à l'insertion de ces systèmes.

Les problèmes liés à l'intégration de la production photovoltaïque dans un réseau électrique sont plus présents, il faut donc mettre en place des solutions afin de permettre au gestionnaire de limiter l'impact de ces productions sur son réseau. Les principales solutions envisagées consistent à développer des outils de prévisions et de stockage afin de permettre au gestionnaire d'anticiper et /ou de garantir le niveau de production raccordée au réseau électrique. La prévision à court terme de la puissance électrique fournie par des fermes photovoltaïques permettrait au gestionnaire de mieux gérer l'équilibre du réseau lorsque le taux de pénétration de l'électricité est important.

Exemples d'exercices de chapitre.2

Exercices portant sur les cellules solaires

Exercice n°1 la lumière monochromatique

Une cellule photovoltaïque de surface 30 cm^2 est soumise à un rayonnement de puissance surfacique $P = 900 \text{ W/m}^2$. On admettra que la lumière qui arrive sur cette cellule est quasi-monochromatique et de longueur d'onde $\lambda = 550 \text{ nm}$.

- Déterminer l'énergie d'un photon en Joules.
- Calculer le nombre de photons reçus par la cellule chaque seconde. Données : $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$; $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$.

Exercice n°2 fréquences et énergies des photons

Les cellules photovoltaïques actuelles ne fonctionnent pas avec tout le spectre visible de la lumière. Elles emploient, principalement les radiations autour du vert et du bleu.

- Déterminer les fréquences des photons associés aux longueurs d'ondes suivantes : $\lambda_1 = 440 \text{ nm}$ et $\lambda_2 = 0,510 \mu\text{m}$.
- Calculer les énergies, en Joule et en électronvolt associées à ces photons. Données : $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$; $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$; $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

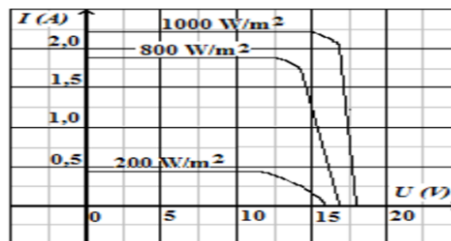
Exercice n° 3 : Transfert d'énergie de Panneau solaire

Un panneau solaire photovoltaïque est exposé au soleil comme générateur électrique, de façon à capter le rayonnement solaire. Il est constitué de cellules photovoltaïques qui permettent de transformer l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique. Le rendement de cette conversion énergétique est de 12%. La puissance crête du panneau solaire est de 80 W . Calculer la puissance du transfert d'énergie reçue par rayonnement. Pour $1,2 \text{ m}^2$ de panneau solaire, la puissance de ce transfert vaut $1,5 \text{ KW}$ pour un ensoleillement optimum. Calculer la surface de panneau nécessaire à ce transfert.

Exercice n°4

Un module photovoltaïque comprend un nombre de cellules qui convertissent une partie de l'énergie rayonnante du Soleil qu'elles reçoivent en énergie électrique. Certaines caractéristiques de ce module PV, pour des puissances lumineuses reçues par m^2 , sont représentées sur le graphique ci-dessous. Les caractéristiques électriques pour une puissance lumineuse reçue de 1000 W/m^2 sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Température du module ($^{\circ}\text{C}$)	50
Puissance électrique maximale (W), (P_{max})	32.8
Tension aux bornes du module à P_{max} (V)	14.9
Intensité I (A) pour une tension $U=15\text{V}$	2.2
Tension en circuit ouvert (V), V_{CO}	18.4
Intensité de court-circuit (A), I_{CC}	2.2



1- Sur le graphique ci-déçus, placer respectivement pour une G rayonnante reçue de 800 W/m^2

- le point de fonctionnement A correspondant à la P_{max} disponible
- le point de fonctionnement B correspondant à I_{CC} ;
- le point de fonctionnement C correspondant à un circuit ouvert

2- Ce module reçoit, à $50 \text{ }^\circ\text{C}$, une puissance rayonnante de 1000 W/m^2 . La tension à ces bornes, lorsqu'il fonctionne est égale à 10 V .

- D'après le graphique, quelle est la valeur de l'intensité du courant débité ?
- Quelle est la puissance électrique fournie ?... $P_e = UI [W]$
- La surface du module est égale à $0,185 \text{ m}^2$. Calculer son rendement énergétique.
- Réaliser un diagramme des transferts énergétiques pour un module PV.

$$P_{\text{reçue}} = G.A [W] ; \eta = P_e / P_{\text{reçue}} \dots \dots \%$$

3- En utilisant le graphique ou le tableau, quelle résistance doit-on brancher aux bornes du panneau solaire recevant 1000 W/m^2 pour qu'il fournisse une P_{max} ?

Exercice n°5

Un panneau solaire photovoltaïque a une puissance crête de 100 W lorsqu'il reçoit une puissance lumineuse $P_L = 1000 \text{ W/m}^2$. Il est constitué de cellules photovoltaïques branchées à la fois en série et en dérivation. Dans chaque branche les cellules sont associées en série, et les différentes branches sont montées en dérivation. La tension aux bornes du panneau vaut 40V , chaque cellule délivre une tension de 0.5V et un courant de 500 mA .

- Quel est le nombre de cellules dans une branche ?
- Quelle est l'intensité du courant débitée par le panneau ? En déduire le nombre de branches du panneau.
- Déterminer le nombre total de cellules du panneau.
- Chaque cellule est un carré de 5.0 cm de côté, quelle est la surface totale du panneau solaire ?
- Calculer son rendement énergétique.

Exercice n° 6 Calcul de l'efficacité d'une cellule photovoltaïque

Soit une cellule photovoltaïque 150 cm^2 de surface qui produit, dans des conditions standard (1000W/m^2 , AM1,5 et 25°C). Tension en circuit ouvert $V_{oc} : 0,65\text{V}$. Courant de court-circuit, $I_{cc} : 5\text{A}$. Avec un facteur de forme (FF) de 78% , calculer la puissance maximale de la cellule et son efficacité.

Corrigé de l'exercice n° 01

1. L'énergie d'un photon en Joules:

$$\text{On a } E_{ph} = c \cdot h / \lambda = 3,00 \cdot 10^8 \times 6,63 \cdot 10^{-34} / 550 \cdot 10^{-9} = 3,61 \cdot 10^{-19} \text{ J.}$$

2. Le nombre de photons reçus par la cellule chaque seconde:

- Détermination de P_L la puissance lumineuse reçue en W.

$$P_L = P \times S \text{ or } S = 30 \text{ cm}^2 = 30 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$P_L = 800 \times 30 \cdot 10^{-4} = 2,4 \text{ W.}$$

$$E = P \cdot \Delta t = 2,4 \times 1 = 2,4 \text{ J. Il s'agit de l'énergie reçue chaque seconde.}$$

On peut en déduire le nombre de photons: $n = E/E_{ph} = 2,4 / 3,61 \cdot 10^{-19} = 6,6 \cdot 10^{18}$ photons.

Chaque seconde, $6,6 \cdot 10^{18}$ photons sont reçus par la cellule.

Corrigé de l'exercice n° 02

1. Les fréquences des photons associés aux longueurs d'ondes suivantes:

$$\lambda_1 = 440 \text{ nm (bleu)} \text{ et } \lambda_2 = 0,510 \text{ } \mu\text{m (vert).}$$

On a $v = c / \lambda$ donc

$$v_1 = 3,00 \cdot 10^8 / 440 \cdot 10^{-9} = 6,82 \cdot 10^{14} \text{ Hz et}$$

$$v_2 = 3,00 \cdot 10^8 / 0,510 \cdot 10^{-6} = 5,88 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

2. Calculer les énergies, en Joule et en électronvolt associées à ces photons.

$$\text{On a } E = h \cdot v \text{ donc } E_1 = 6,63 \cdot 10^{-34} \times 6,82 \cdot 10^{14} = 4,52 \cdot 10^{-19} \text{ J et}$$

$$E_1 = 4,52 \cdot 10^{-19} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 2,8 \text{ eV}$$

$$E_2 = 6,63 \cdot 10^{-34} \times 5,88 \cdot 10^{14} = 3,90 \cdot 10^{-19} \text{ J et } E_2 = 3,90 \cdot 10^{-19} / 1,6 \cdot 10^{-19} = 2,4 \text{ eV.}$$

Corrigé de l'exercice n° 03 :

La définition du rendement de conversion est:

$$E_{\text{reçu}} / E_{\text{utile}}$$

Or le panneau solaire convertit l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique. On en déduit que l'énergie reçue est l'énergie du rayonnement solaire, et que l'énergie utile est l'énergie électrique disponible pour le circuit électrique.

On peut donc écrire le rendement de conversion comme suit :

$$E_{\text{électrique}} / E_{\text{solaire}}$$

On utilise ensuite la relation entre la puissance et l'énergie

$E = P \times \Delta t$ pour exprimer le rendement de conversion en fonction des données.

Pour une même durée d'utilisation Δt on a :

$$E_{\text{électrique}} = P_{\text{électrique}} \times \Delta t$$

$$E_{\text{solaire}} = E_{\text{solaire}} \times \Delta t$$

Puisque la durée d'utilisation est identique, ce qui permet de simplifier par Δt .

On en déduit l'expression littérale du rendement de conversion :

$$\eta = P_{\text{électrique}} / P_{\text{solaire}}$$

Calculons la puissance du transfert par rayonnement solaire :

$$P_{\text{solaire}} = P_{\text{électrique}} / \eta$$

$$= 57 / 0.10 = 5,7 \cdot 10^2 \text{ W}$$

On suppose une relation de proportionnalité entre la surface des capteurs et la puissance.

Pour résoudre cette question, on utilise un tableau de proportionnalité :

Surface en m^2	Puissance du transfert en watt
1,0	$1,0 \times 10^3$
$S = ?$	$5,7 \times 10^2 \text{ W}$

On en déduit que : $S = \frac{5,7 \cdot 10^2}{1 \cdot 10^3}$

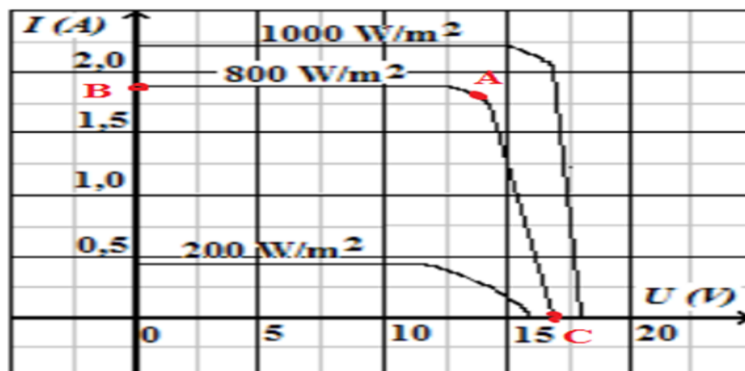
Donc la surface cherchée vaut :

$$S = \frac{1,0 \times 5,7 \times 10^2}{1,0 \times 10^3}$$

$$= 0,57 \text{ m}^2.$$

La surface du panneau solaire permettant un tel transfert est de $0,57 \text{ m}^2$.

Corrigé de l'exercice n° 04



1- Ce module reçoit, à 50 °C, une puissance rayonnante de 1000 W/m². La tension à ces bornes, lorsqu'il fonctionne est égale à 10 V.

- D'après le graphique, la valeur de l'intensité du courant débité: $I = 2.25 \text{ A}$.
- La puissance électrique fournie: $P_e = UI = 22.5 \text{ W}$
- La surface du module est égale à 0,185 m². Le rendement énergétique du module: $P_{re\grave{c}ue} = 1000 \times 0,185 = 185 \text{ W}$; $\rho = 22.5/185 = 0,12 = 12.2 \%$.
- Réalisation d'un diagramme des transferts énergétiques pour un module PV.

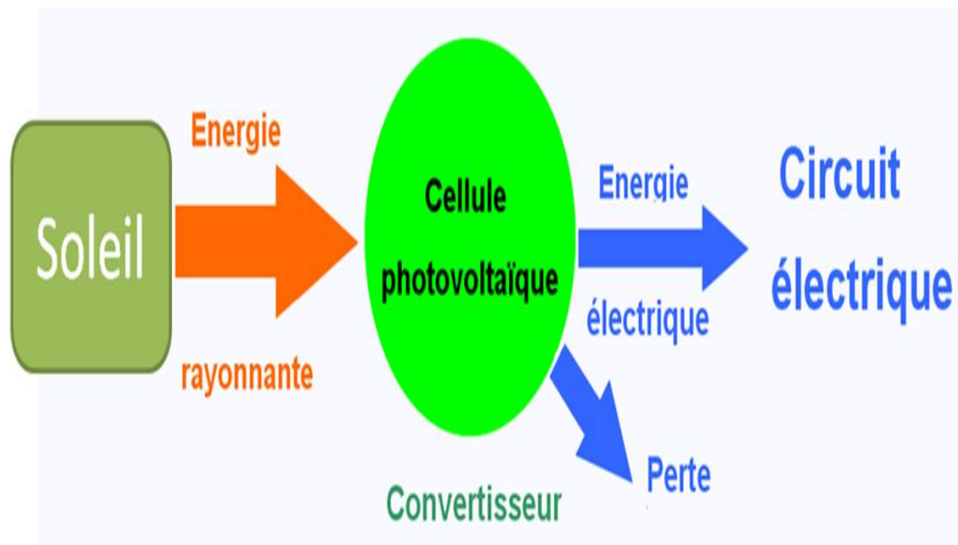


Diagramme des transferts énergétiques pour un module photovoltaïque

2- La résistance branchée aux bornes du panneau solaire photovoltaïques recevant 1000 W/m² pour qu'il fournisse une P_{max} :

$$R = U/I = 6,8 \Omega.$$

Corrigé de l'exercice n° 05

1- Le nombre de cellules dans une branche:

La tension aux bornes d'une branche est la même que celle aux bornes du panneau, puisqu'elles sont branchées en dérivation. $U_B = 40 \text{ V}$. Dans une branche la loi d'additivité des tensions s'applique et comme elle est constituée de n cellules, on a : $U_B = n \times U_C$ donc $n = U_B/U_C = 40/0,5 = 80$ cellules.

Une branche est constituée de 80 cellules.

2- L'intensité du courant débitée par le panneau: En déduire le nombre de branches du panneau.

On a $P = U \times I$, donc, $I = P/U = 100/40 = 2,5 \text{ A}$

Puisque les branches sont en dérivation, elles se rejoignent toutes au même nœud, on peut appliquer la loi des nœuds. On note « m » le nombre de branches et toutes délivrent l'intensité I_1 puisqu'elles sont

identiques (unicité de l'intensité dans une branche) : $I = m \cdot I_1$
Donc $m = I/I_1 = 5$. Il y a 5 branches.

3- Déterminer le nombre total de cellules du panneau.

$$N' = n \times m = 400 \text{ cellules.}$$

Il y a 400 cellules dans ce panneau solaire.

4- Chaque cellule est un carré de 5.0 cm de côté.

a. La surface totale du panneau solaire:

$$\text{Soit « s » la surface d'une cellule : } s = a^2 = (5.0 \cdot 10^{-2})^2 = 25 \cdot 10^{-4} = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2.$$

$$\text{La surface totale du panneau est } S = N' \cdot s = 400 \times 2.5 \cdot 10^{-3} = 1.0 \text{ m}^2$$

b. Calculer son rendement énergétique.

$$P_L = 1000 \times 1.0 = 1.0 \cdot 10^3 \text{ W}$$

$$P_C = 1.00 \cdot 10^2 \text{ W}$$

$$\text{Rendement : } \eta = P_C/P_L = 0.10 \text{ soit } 10\%.$$

Corrigé de l'exercice n° 6

Puissance maximale:

$$P_{\max} = I_{sc} \times V_{oc} \times FF$$

$$P_{\max} = 5 \text{ A} \times 0,65\text{V} \times 0,78 = 2,54\text{W}$$

Efficacité cellule

$$\mu = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{A \times P_{sol}} \times 100$$

$$\mu = \frac{5\text{A} \times 0,65\text{V} \times 0,78}{150/\text{cm}^2 \times 0,1\text{W}/\text{cm}^2} \times 100 = 17\%$$

Exercices portant sur le dimensionnement d'un système PV autonome d'une habitation isolée.

Enoncé du problème d'une installation solaire photovoltaïque autonome

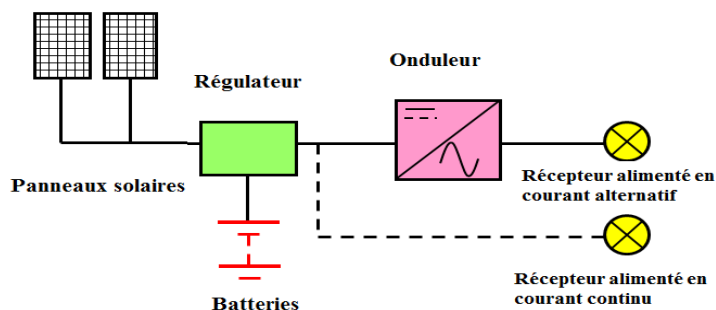
Ce type de résidence est souvent loin des lignes électriques traditionnelles. L'ensoleillement est assez favorable. L'énergie PV est donc bien adaptée pour disposer d'un minimum de confort. L'habitation est située à 1500m, altitude 37°. Sa façade sud jouit d'une bonne exposition. C'est une famille de 4 personnes qui occupe cette maison régulièrement mais seulement le week end. L'électricité du secteur n'est pas disponible.



-Pour dimensionner un système photovoltaïque autonome et déterminer le nombre de modules PVs nécessaires, on se base sur la consommation pendant la période de moindre irradiation au cours de laquelle on veut faire fonctionner les applications.

A. Calcul de l'éclairage

Quatre points lumineux de 13 W et 12 V sont présents dans les différentes pièces de la maison. Quelle est la consommation E en ampères heures pour une durée de 3 heures en été ? De même pour une durée de 6 heures en hiver ?



Système photovoltaïque autonome

B. Calcul de la fourniture en eau

Une source naturelle est disponible, on va utiliser une pompe de relevage pour mettre en pression l'eau courante, afin que les occupants puissent se servir au robinet dans leur maison.

Pour un débit de 10 l/min, cette pompe consomme 6A sous 12V. Comme il y a 4 personnes et que l'on compte 100 l/personne et par jour (pour le lavage, la cuisson)

- Combien de temps la pompe va-t-elle fonctionner par jour?
- Quelle est la consommation E sur cette période de temps ?

C. Calcul de la production de froid

Un réfrigérateur de 110 litres alimenté en continu, avec une bonne isolation thermique, servira à conserver les aliments, mais uniquement lors des séjours. De plus, il est décidé de ne s'en servir que l'été, puisque l'hiver, il suffit de laisser les denrées dehors, la température ne dépassant pas 5°C. Cet équipement est équipé d'un compresseur de 70W et il consomme 300 Wh/jour.

*Quelle est la consommation E de production de froid par jour ?

D. Télévision

Pour éviter l'achat d'un téléviseur en continu, un modèle du commerce en 230 V_{ac} sera utilisé. Sa puissance est de 90 W. Il est prévu de le brancher sur un petit onduleur spécifique, à 90% de rendement, qui sera allumé en même temps que le téléviseur. Pour un usage prévu de 4h par jour : Quelle est la consommation E sur cette période de temps ?

E. Consommations électriques de l'habitation isolée

Pour obtenir les consommations moyennes étalées dans le temps, qui vont nous permettre de définir les panneaux, il faut tenir compte de l'occupation 2 jours par semaine seulement. Faites la synthèse des consommations électriques en remplissant le tableau ci-dessous. Quelle est la consommation moyenne par jour sur la semaine en été et en hiver ?

Choix des équipements

Conseils d'un installateur électricien :

Les composants photovoltaïques sont relativement « standards », disponibles à un bon rapport qualité/prix. Il s'agit notamment de :

Il en ressort deux exercices, l'un avec le système économique et l'autre un peu plus confortable.

❖ Le système plus confortable se compose de :

- 4 modules photovoltaïques 50Wc-12V
- 1 batterie solaire au plomb ouvert de 220 Ah-12V
- 1 régulateur charge-décharge type série 20 A-12V
- 1 onduleur type TV de 400 VA
- 8 luminaires à économie d'énergie 13 W en 230 V_{AC}

En se servant des catalogues faire vos choix et calculer le devis et prix total de l'installation =

F. Solution à trois panneaux : Système économique

❖ Le système économique se compose de :

- 3 modules photovoltaïques 50 Wc-12V décrits ci-dessus
- 1 batterie solaire au plomb ouvert de 220Ah-12V
- 1 régulateur charge-décharge type série 20A-12V
- 1 onduleur type TV de 400 VA
- 8 réglottes fluo en 12 V_{DC}

Pour l'exposition 45° Sud, le rayonnement reçu est de 3 kWh/m² jour en hiver et de 4 kWh/m² jour en été.

- Quelle est la production énergétique par jour en hiver?
- Quelle est la production énergétique par jour en été ?
- Comparez avec la consommation prévue.
- Calculez les coefficients de pertes en hiver et en été
- Concluez sur la production effective en tenant compte des pertes de salissure de 10% et un rendement de la batterie de 80%.

G. Solution à quatre panneaux : Système plus confortable

❖ Le système se compose de :

- modules photovoltaïques 50 Wc-12V décrits ci-dessus
- 1 batterie solaire au plomb ouvert de 220 Ah-12V
- 1 régulateur charge-décharge série 20 A-12V
- 1 onduleur type TV de 400 VA
- 8 luminaires à économie d'énergie 13 W en 230V_{AC}

Prix total de ces composants:

Pour l'exposition 45°Sud, le rayonnement de Davos reçu est de 3 kWh/m².jour en hiver et de 4 kWh/m².jour en été. Considérons la solution à quatre panneaux :

- Quelle est la production énergétique par jour en hiver en tenant compte des coefficients de pertes en courant de $C_{pc}=0.72$?
- Quelle est la production énergétique par jour en été en tenant compte des coefficients de pertes en courant de 0.72?
 - Quel est l'excédent par rapport aux prévisions ?

Que pouvez-vous en conclure ?

Réponse

1- Calcul de l'éclairage

En été: 3h d'éclairage : $E = 4 \cdot 13 \cdot 3 / 12 = 13 \text{ Ah}$ sous 12 V_{dc}

En hiver: 6h d'éclairage : $E = 4 \cdot 13 \cdot 6 / 12 = 26 \text{ Ah}$ sous 12V_{dc}

Justification

- E= consommation sur une période de temps
- $E=I \cdot N$ en Ampères heures pour une durée de N heures. La puissance P peut être exprimée en fonction de I et U : $P = U \cdot I$ donc $I = P/U$. Ainsi, $E = P \cdot N / U$ En été : 4 lampes * puissance de la lampe 13 W* 3 h d'éclairage / Tension de 12 V En hiver : 4 lampes * puissance de la lampe 13 W* 6 h d'éclairage / Tension de 12 V

2- Calcul de la fourniture en eau

Une source naturelle est disponible, on va utiliser une pompe de relevage pour mettre en pression l'eau courante, afin que les occupants puissent se servir au robinet dans leur maison.

Pour un débit de 10 l/min, cette pompe consomme 6A sous 12V. Comme il y a 4 personnes et que l'on compte 100 l/personne et par jour (pour le lavage, la cuisson)

- Combien de temps la pompe va-t-elle fonctionner par jour?
- Quelle est la consommation E sur cette période de temps ?

Réponse (W qui est équivalent à J/s)(1 kWh=3600 kJ).

- La pompe va fonctionner 40 minutes par jour
- $E = 4 \text{ Ah}$ sous 12 V

Justification

- Le besoin est de 400 l/jour. Pour un débit de 10 l/min, $400/10 = 40$ minutes
- $E = I \cdot N = 6A \cdot 40/60 = 4 \text{ Ah}$ sous 12V et 40/60 pour convertir en heures.

3- Calcul de la production de froid

Un réfrigérateur de 110 litres alimenté en continu, avec une bonne isolation thermique, servira à conserver les aliments, mais uniquement lors des séjours. De plus, il est décidé de ne s'en servir que l'été, puisque l'hiver, il suffit de laisser les denrées dehors, la température ne dépassant pas 5°C. Cet équipement est équipé d'un compresseur de 70W et il consomme 300 Wh/jour.

*Quelle est la consommation E de production de froid par jour ?

- **Réponse:** Sous 12 V, $E = 25 \text{ Ah}$ par jour l'été uniquement

Justification : Il suffit de convertir l'unité de la consommation : $W = V \cdot A$.

$300 \text{ Wh/jour} = 300 \text{ VAh/jour}$ donc pour obtenir des Ah/jour il suffit de diviser par la tension $U = 12 \text{ V}$. $E = 300/12 \text{ Ah/jour} = 25 \text{ Ah/jour}$

4- Télévision

Pour éviter l'achat d'un téléviseur en continu, un modèle du commerce en 230 V_{ac} sera utilisé. Sa puissance est de 90 W. Il est prévu de le brancher sur un petit onduleur spécifique, à 90% de rendement, qui sera allumé en même temps que le téléviseur. Pour un usage prévu de 4h par jour : Quelle est la consommation E sur cette période de temps ?

- $E = 33.3 \text{ Ah}$ par jour

Justification

- $P_{tv} = 90 \text{ W}$, $U = 12 \text{ V}$, $N = 4$ heures et $\eta = 0.9$
- $\eta = P_{tv}/P_{conso}$ d'où $P_{conso} = P_{tv}/\eta = 90/0.9 = 100 \text{ W}$

- $E=I*N=(P_{\text{conso}}/U)*N=(100/12)*4=33.3$ Ah par jour

5- Consommations électriques de l'habitation isolée

Pour obtenir les consommations moyennes étalées dans le temps, qui vont nous permettre de définir les panneaux, il faut tenir compte de l'occupation 2 jours par semaine seulement. Faites la synthèse des consommations électriques en remplissant le tableau ci-dessous. Quelle est la consommation moyenne par jour sur la semaine en été et en hiver ?

Consommation moyenne par jour en été : $E=21.5$ Ah

- Consommation moyenne par jour en hiver : $E=18.1$ Ah

	Eté en Ah/jour	Hiver en Ah/jour
Eclairage	13	26
Eau	4	4
Froid	25	0
Télévision	33,3	33,3
CONSO TOTALE	75,3	63,3

Justification

- $E=75.3*2/7$ avec 75.3Ah est la consommation totale par jour en été
- $E=63.3*2/7$ avec 63.3Ah est la consommation totale par jour en hiver

Choix des équipements

Conseils d'un installateur électricien :

Les composants PVs sont relativement « standards », disponibles à un bon rapport qualité/prix. Il s'agit notamment de deux exercices, l'un avec le système économique et l'autre un peu plus confortable.

- Le système plus confortable se compose de :

- 4 modules photovoltaïques 50Wc-12V
- 1 batterie solaire au plomb ouvert de 220 Ah-12V
- 1 régulateur charge-décharge type série 20 A-12V
- 1 onduleur type TV de 400 VA
- 8 luminaires à économie d'énergie 13 W en 230 V_{AC}

6- Solution à trois panneaux : Système économique

Le système économique se compose de :

- 3 modules photovoltaïques 50 Wc-12V décrits ci-dessus
- 1 batterie solaire au plomb ouvert de 220Ah-12V
- 1 régulateur charge-décharge type série 20A-12V
- 1 onduleur type TV de 400 VA

- 8 réglettes fluo en 12 V_{DC}

Pour l'exposition 45° Sud, le rayonnement reçu est de 3 kWh/m² jour en hiver et de 4 kWh/m² jour en été.

- Quelle est la production énergétique par jour en hiver?
- Quelle est la production énergétique par jour en été ?
- Comparez avec la consommation prévue.
- Calculez les coefficients de pertes en hiver et en été
- Concluez sur la production effective en tenant compte des pertes de salissure de 10% et un rendement de la batterie de 80%.

- Production en hiver $E = 27$ Ah/jour
 - Production en été $E = 36$ Ah/jour
 - La production énergétique est légèrement excédentaire
- $C_{ph} = 0.67$ (coefficient de pertes en hiver) et $C_{pe} = 0.6$ (coefficient de pertes en été).

Si les salissures ne provoquent pas une perte de plus de 10% et si la batterie a un rendement \geq à 80%, le coefficient de pertes en courant sera de 0.72.

Calcul: $(27\text{Ah/jour} \cdot 10\%) \cdot 80\% = 19.44 \dots 72\%$ de 27Ah/jour soit 0.72 idem pour l'été

La production effective sera donc de 19.5Ah ($= 27 \cdot 0.72$) en hiver et 26Ah ($= 36 \cdot 0.72$) en été.

Justification

- Production en hiver : $E = N_{\text{panneaux}} \cdot N_e \cdot I$

$$E = N_{\text{panneaux}} \cdot (E_{\text{sol}}/1000) \cdot I = 3 \cdot (3000/1000) \cdot 3 = 27 \text{ Ah/jour}$$

- Production en été : $E = 3 \cdot (4000/1000) \cdot 3 = 36$ Ah/jour
- Hiver : conso=18.1 > prod=27 ; Eté : conso=21.5 > prod=36
- En hiver, $C_{ph}=18.1/27=0.67$ et En été, $C_{pe}=21.5/36=0.6$

7- Solution à quatre panneaux : Système plus confortable

Le système se compose de :

- 4 modules photovoltaïques 50 Wc-12V décrits ci-dessus
- 1 batterie solaire au plomb ouvert de 220 Ah-12V
- 1 régulateur charge-décharge série 20 A-12V
- 1 onduleur type TV de 400 VA
- 8 luminaires à économie d'énergie 13 W en 230 V_{AC}

Pour l'exposition 45°Sud, le rayonnement de Davos reçu est de 3 kWh/m².jour en hiver et de 4 kWh/m².jour en été. Considérons la solution à quatre panneaux :

- Quelle est la production énergétique par jour en hiver en tenant compte des coefficients de pertes en courant de $C_{pc} = 0.72$?

- ✚ Quelle est la production énergétique par jour en été en tenant compte des coefficients de pertes en courant de 0.72?
- ✚ Quel est l'excédent par rapport aux prévisions ?
- ✚ Que pouvez-vous en conclure ?

Réponse

- Production en hiver $E=26$ Ah/jour
- Production en été $E=34.5$ Ah/jour
- Excédent de 7.9 Ah/jour en hiver et de 13 Ah/jour en été
- Le système à 4 panneaux sera largement excédentaire : c'est un de ses objectifs, il donne une bonne marge pour permettre aux occupants de disposer de plus d'énergie.

Justification

- Production en hiver $E=4*3A*0.72*3h/jour$ car 4 est le nombre de panneaux * l'intensité de ces modules $I=3A$ * coefficient de pertes en courant $C_{pc}=0.72*Ne(h/jour)=E_{sol}/1000=(3000Wh/m^2.jour)/(1000W/m^2)$
- Production en été $E=4*3A*0.72*4h/jour$ car 4 est le nombre de panneaux * l'intensité de ces modules $I=3A$ * coefficient de pertes en courant $C_{pc}=0.72* Ne(h/jour)=E_{sol}/1000=(4000Wh/m^2.jour)/(1000W/m^2)$
- Production hiver = 26 Ah/jour > Consommation hiver = 18.1 Ah/jour
- Production été = 34.5 Ah/jour > Consommation été = 21.5 Ah/jour

1.7 Les formules et méthodes de bases pour estimer la production photovoltaïque de panneaux solaires.

- Les pertes peuvent être estimée et intégrées dans le calcul de la production.
- Formules de base pour connaître la production d'un panneau ou d'un système PV Calcul par le rendement du panneau solaire photovoltaïque

η_{pv} :

$$E = S * \eta_{pv} * H * C_p$$

E: énergie produite en Wh

S: surface du champ photovoltaïque [m²], (exemple : 7.14 m²)

η_{pv} : rendement du module (exemple : 14 %)

H: ensoleillement / rayonnement sur la surface inclinée en [kWh/m²], (exemple:1700 pour les régions côtières, 1900 haute plateaux, 2650 kWh/m².an Sahara de l'Algérie).

C_p : coefficient de perte varie entre 10 % et 90 %, la valeur fréquente étant entre 0.75 et 0.8

Calcul par le rendement du panneau

Exercice 1 : Voici les détails des pertes C_p qui varie selon les installations:

- Pertes onduleur : 8% à 15 % soit: 10 %
- Perte temperature: 5% à 12% soit; 8 %
- Pertes câbles et connexion : 2% soit: 2%

- Pertes masque : 0 % à 50% (dépend de l'implantation) ----soit: 30 %
- Pertes faible éclaircissement : 3% à 7%soit: 4 %
- Pertes liées à la réflectivité environ : 3%soit : 3 %

Remarque : on peut définir ainsi un "coefficient de production" qui permet d'avoir rapidement une idée de la production attendue en fonction de la puissance installée.

Coefficient de production = Production / Puissance installée

Le coefficient de production = 1.17. Une installation similaire de puissance 3000 W_c aura donc une production d'environ $3000 \times 1.17 = 3510$ kWh/an.

Méthode de la puissance crête du module P_c , et des heures d'ensoleillement N_e :

Un module se caractérise avant tout par sa puissance crête P_c , puissance dans les conditions standart STC. Le module exposé dans les conditions STC va produire à un instant donné une puissance électrique égale à cette puissance crête, et si cela dure N_e heures, il aura produit une énergie électrique E égale au produit de la puissance crête par le temps écoulé, au coefficient de pertes près :

$$E = P_c \cdot C_p \cdot N_e$$

E = énergie produite en Wh

P_c = puissance crête du panneau en kWc

N_e = Nombre d'heures équivalentes d'ensoleillement

Soit : énergie électrique produite (Wh) = Nombre d'heures d'exposition aux conditions STC (h) * P_c .

Cependant, le rayonnement n'est pas constant pendant une journée d'ensoleillement, donc on ne peut pas appliquer strictement cette loi. Afin de calculer ce que produit un module photovoltaïque pendant une année d'ensoleillement qui a un certain profil et une énergie solaire intégrée en Wh/m², on va assimiler cette énergie solaire au produit du rayonnement instantané 1000 W/m² par un certain nombre d'heures que l'on appelle « nombre d'heures équivalentes pleine puissance ».

Grâce à la valeur de 1000 de ce rayonnement de référence, le nombre d'heures équivalentes se retrouve exactement égal à l'énergie solaire intégrée si on l'exprime en kWh/m².an.

$$H = N_e \cdot 1000$$

L'énergie solaire annuelle (Wh/m².an) = nombre d'heures équivalentes (h/an).1000 (W/m²). Dans notre exemple $H = 1700$ kWh/m².an ou 1700000 Wh/m².an donc

$$N_e = 1700000/1000 = 1700 \text{ h}$$

Le nombre d'heure dans les régions côtières $N_e=2650$ h/an, haute plateaux $N_e=3000$ h/an, Sahara

$N_e= 3500$ h/an On peut ainsi avoir la production électrique: $E = P_c$ (kWc) * N_e * C_p

$$= 1000 \cdot 0.74 \cdot 1700$$

$$E = 1\,258\,000 \text{ Wh/an, soit } 1258 \text{ kWh/an}$$

Si on prend le Gain maximal par an pour 3 kW_c à un tarif de 0.50 DA/kWh

$$= 3 \cdot 1700 \cdot 0,5 \text{ Gain maximal pour un an} = 2550 \text{ DA}$$

Exemple de calcul les éléments d'une installation solaire PV connectée sur le réseau électrique

Exercice 1 L'objectif est de savoir calculer les grandeurs électriques utiles des composants des installations solaires photovoltaïques raccordées aux réseaux.

*Calculer les grandeurs électriques utiles des composantes d'une installation solaire PV connectée au réseau, sachant que :

- La résistivité du cuivre : $\rho = 22,5 \cdot 10^{-3} \Omega \text{mm}^2/\text{m}$
- Distance entre panneaux solaires et onduleur $l = 20 \text{ m}$
- Section des conducteurs dépend du courant et de la distance entre les panneaux solaires et l'onduleur.

On limite le pourcentage de la chute de tension : $\% = \frac{\Delta U}{U} = 0,8 \%$

Exemple de choix

Des caractéristiques d'un panneau solaire

- Tension maxi d'un panneau solaire : 17,30
- Puissance crête d'un panneau solaire: 70 Wc

Des caractéristiques d'un l'onduleur (sachant que : $80\% < P_{\text{onduleur}} < 100\%$ du P_{PVG})

- Tension d'entrée maxi de l'onduleur : 400 V continu
- Tension de sortie de l'onduleur : 230 V alternatif
- Rendement : 97 %

Le choix du disjoncteur différentiel dépend du courant, de la sécurité des personnes et de la tension.

Le calibre du disjoncteur est en fonction de la puissance renvoyée au réseau.

$P = 3 \text{ kVA}$ correspond à 15 A ; $P = 6 \text{ kVA}$ correspond à 30 A.

Soit la puissance renvoyée au réseau égale à 2 kVA

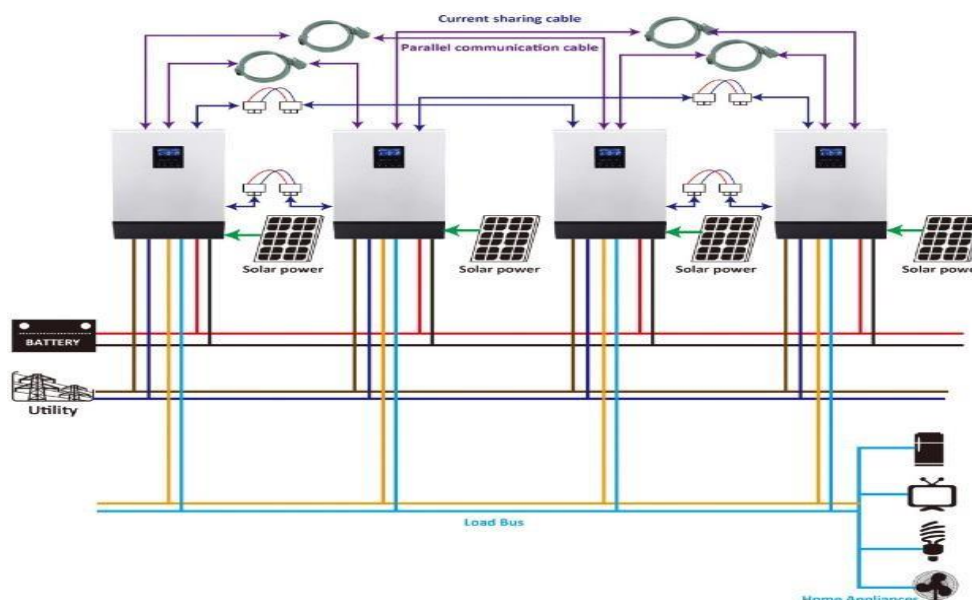


Figure 2.40. Installations solaires PVs raccordées aux réseaux

Dimensionnement d'un système de pompage Photovoltaïque

Dimensionnement et choix des éléments d'un système de pompage photovoltaïque. Pour un réservoir de volume $V = 150 \text{ m}^3$ (Le débit (Q) : Quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un Intervalle de temps. Débit horaire $Q_h = (m^3/j)/$ avec un durée d'ensoleillement max), $H_{HMT} = 60 \text{ m}$, avec $\eta_{ond} = 96\%$; $\eta_{MPPT} = 89,8\%$ et $\eta_{motopomp} = 63 \%$ (voire Le schéma dans la figure 2.41)

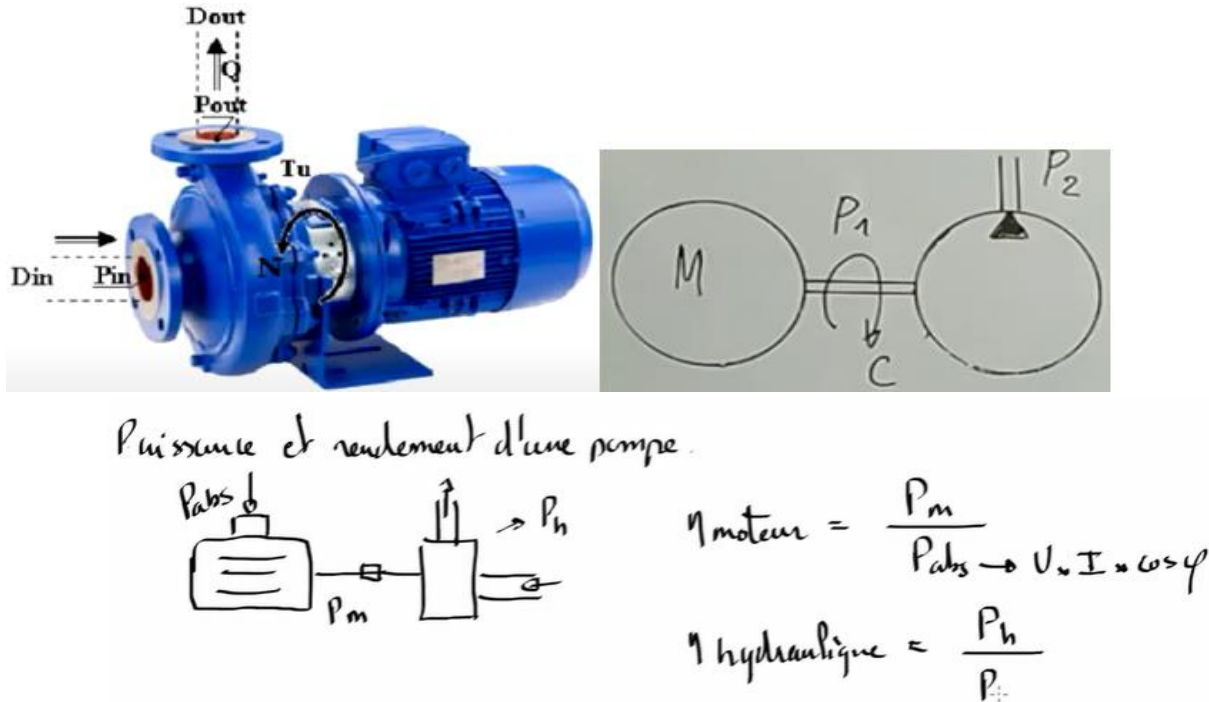


Figure 2.41: Relation entre les différentes puissances et rendements de la motopompe

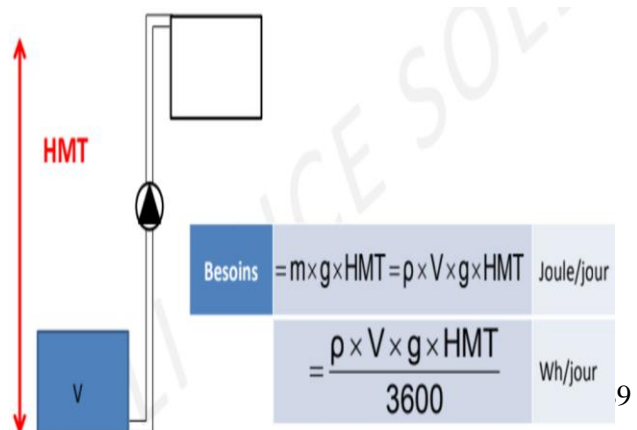
Pour un réservoir et un débit de la motopompe et d'après les données de l'Annexe 01, le choix de la motopompe est : CSP3-28060 avec un débit de la motopompe $Q_m = 50 \text{ m}^3/\text{h}$, $H_{HMT} = 60 \text{ m}$

On peut savoir l'énergie hydraulique en la calculant par N_h : le nombre d'heures d'une journée défavorable par an, soit $N_h = 7 \text{ h}$, donc $Q_T = 50 \times 7 = 350 \text{ m}^3/\text{j}$, or le volume du réservoir est de 150 m^3 , et si on ajoute 15% du V on aura $0,15 \times 150 + 150 = 172,5 \text{ m}^3$. Donc on aura besoins (de 4 h pour 200 m^3), exactement $50 \text{ m}^3 \times 3\text{h} + 30' = 175 \text{ m}^3$

L'Énergie hydraulique sera :

$$E_h = g \cdot \rho \cdot Q \cdot H_{HMT} / 3600 = C_h \cdot Q \cdot H_{HMT}$$

Avec :



E_h : Energie hydraulique [Wh / j] ;
 Q : Volume d'eau [m^3 / j] ;
 H_{HMT} : Hauteur manométrique totale [m] ;
 ρ : Densité d'eau 10^3 kg/m^3 ;
 g : accélération de la pesanteur $9,81 \text{ m/s}^2$

On prend pour la constante hydraulique C_H :

$$C_H = g \cdot \rho = \frac{9,81(m.s^{-1})10^3(kg.m^{-3})}{3600(s/h)} = 2,725 \frac{kg.s.h}{m^2}$$

$$E_h = 9,81 \cdot 1000 \cdot 350 \cdot 60 / 3600 = 57,22 \text{ kWh/j, et}$$

L'Energie électrique sera calculée comme suite:

$$E_h = E_e / 0,63 \quad [\eta_H = 63\% \text{ rendement entre pompe et Moteur: } E_h \text{ et } E_e .$$

$$E_e = 57,22 / 0,63 = 90,83 \text{ kWh}$$

Donc la puissance Hydraulique sera:

$$P_h = Q \cdot H_{HMT} / 367 = 50 \times 60 / 367 = 8.17 \text{ Kw dont } \eta = P_h / P_{elec} \rightarrow P_{elec} = P_h / \eta$$

$$P_{elect} = 8.17 / 0.63 = 12.97 \text{ kW}$$

Ou on peut la calculer comme suite:

$$P_{élect} = \frac{E_{élect}}{\text{Nombre d'heures de soleil par jour}}$$

$$P_{elect} = 90,83 \text{ kWh} / 7 = 12,97 \text{ kW}$$

Si on ajoute par mesure de sécurité 35% de la valeur de puissance de la motopompe calculée on aura:

$$P_{mootompe} = 12,97 \cdot 0,35 + 12,97 = 17.50 \text{ kW}$$

L'onduleur variateur choisi (d'après les données des catalogue sera : CSI3-19K, son rendement est:

$\eta_{ond} = 96\%$, donc la puissance d'entrée de l'onduleur sera:

$$P_e = P_{mootompe} / 0,96 \quad P_e = 17.50 / 0,96 = 18.23 \text{ kW est égale aussi à la puissance de la sortie du MPPT avec un rendement } \eta_{MPPT} = 89,8\% \text{ d'où la puissance du GPV est :}$$

$$P_{GPV} = 18.23 / 0,898 = 20.31 \text{ kW}$$

Soit le choix des modules solaires : HTCG 270M, donc le nombre total des panneaux solaires sera: $N_T = P_{PVG} / P_{PV}$

$$N_T = 20310 / 270 \approx 75$$

Or le courant de la motopompe égale à

$$I_{\text{motopompe}} = 17500 / 380 \cdot \sqrt{3} (\cos \theta = 1) \approx 26.62 \text{ A.}$$

- Le nombre des branches en parallèle N_P :

$$\text{Puisque le courant de } I_{PV} = 8,41 \text{ A, donc } I_{\text{motopompe}} / I_{PV} = 26.62 / 8,41 \approx 3$$

- Le nombre des modules en séries sera

$$N_T = 75 = N_P \cdot N_S \Rightarrow N_S = N_T / N_P$$

$$N_S = 75 / 3 = 25.$$

Annexe

Le choix des éléments pour le dimensionnement d'un système de pompage PV

Caractéristiques des modules Panneau solaire VICTRON poly cristallin 270W

Puissance nominale P_{mpp} *	270 W
Tension à puissance max. V_{mpp} *	31.7 V
Courant à puissance max. I_{mpp} *	8.52 A

Tension en circuit ouvert Voc	38.04 V
Courant de court-circuit Isc	9.21 A
Tension maximale système	1000 V
Tolérance de puissance	+/-3%

Onduleurs variateur solaires $\eta=96\%$ conçus pour le pompage	Pompes immergées triphasées		
	Type de pompe	Q(m ³ /h)	H(m)
CSI3-2K ; CSI3-3K	CSP3-2235	15	10
CSI3-4K ; CSI3-5K	CSP3-4000	20	20
CSI3-5,5K ; CSI3-7,5K	CSP3-8500	25	35
CSI3-9K ; CSI3-19K	CSP3-22091	30	40
CSI3-25,5K ; CSI3-28,5K	CSP3-22118	40	50
CSI3-35K ; CSI3-40K	CSP3-28060	50	60
CSI3-45K ; CSI3-75K	CSP3-30000	60	70

Corrigé de l'exercice n°5: Projet d'un système PV autonome d'une ferme de l'université de Mascara

Dimensionnement d'une installation solaire photovoltaïque destinée à couvrir les besoins énergétiques et alimentation des équipements électriques et éclairage soit le tableau ci-dessous:

Tableau. 1 Consommation des Équipements électriques

Les appareils	Quantité	Puissance	Durée de d'emploi h/j	Consommation E(Wh)	Consommation E(Ah); UB = 48
Ordinateur	03	90 W	7h	1 890	39.375
TV	01	180 W	7h	1 260	26.25
Réfrigérateurs	03	100 W	7h	2 100	43.75
Etuves	02	750 W	7h	10 500	218.75
Distillateur	01	3 000 W	1h	3 000	62.5
Agitateurs	01	115 W	1h	115	2.39
PH-mètre	01	205 W	1h	205	4.27
Balances analytiques	02	280 W	1h	560	11.66
Centrifugeuses	02	110 W	1h	220	4.58
Climatiseurs split	03	1 000 W	3h	9 000	187.5
Ventilateurs extracteurs	02	250 W	5h	2 500	52.08
Cumulus 10 L	01	100 W	5h	500	10.41
Poste à soudeuse	01	1 100 W	1h	1 100	22.91
Compresseur	01	1 200 W	2h	2 400	50
TOTAL		8 480 W		35 350	736.425

Evaluation du besoin : On évalue le besoin journalier en calculant la consommation pendant une journée. On aura :

$$E_c = P_1 \times t_1 + P_2 \times t_2 + P_3 \times t_3 + \dots + P_n \times t_n = \sum_{i=1}^n P_i \times t_i$$

E_c : L'énergie consommée par jour (Wh/j)

P_i : La puissance unitaire d'un appareil quelconque

t_i : La durée d'utilisation de cet appareil dans une journée

Tableau.2 : L'évaluation du besoin total

Application	Pe (KW)	Durée d'emploi h/j	Consommation E(KWh)	Consommation E(Ah) ; U _B = 48
Éclairage intérieur	2	7	14	4.08
Eclairage extérieur	1	7	7	1.02

Équipements électriques	8.480		35.350	736.425
E _{Total}	11.480		56.350	741.525

Tableau .3: La tension de fonctionnement du système

P _c	0-500 W _c	500 W _c -2KW _c	2KW _c -10KW _c	>10KW _c
Tension Recommandée	12Vdc	24Vdc	48Vdc	>48Vdc

Puisque la puissance totale est 11.480W, la tension de fonctionnement (batterie) de notre système est de 48 V_{DC}

Calcul de la puissance crête du GPV :

$$P_c = \frac{E_c}{k \cdot I_{r,moy}}$$

P_C : Puissance crête du champ photovoltaïque (W_c)

E_C : L'énergie consommée par jour (Wh/j)

K : Coefficient correcteur ou le rendement du système photovoltaïque. $K \in [0.55; 0.75]$ on prend comme valeur de K=0.65]

I_{r,moy} : L'irradiation journalière moyenne ou les heures crête h_c (kWh/m².j)

Pour la ville de mascara l'inclinaison optimale des panneaux est de 35,36° on prend I_{r,moy} = 4.5 kWh/m².j

$$\text{Donc : } P_c = \frac{E_c}{k \cdot I_{r,moy}} \rightarrow P_c = \frac{56350}{0.65 \cdot 4.5} = 19\,264.9 \text{ Wc}$$

Le choix des panneaux :

$$N = \frac{P_c(\text{système})}{P_c(\text{panneau})}$$

N : le nombre des panneaux photovoltaïque.

P_c (système) : la puissance crête du système.

P_c (panneau) : la puissance crête d'un panneau.

On choisit un panneau PV d'une puissance crête de 270 W_c de type poly cristallin et d'une tension de 31.7 V_{DC}.

Les paramètres du panneau :

$$P_c = 270 \text{ Wc}$$

$$U_{oc} = 38.04 \text{ V Tension à vide (circuit ouvert)}$$

$$U_{mpp} = 31.7 \text{ V Tension au point de puissance maximale}$$

$$I_{cc} = 9.21 \text{ A Courant de court-circuit}$$

$$I_{mpp} = 8.52 \text{ A Courant au point de puissance maximal}$$

Nombre de panneaux

$$N = \frac{P_c(\text{système})}{P_c(\text{panneau})} = \frac{19246.9}{270} = 71.3 \rightarrow N=72 \text{ panneaux solaires PV}$$

Pour notre installation on prend 72 panneaux de 270 WC

Le câblage des panneaux :

On dispose de 72 panneaux, on câble les 72 sous la forme suivante :

Le nombre de panneaux en parallèles :

$$I_t = P_t / T$$

$$I_t = 19264.9 / 230 = 83.68 \text{ A}$$

$$I_t / I_{\text{mpp}} = 83.68 / 8.52 = 9.82 \rightarrow N_p = 10 \text{ panneaux}$$

Le nombre de panneaux en série :

$$N_t = N_s * N_p$$

$$N_s = N_t / N_p = 72 / 10 = 7.2 \rightarrow N_s = 8 \text{ panneaux}$$

Dimensionnement des batteries :

Le calcul de la capacité de stockage de la batterie :

$$C = \frac{E_C * n}{D * U_{\text{sys}}}$$

C : Capacité de stockage dans les batteries (Ah).

E_C : L'énergie consommée par jour (Wh/j).

D : décharge maximale des batteries (0.8 pour les batteries au plomb) on peut l'appeler aussi PDD (profondeur de décharge).

U_{sys} : La tension du système.

N : Le nombre des jours d'autonomie 3 jours

$$c = \frac{19264.9 * 3}{0.8 * 48} = 1505 \text{ Ah}$$

Le choix des batteries :

On choisit une batterie solaire de (48V/ 200 Ah), (C20=200 Ah)

Le nombre des batteries :

$$N_{\text{batt}} = 1505 / 200 = 7.5$$

$$N_{\text{batt}} = 8 \text{ batteries}$$

Dimensionnement du régulateur et de l'onduleur :

Le dimensionnement du régulateur est défini une fois que le type de régulateur est retenu. Il existe deux types de régulateurs ;

- ❖ un simple régulateur de charge : il ne contrôle que la charge de batterie et évite ainsi les surcharges de la batterie ; il est utilisé pour des installations pour lesquelles le risque de décharge est quasiment nul (surdimensionnement des modules, consommation très bien maîtrisée avec une faible probabilité de dépassement, etc.) ;
- ❖ un régulateur charge-décharge : il permet, en outre, d'éviter les décharges profondes en coupant l'alimentation de tous des appareils électrique ; les régulateurs charge-décharge sont bien adaptés aux applications domestiques pour lesquelles le dépassement de consommation par les occupants est fréquent.
- ❖ Pour dimensionner le régulateur, il faut prendre en considération trois éléments principaux :

- ❖ la tension nominale entre les panneaux et les batteries : le régulateur doit pouvoir accepter cette tension (en générale 12 V, 24V ou 48 V_{DC}). Les régulateurs acceptent des plages de tension plus ou moins larges
- ❖ L'intensité maximale de sortie : elle ne concerne que les régulateurs charge-décharge qui doivent accepter le courant maximal fourni simultanément par les récepteurs. Cette intensité maximale doit prendre en compte également les courants transitoires élevés produits lors des démarrages de certains appareils électriques.

À partir de ces données, il est possible de choisir la technologie de régulation à adapter à la puissance du système photovoltaïque et aux types des batteries. Les régulateurs shunt sont plus adaptés aux systèmes photovoltaïques de faible puissance, alors que les régulateurs (série) conviennent aux systèmes plus élevés.

On a comme puissance des appareils de $P_T = 11\,480$ watts

On sait que $P = U \cdot I$

$$I = P / U = 11\,480 / 48 \quad \text{d'où on } I = 239.16 \text{ A}$$

Pour déterminer le type de régulateur on va ajouter 10% au courant donc on a :

$$I_T = 239.16 + 239.16 \cdot 10\%$$

$$I_T = 241,55 \text{ A}$$

On va choisir le régulateur MPPT qui peut supporter le courant de 241,55 A

Dimensionnement de l'onduleur

Pour une installation autonome, l'onduleur est dimensionné en fonction des caractéristiques des modules, des batteries et des récepteurs fonctionnant uniquement en courant alternatif. Les paramètres de dimensionnement sont :

La tension d'entrée (12, 24 ou 48 V) : c'est la tension CC délivrée par le générateur photovoltaïque ou par le système de stockage.

- ❖ La tension de sortie (220 V AC à 50 HZ) : la forme de l'onde est: soit sinusoïdale, soit carrée, soit encore pseudo sinusoïdale selon la nature des appareils que les récepteurs devront faire fonctionner. Le choix de la technologie dépend donc des caractéristiques du ou des récepteurs.
- ❖ La puissance nominale : elle correspond à la puissance que peut délivrer l'onduleur en fonctionnement permanent, c'est-à-dire à la somme de la puissance de toutes les charges électriques susceptible d'être utilisées en même temps. En pratique, elle est définie à partir des valeurs moyennes du profil de consommation, en courant alternatif, majoré de 20 % ;
- ❖ La puissance maximale (50% de la puissance nominale) : c'est à dire surcharge importante provenant du démarrage de certain moteur, surcharge que doit accepter l'onduleur pendant une très courte durée.
- ❖ La consommation à vide ou en attente : elle doit être la plus faible possible (2% à 3% de la puissance nominale). Une consommation trop importante peut avoir des méfaits sur la capacité et la durée des batteries.
- ❖ La puissance d'un onduleur est exprimée en VA, ou volt Ampères. Avant de choisir un onduleur, il

faut faire la somme de la consommation de tous les appareils que l'on va lui connecter.

- ❖ Le problème, c'est qu'en général sur le matériel, informatique, la consommation est exprimée en watts pour convertir rapidement des watts en V.A.
- ❖ On peut utiliser cette formule approximative :
- ❖ Puissances en VA = puissance de watts / 0.66

D'où la puissance en V.A = 11 480 watts / 0.66

On a puissance d'onduleur est 17 394 VA

Branchement des panneaux et batteries sur le régulateur

On branche les panneaux au régulateur et le régulateur à l'onduleur. L'onduleur photovoltaïque se branche directement sur le compteur. L'onduleur achemine alors l'électricité jusqu'à aux prises. Le branchement de panneau solaire en série permet d'additionner les tensions. Pour brancher le panneau solaire en série, on connecte la borne + du panneau solaire à la borne - et inversement. Le branchement de panneau solaire en parallèle permet d'additionner les intensités. Pour brancher le panneau solaire en parallèle, on connecte les bornes + ensemble et les bornes - ensemble. Pour une puissance suffisante, on opte pour un branchement de panneau solaire mixte, en série et en parallèle. Un régulateur, qui protège l'installation. Ce régulateur est parfois incorporé à l'onduleur. Un onduleur photovoltaïque transforme le courant électrique continu en courant alternatif. Pour fixer la puissance nominale de l'onduleur, il faut estimer :

- ❖ La charge maximale probable pendant une durée supérieure à 20mn ou les charges de courte durées ne sont prises en compte
- ❖ La charge maximale instantanée.
- ❖ La puissance nominale doit être la plus faible pour limiter les pertes.
- ❖ La puissance nominale de l'onduleur est fixée suivant deux critères
- ❖ La puissance maximale probable pendant une durée supérieure 20 mm

Dimensionnements d'un système solaire thermiques

Modes de transfert

L'énergie thermique ou chaleur est l'énergie que possède un corps à cause de l'agitation désordonnée de ses molécules. Selon les situations, les transferts de chaleur s'effectuent de diverses manières appelés modes de transfert. Chaque mode de transfert fait intervenir des propriétés données de la matière. Il existe trois mécanismes (ou modes) de transfert de la chaleur :

- ❖ La conduction : Le transfert d'énergie s'effectue par contact-continuité continuité entre les particules de la matière Ex : Barreau métallique chauffé à l'une de ses extrémités par une résistance électrique Modes de transfert
- ❖ La convection : La chaleur est transférée par l'intermédiaire d'un fluide en mouvement (liquide, gaz). Ex : Appareil de chauffage d'air constitué d'une résistance électrique et un ventilateur. L'air véhiculé par le ventilateur est chauffé au passage de la résistance électrique, ce qui lui permet, à son tour, de chauffer l'ambiance Echange thermique par convection entre la résistance électrique et l'air.
- ❖ Le rayonnement: Le transfert de chaleur s'effectue par l'intermédiaire de rayonnements électromagnétiques, tout corps à 0 K émet de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique, qui est : absorbé, réfléchi et absorbé

Remarque: Energie = Travail = Chaleur

Chaleur sensible

$$Q = m \times C \times (T_f - T_i)$$

Q : Quantité de chaleur [J]

M : masse [g]

C : Chaleur spécifique [J/g °C]

T_f : Température finale

T_i : Température initiale [°C]

Quantité de Chaleur

$$Q = m \times C_p \times (T_f - T_i)$$

M = Masse du corps

C_p = Chaleur spécifique (pour l'eau = 4,18KJ/Kg)

T_f = T sortie/désirée T_i = T initiale (de départ)

Définition : le rendement d'un appareil est le rapport de la quantité de chaleur effectivement récupérée à la quantité de chaleur fournie par le combustible..

Pour dimensionner une installation solaire de production d'eau chaude sanitaire (ECS) est d'estimer les besoins en eau chaude solaire, ensuite les autres facteurs tels que le climat, l'orientation et l'inclinaison des capteurs.

Nous allons détailler une méthode de dimensionnement qui prend en compte divers paramètres. Le but étant d'aboutir finalement à une proposition de panneaux **solaire thermiques** la plus efficace et la plus rentable pour notre cas.

Calcul du volume du ballon de stockage :

$$V_{st} = 2 \times V_p \times N_p \times (T_{ec} - T_{ef}) / (T_{st} - T_{ef})$$

Avec :

V_{st}: Volume minimal du ballon de stockage en litre.

2 : Coefficient de sécurité pour garantir la couverture des besoins.

V_p : Consommation journalière par personne en litres.

N_p : Nombre de personnes.

T_{ec}: Température souhaitée de l'eau chaude sanitaire en °C.

T_{ef}: Température de l'eau froide en °C.

T_{st} : Température de stockage de l'eau dans le ballon.

Calcul de l'énergie calorifique journalière nécessaire au chauffage de l'eau :

Pour calculer la quantité d'énergie nécessaire à la production d'eau chaude sanitaire, il faut d'abord connaître le volume d'eau à produire. La quantité réelle d'énergie nécessaire pour produire l'eau chaude sanitaire est calculée comme étant la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer ce volume d'eau de la température de l'eau froide jusqu'à la température demandée cette énergie est donnée par :

$$E_j = V \times C_p \times \rho \times (T_{st} - T_{ef})$$

E_j : Energie calorifique journalière nécessaire.

V : Volume du ballon de stockage.

C_p : Capacité calorifique de l'eau (1.167Wh/kg/°C).

ρ : Masse volumique d'eau (1kg/l).

T_{st} et T_{ef} Sont toujours respectivement les températures de stockage et de l'eau froide.

Calcul de la surface et le nombre de panneaux thermique :

La surface de panneau nécessaire à notre installation, se définit comme étant le rapport entre l'énergie utile au chauffage de l'eau à la température suitée °C (notée E_j) et le gisement solaire.

Calcul de la surface totale des panneaux thermique:

$$S_{tot} = E_j / G_j$$

G_j : Le gisement solaire

Calcul du nombre de panneaux thermique:

$$N_{p.th} = S_{tot} / S_u$$

S_u : Surface unitaire d'un panneau solaire thermique.

Application numérique de la méthode de dimensionnement (cas d'étude) :

Calcul du volume du ballon de stockage :

$$V_{st} = 2 \times V_p \times N_p \times (T_{ec} - T_{ef}) / (T_{st} - T_{ef})$$

V_p : Consommation journalière par personne en litres.

$$V_{st} = 2 \times 45 \times 4 \times (46 - 8) / (56 - 8) = 285 \text{ L}$$

On recommandera dans ce cas un ballon de 300 litres de capacité.

Calcul de l'énergie calorifique journalière nécessaire au chauffage de l'eau :

$$E_j = V \times C_p \times \rho \times (T_{st} - T_{ef})$$

$$E_j = 300 \times 1.16 \times (56 - 8)$$

$$E_j = 16.704 \text{ kwh/jour}$$

Calcul de la surface et le nombre de panneaux thermique :

$$S_{tot} = E_j / G_j$$

G_j : Le gisement solaire est 5 kwh / jour

$$S_{tot} = 16704 / 5000 = 3.341 \text{ m}^2$$

Calcul du nombre de panneaux solaires thermiques :

$$N_{p.th} = S_{tot} / S_u$$

S_u : Surface unitaire d'un panneau solaire thermique.

On prend capteur k720-TS-D15 d'une surface de 1.95m^2

$N_{p.th} = 2.1344 / 1.95 = 1.09$, on prend nombre de panneaux, $N_{p.th} = 2$ panneaux solaires thermiques.

Exemple d'équipement d'installation :

En général une installation solaire thermique se compose de différentes parties :

- Le récepteur d'énergie (les capteurs solaires de type k720-TS-D15)
- Ballon 300 EM .
- Certaines pièces indispensables qui composent une installation solaire : connexion hydraulique ballon/capteur, groupe de sécurité.

Exercice N°1 **Calcul de la chaleur sensible**

On veut remplir une baignoire avec 100 litres d'eau à 40 C . Sachant que l'eau à la source est à température de 10 C,

- Calculer la quantité de chaleur théorique C,
- Calculer la quantité de chaleur théorique nécessaire. Chaleur spécifique de l'eau : 4.18 Kj/kg C Chaleur sensible

Réponse

On cherche la quantité de chaleur théorique nécessaire

$$Q = m C (T_f - T_i) \quad Q = 100 \times 4,18 \times (40 - 10) \quad Q = 12540 \text{ Kj}$$

Exercice N°2

On a besoin pour sa douche quotidienne de 50 litres d'eau à 39 C. A la source, l'eau est à température de 14 C. A la source, l'eau est à une température de 14 c.

Calculer la quantité d'énergie théorique qu'on dépense chaque jour.

Exprimer le résultat en KJ, kWh, et kcal

Réponse

On cherche Q :

$$Q = m.Cp. (Tf-Ti) \quad Q$$

$$= 50 \times 4,18 \times (39 - 14) \quad Q = 50 \times 4,18 \times (39-14) \quad Q$$

$$= 5225 \text{ kJ En kWh: } 5225 \times 3600$$

$$= 1,45 \text{ kWh : } 5225 \times 3600 = 1,45 \text{ kWh En Kcal : } 5225 \times 0,239$$

$$= 1248 \text{ Kcal}$$

Chapitre 3 : Intégration de l'énergie éolienne au réseau électrique

3.1 Introduction

Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité, l'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette. Elle est l'une des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'application et de création d'emplois et de richesses. Son potentiel est énorme, Le parc éolien mondial est estimé à une puissance installée de près de 651 GW à fin 2019. (Près de 60,4 GW de capacités éoliennes ont été installées dans le monde dont 6,1 GW offshore), il a compté pour environ 5,3% de la production mondiale d'électricité en 2019. [53]

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement.

L'utilisation de cette énergie est soit directe (mouture, pompage) soit indirecte (production d'électricité via un générateur). Deux applications sont possibles: la production d'électricité et le pompage éolien.

Parmi toutes les énergies renouvelables l'éolien est l'une des plus prometteuses, l'évolution technologique (augmentation de la taille et de la puissance des installations, optimisation des matériaux)alliée à la baisse continue des coûts de production (effet de série) font actuellement de l'éolien l'une des énergies renouvelables les plus compétitives [54].

3.2 La transformation de l'énergie éolienne

La transformation de l'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire : les rayons solaires absorbés dans l'atmosphère entraînent des différences de température et de pression. Le procédé de transformation de l'énergie cinétique en énergie mécanique ou électrique produites dépend de trois paramètres: la forme et la longueur des pales, la vitesse du vent et enfin la température qui influe sur la densité de l'air. De ce fait les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins:

- **La transformation en énergie mécanique:** le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (voilier ou charà voile), pour pomper de l'eau (éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin ;
- **la production d'énergie électrique :** l'éolienne est couplée à un générateur électrique pour créer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne au sein d'un système « Autonome » avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène), un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie. Une éolienne produisant de l'électricité est parfois qualifiée d'aérogénérateur.

3.3 Décrire une éolienne

L'éolienne retient principalement quatre sous-ensembles:

- **Le rotor**, partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de pales (en général 3) en matériau composite qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent. Reliées par un moyeu, ces dernières peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute ;
- **La nacelle**, structure soutenue par le mât abritant les différents éléments mécaniques. On distingue les éoliennes à entraînement direct de celles équipées de train d'engrenages⁽²⁾ (multiplicateur/réducteur) selon le type d'alternateur utilisé. Les alternateurs classiques requièrent une adaptation de la vitesse de rotation par rapport au mouvement initial du rotor.
- **La tour**, composée du mât, du système de commande électrique et du transformateur. Généralement de forme conique, le mât supporte la nacelle. Il mesure entre 50 et 130 m de haut et a un diamètre à son pied compris entre 4 et 7 m. Une ouverture en bas du mât permet d'accéder aux différents équipements de l'éolienne parmi lesquels le transformateur⁽³⁾ qui permet d'augmenter la tension de l'électricité produite afin de l'injecter sur le réseau ;
- **la base**, souvent circulaire et en béton armé dans le cas des éoliennes terrestres, qui permet de maintenir la structure globale.

On qualifie de turbine l'ensemble constitué du rotor et du train d'engrenages. Par extension, ce terme est souvent employé pour désigner l'éolienne dans sa globalité, comme en anglais (*wind turbine*).

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui n'émet pas directement de gaz à effet de serre en phase d'exploitation.

3.4 *Fonctionnement d'une éolienne*

Une éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Elle se compose des éléments suivants :

- Le rotor permet l'articulation de trois pales. Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu.
- La nacelle renferme:
 - Un générateur électrique entraîné par le rotor par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse,
 - Un vérin de réglage pour modifier la position des pales pour la prise au vent,
 - Un moteur hydraulique permettant à la nacelle d'être toujours orienté face au vent,
 - Un boîtier de contrôle centralisant les informations provenant d'un anémomètre et d'une girouette. [54].
 - Un mât permet l'accès à la nacelle par une porte et une échelle interne. Un ordinateur, utilisé pour le pilotage et la transmission des données à la nacelle, ainsi que les appareillages électriques (modulateur, commande, multiplicateur, générateur, etc.) sont logés dans la base du mât.

3.5 *Les modes d'exploitation de l'énergie éolienne*

- Les éoliennes terrestres dites « on shore » sont installées à terre.
- Les éoliennes dites « off shore » sont installées en mer.

3.6 On distingue par ailleurs deux typologies d'installations :

- Industrielles: les grands parcs éoliens raccordés au réseau électrique, (figure 3.1 a) ;
- domestiques: des petites éoliennes installées chez les particuliers, (figure 3.1 b).



Figure 3.1 a) Installations industrielles raccordée aux réseaux électriques

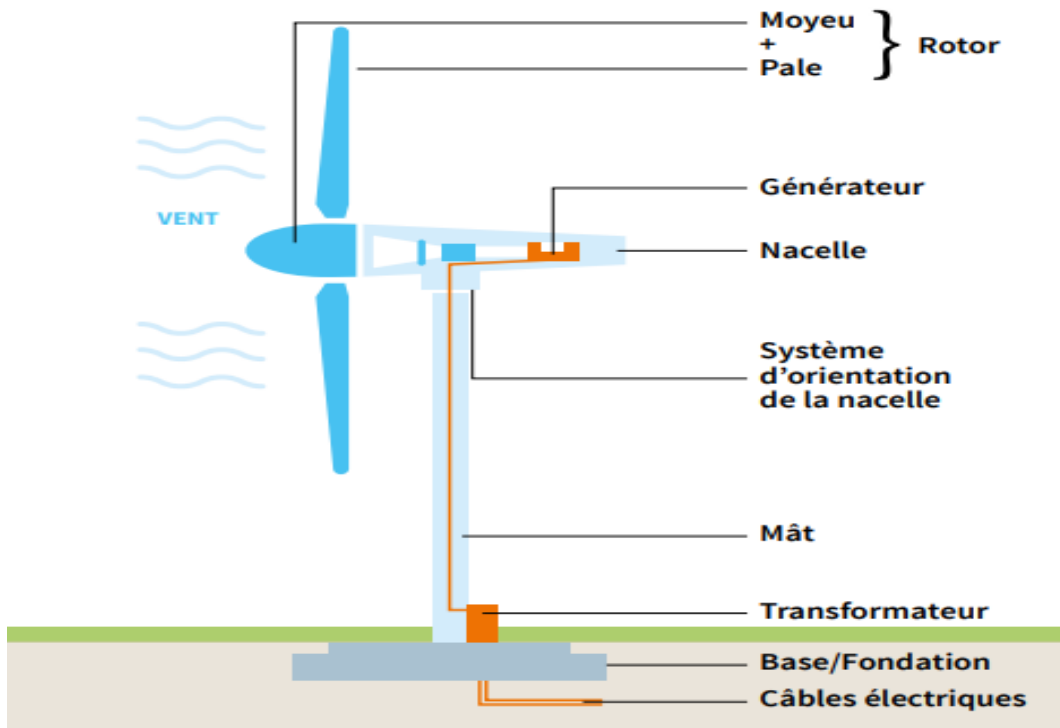


Figure 3.1 b) Installations domestiques installées chez les particuliers

L'éolienne démarre lorsque le vent atteint la vitesse de 5 m/s. (La plupart des éoliennes démarrent lorsque la vitesse du vent atteint environ 3 m/s et s'arrêtent lorsque cette vitesse atteint 25 m/s).

A l'arrêt, les pales font un angle de 90° avec le plan de rotation, pour n'avoir aucune prise au vent. Cette position est appelée position en « drapeau ». Elle est adoptée lorsque la vitesse du vent, mesurée par l'anémomètre, est insuffisante (25m/s).

L'énergie récupérable correspond à l'énergie cinétique qu'il est possible d'extraire. Elle est proportionnelle à la surface balayée par le rotor et au cube de la vitesse du vent.

La puissance maximum récupérable (P) est donnée par la loi de Betz:

$$P = 0,37. S. V^3 \quad (3.1)$$

Où : 0,37 est la constante de l'air à pression atmosphérique standard (1013 hPa),

S: la surface balayée et

V: la vitesse du vent.

En pratique, une éolienne produit quatre fois plus d'énergie si la pale est deux fois plus grande et huit fois plus d'énergie si la vitesse du vent double. La densité de l'air entre également en jeu : une éolienne produit 3% de plus d'électricité si, pour une même vitesse de vent, l'air est plus froid de 10°C. La puissance éolienne dépend principalement de l'intensité du vent et de ses variations. L'énergie éolienne est donc une énergie intermittente et aléatoire. Le vent est plus fort et plus constant en mer. Les éoliennes qui y sont installées sont également plus puissantes.

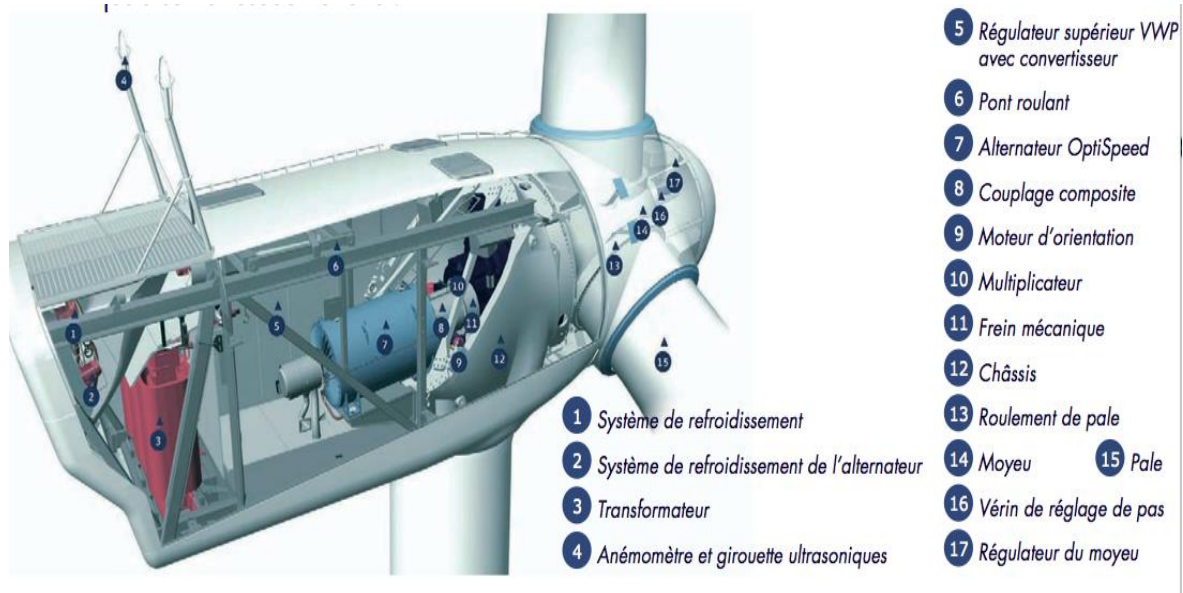


Figure 3.2 Composition et La transformation de l'énergie éolienne

L'ensemble pale/rotor est orienté face au vent par un système de gouvernail. Généralement, les éoliennes sont paramétrées afin d'exploiter au mieux les vents de puissance intermédiaire.

Les pales sont placées progressivement en position travail pour obtenir une vitesse de rotation constante du générateur de 1500 tr/min. Celui-ci sera alors couplé au réseau pour produire une énergie électrique à une fréquence régulière de 50 Hz. Deux réglages sont fréquemment opérés pour tenir compte des variations du vent (sens et vitesse) voir la figure 3.1 du schéma explicatif [54]:

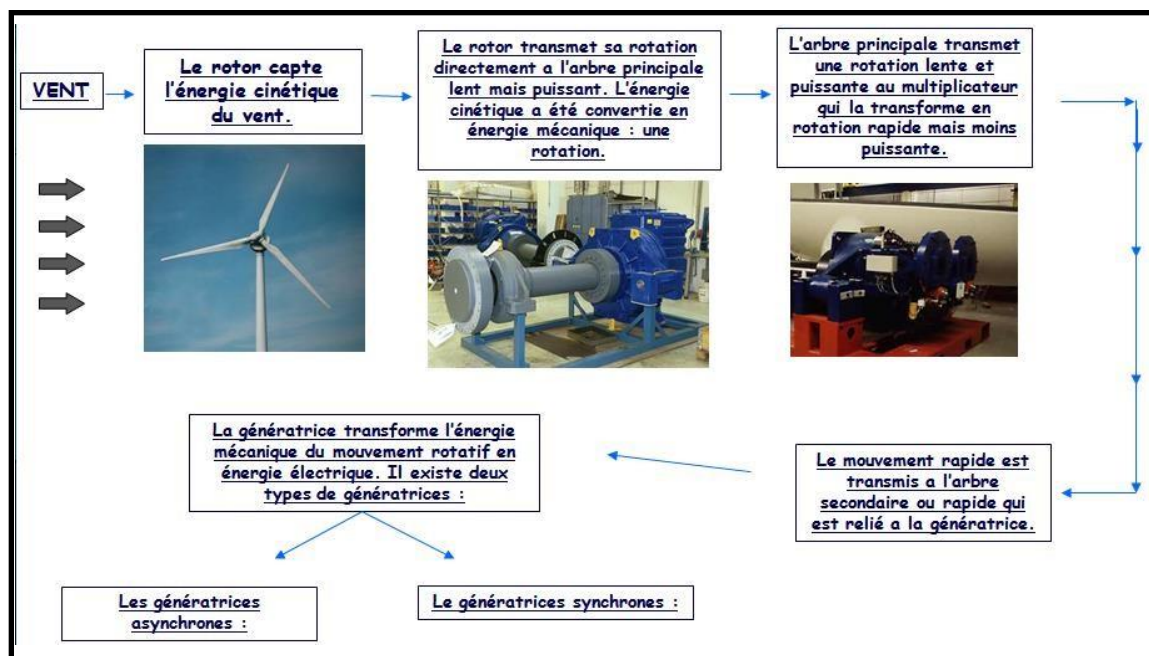


Figure 3.2 Schéma Description et explicatif du fonctionnement d'une éolienne [54].

L'orientation de la nacelle pour la garder face au vent dominant (information donnée par une girouette). La modification de la position des pales afin d'assurer une vitesse de rotation constante du générateur. (Information donnée par une génératrice tachymétrie).

Vitesse du vent suffisante (démarrage de la production): 5 m/s. Vitesse du vent où la puissance nominale (400KW) est atteinte: 14 m/s. Vitesse du vent trop importante (arrêt de la production): 25 m/s

L'énergie électrique que va fournir l'éolienne dépend de la puissance du vent qu'elle va récupérer. On modélise le passage du vent, dans le rotor de l'hélice par un tube de courant, avec V , V_1 , V_2 les vitesses du vent avant les pales, aux pales, et après les pales (Voir figure 3.3).

Mais La puissance disponible dépend du facteur de puissance C_p de la machine

$$P_{dispo} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_e^3 \quad \rightarrow \quad \boxed{C_p} \quad \rightarrow \quad P_{elec} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot S \cdot V_e^3$$

Puissance en entrée de l'aérogénérateur
Coefficient de performance (0.4 pour les éoliennes actuelles)
Puissance en sortie de génératrice

(3.2)

L'air est déterminé par sa masse volumique ρ [kg/m^3], la surface balayée par les pales est S [m^2]. La puissance absorbée par le rotor sera [56]:

$$P = S \rho (V_2 - V_1)V_2 \tag{3.3}$$

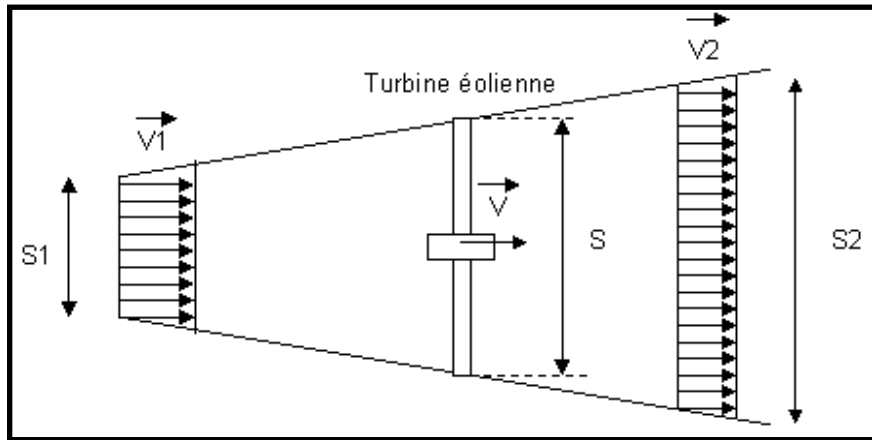


Figure 3.3 Modélise du vent, et l'énergie électrique fournir par l'éolienne [56]

La variation d'énergie cinétique par seconde ΔE_c de la masse d'air

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \rho S V (V_2^2 - V_1^2) \tag{3.4}$$

Le coefficient de puissance maximal $C_{p_{max}}$ pour une éolienne.

La puissance récupérable du vent s'exprime par:

$$P = C_p \left(\frac{1}{2}\right) \rho S V^3 \quad (3.5)$$

On identifie P_{max} :

$$P_{max} = \rho S V_1^3 \left(\frac{8}{27}\right) = \frac{16}{27} \cdot \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (3.6)$$

$$\text{On trouve alors : } C_{p,max} = \frac{16}{27} \approx 0,59 \quad (3.7)$$

- Au maximum, 59 % de la puissance reçue sera disponible
- il faut remarquer qu'il y a égalité entre P et ΔE_c .
- La recherche d'un maximum passe par l'annulation de la dérivée.

3.5. Les principaux Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

3.5.1. Les principaux Avantages de l'énergie éolienne:

- ✓ **Inépuisable** : un des premiers avantages de l'énergie éolienne est que c'est une énergie renouvelable car le vent est une ressource inépuisable. Ça veut dire qu'il est toujours possible de compter sur la source originale qui produit l'énergie, ce qui garantit son utilisation.
- ✓ **Propre** : il s'agit d'une énergie totalement propre. En fait, c'est peut-être son principal avantage par rapport aux autres types d'énergie. L'énergie éolienne ne produit aucun type de déchets, ce qui signifie que son utilisation ne contribue pas à la destruction des écosystèmes ni au réchauffement de la planète.
- ✓ **Sûre** : un autre des avantages de l'énergie éolienne est que c'est une des énergies les plus sûres qui existent. Comme elle ne produit pas de déchets polluants et qu'elle n'est pas dangereuse en cas d'accident, c'est une énergie complètement sûre.
- ✓ **C'est une énergie autochtone** : elle permet de favoriser l'indépendance énergétique car tous les pays au monde ont du vent.
- ✓ **Facilité d'installation et de désinstallation des parcs éoliens** : la technologie nécessaire à la mise en œuvre d'un parc éolien permet de les monter facilement et efficacement. En fait, si aujourd'hui il faut plus de temps que souhaité pour les construire, c'est généralement dû à des problèmes bureaucratiques et administratifs.
- ✓ **Faible impact sur le sol** : les parcs éoliens ont un très faible impact sur le sol et l'érosion du sol. Cela est dû à la fois à l'absence de déchets polluants et au fait qu'elles occupent peu d'espace par rapport aux autres types d'installations énergétiques.
- ✓ **Énergie respectueuse des aquifères** : en raison de l'absence de tout type de déchets polluants, elles n'altèrent pas la composition de l'eau dans la zone où elles sont installées.
- ✓ **C'est une énergie très bon marché** : de fait, elle coûte parfois autant que du charbon ou du nucléaire. Quand une éolienne ne fonctionne plus, elle est démontée sans laisser d'impact considérable sur l'environnement car elle n'occupe que très peu d'espace.
- ✓ **Créé des emplois** : les endroits où sont construits les parcs éoliens expérimentent une baisse considérable du chômage.
- ✓ **Elle est compatible avec d'autres activités** : l'énergie éolienne est complètement compatible avec d'autres activités comme l'agriculture et l'élevage, ce qui fait qu'elle n'a pas d'impact négatif sur l'économie locale. Par conséquent, les endroits où sont installées des éoliennes peuvent continuer le développement de leur activité traditionnelle tout en augmentant leur activité grâce à l'énergie éolienne.

3.5.2. Les principaux inconvénients de l'énergie éolienne

- ✓ **Un des premiers inconvénients de l'énergie éolienne** est qu'il n'y a pas toujours du vent, ce qui fait qu'elle a besoin d'un soutien d'un autre type d'énergie pour la substituer.
- ✓ **Difficulté dans la planification** à cause de l'imprévisibilité du vent. Grâce aux modèles météorologiques, cet aspect s'est amélioré, mais l'intermittence de l'énergie éolienne est son inconvénient principal.
- ✓ **Un autre inconvénient** de l'énergie éolienne est qu'il s'agit d'une énergie qui ne peut pas être stockée, mais qui doit être consommée dès qu'elle est produite. Cela signifie qu'elle ne peut pas offrir une alternative complète à l'utilisation d'autres types d'énergie.
- ✓ **Les éoliennes fonctionnent** juste avec des rafales de vent comprise entre 10 et 40 km/h. Si le vent souffle moins, la production énergétique ne vaut pas le coup et s'il souffle plus fort, il risque de casser la structure de l'éolienne.
- ✓ **Comme les parcs éoliens** sont généralement installés loin des points de consommation, ils requièrent une infrastructure de transport énergétique, ce qui entraîne une perte d'énergie et la nécessité d'installer une infrastructure de transport.
- ✓ **La densité énergétique du vent est faible**, ce qui exige que la quantité d'éoliennes soit élevée pour qu'elles soient utiles. En d'autres mots, bien qu'il s'agisse d'une énergie bon marché et facile à obtenir, il faut que beaucoup d'éoliennes fonctionnent en même temps pour que le parc soit rentable.
- ✓ **La construction de parcs éoliens** a un impact esthétique sur le paysage qui, parfois, génère des frustrations chez les populations locales.
- ✓ **Les éoliennes font du bruit**. Néanmoins, il est certain que cet inconvénient a été réduit au minimum grâce aux progrès en ingénierie qui ont été faits et appliqués au niveau des nouvelles turbines.
- ✓ **Le fonctionnement des pales** représentent un danger pour la faune aviaire de la région.

3.6. Exigences applicables en matière de connexion au réseau électrique

On assiste à une évolution des exigences techniques spécifiques énoncées par les codes régissant l'accès aux réseaux électriques (Code des Réseaux) en termes de tolérance, de contrôle de la puissance active et réactive, et de dispositifs de protection et de qualité de l'énergie, du fait d'une plus grande pénétration éolienne, d'une capacité accrue au contrôle actif et du nécessaire support aux réseaux électriques. Il est aussi possible de créer un marché pour les services de contrôle, plutôt que de s'en tenir à des règles rigides. En principe, cela se justifierait économiquement, étant donné qu'un contrat serait signé avec le producteur le plus apte à fournir ces prestations. Au fur et à mesure que la pénétration éolienne augmente, il y a un besoin accru d'harmonisation du Code des Réseaux, qui nécessiterait un effort concerté de la part de l'industrie éolienne et des opérateurs de systèmes [57].

3.7. Contribution de l'énergie éolienne à l'équilibre des systèmes

À de faibles niveaux de pénétration de l'énergie éolienne, le crédit de capacité relatif de l'énergie éolienne (c'est-à-dire la fraction statistiquement garantie de la capacité installée totale) est proche de la production moyenne (facteur de charge) pendant la période considérée, qui est habituellement le moment où la demande est maximale. Pour les pays d'Europe du Nord, cette proportion est habituellement de 25 à 30 sur

terre et peut atteindre 50 en offshore. L'accroissement des niveaux de pénétration de l'énergie éolienne dans le système provoque une réduction de son crédit de capacité relatif. Néanmoins, comme le montre le chapitre II.6, cela ne veut pas dire qu'une proportion moindre de capacité de production classique peut être remplacée, mais plutôt que l'adjonction d'une nouvelle installation éolienne à un système où les taux de pénétration de l'énergie éolienne sont élevés aura un effet de substitution moindre que la première installation dans le système [57].

3.8. Conception du marché

Dans l'intérêt de l'intégration économique de l'énergie éolienne, il est nécessaire de modifier les règles du marché européen, afin de permettre aux marchés de fonctionner plus rapidement et selon des horaires de « gate closure » plus brefs (typiquement trois heures, ou moins). Cela permettra de minimiser l'incertitude des prévisions et les besoins de compensation de dernière minute. Des avantages économiques supplémentaires sont attendus de l'expansion géographique du marché et des zones de coordination, ainsi que l'établissement d'une réglementation appropriée du marché dans le cadre des échanges énergétiques transfrontaliers. [57].

3.9. Economie de l'intégration de l'énergie éolienne

L'intégration de volumes significatifs d'énergie éolienne dans le système électrique a une série d'impacts économiques à la fois positifs et négatifs. Deux facteurs principaux déterminent les coûts d'intégration de l'énergie éolienne: les besoins en équilibrage et l'infrastructure des réseaux. Le coût d'équilibrage additionnel d'un système électrique est lié à la nature intrinsèquement variable de l'énergie éolienne, qui implique des modifications permettant aux autres producteurs de gérer les écarts imprévus entre l'offre et la demande. Comme l'indiquent certaines études nationales, ces coûts ne représentent qu'une faible fraction des coûts de production de l'énergie éolienne et des coûts totaux d'équilibrage du système de génération d'électricité. [57].

3.10. Système éolien du vent vers le réseau électrique

3.10.1. Énergie fournie par le vent

Dans Figure 3.6: on présente l'Éolienne à vitesse variable connectée au réseau. L'Énergie cinétique du vent sera comme suite:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2$$

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

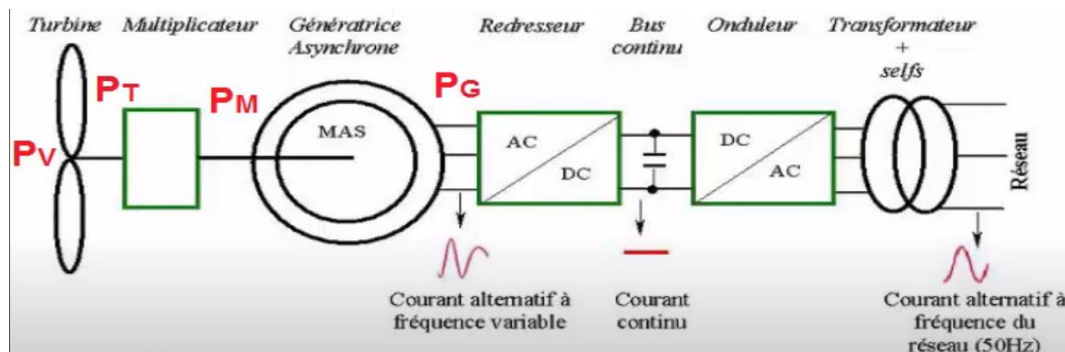


Figure 3.4: Éolienne à vitesse variable connectée au réseau

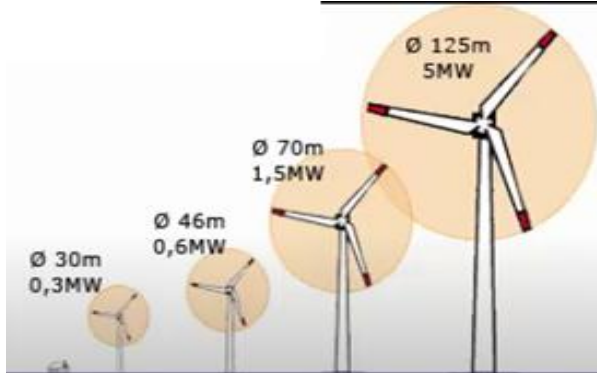


Figure 3.5 : Relation entre le diamètre du rotor des éolienne et leur puissance

3.10.2. Énergie fournie par la turbine

La puissance maximale récupérable sera comme suite:

$$P_{max} = \frac{16}{27} P_{cinétique} = \frac{8}{27} \rho S v^3 \text{ et } C_p = \frac{16}{27} \approx 0,59 \text{ \% Coefficient (Limite) de Betz}$$

3.10.3. Énergie fournie par le multiplicateur (voir figure 3.6)

$$P_T = C_p a \frac{1}{2} \rho S V^3$$

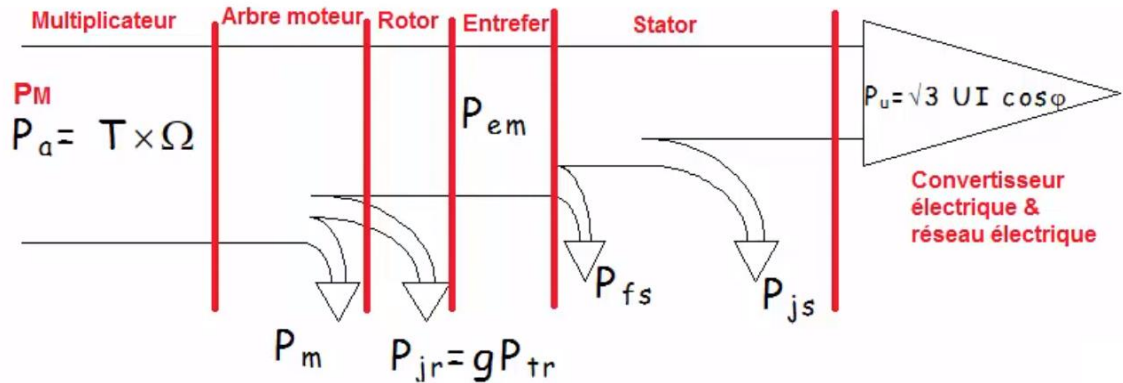
$$P_M = \eta P_T$$



Figure 3.6: Le multiplicateur

3.10.4. Énergie fournie par le générateur

Bilan énergétique par un générateur



3.10.5. Énergie fournie par le convertisseur

D'après la courbe de la figure 3.7, si la vitesse du vent est inférieure de 5 m/s le système éolienne ne démarre pas, si elle dépasse 25m/s le système s'arrêtera



Figure 3.7: Énergie fournie par le convertisseur en fonction de la vitesse

3.11. Estimation de la production d'une éolienne

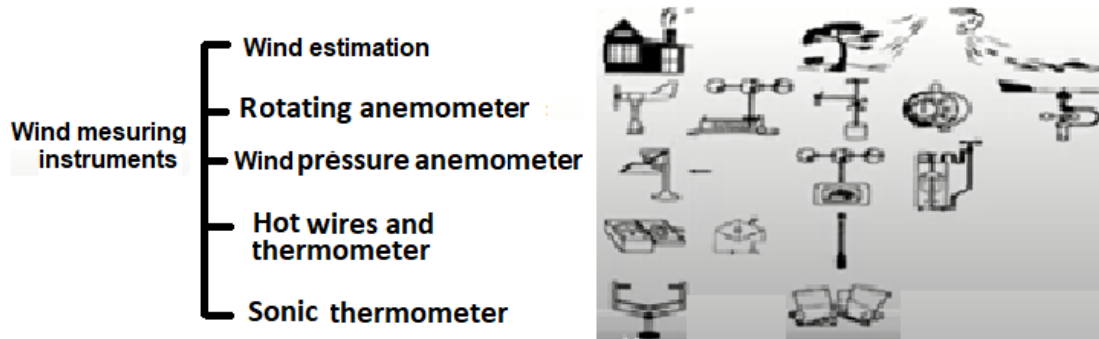
- ❖ La notion de potentiel éolien désigne la quantité théorique d'énergie éolienne disponible sur un territoire (terrestre ou marin) donné. Il est lié à la force et surtout à la régularité des vents qui ne doivent être ni trop fort ni trop faibles.
- ❖ Afin d'estimer le potentiel de production annuelle d'une éolienne dans un site donné, quatre principales étapes sont nécessaires

3.11.1. Etape.1: Mesure de la vitesse du vent pour une durée d'au moins 12 mois

Pour mener la campagne de mesure. On dispose de plusieurs types d'outils:

- Les mâts de mesure équipés de girouettes d'anémomètres, de thermomètre et/ou de baromètre et/ou d'hygromètre, etc.:
- Les sodars, qui sont des radars à effet Doppler sur les longueurs d'ondes sonores ;

- Les lidars, qui sont des radars à effet Doppler sur la longueur d'onde de la lumière (lazer).
- Les méthodes de modélisation numérique (voir figures II-6)

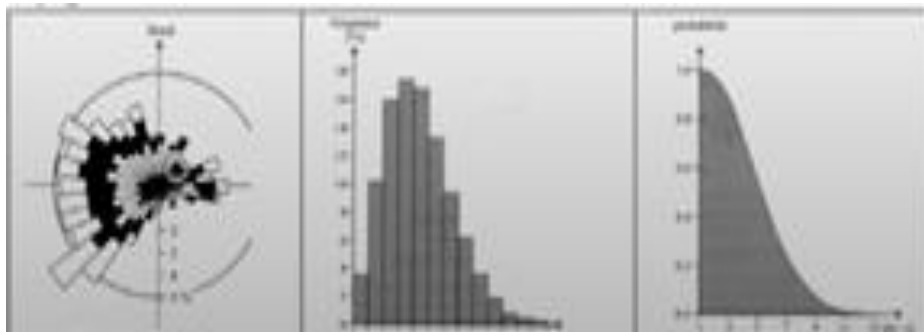


Figures II-6: Méthode de modélisation numérique

3.11.2. Etape 2 : Analyse des caractéristiques du vent

Pour caractériser le vent, il s'agit de connaître:

- Son profil directionnel, c.-à-d. les tendances probabilistes de la direction du vent (rose du vent)
- Son profil de vitesse, c.-à-d. les tendances probabilistes de la vitesse ainsi que sa répartition, la vitesse la plus fréquente, les vitesses extrêmes et les vitesses de rafale etc.
- Ses variations annuelles mensuelles et journalières
- Son profil énergétique, qui dépend de tous les points décrits ci-dessus, de la hauteur par rapport au sol du relief environnant et des autres données climatiques (température, pression, atmosphérique, hygrométrie).



Analyse de la répartition du vent du site

3.11.3. Etape 3 : Modélisation de la densité de probabilité d'occurrence des vitesses de vent

IL est d'usage d'exprimer la distribution des vitesses de vent à l'aide de la loi de Weibull:

$$f(V) = \left(\frac{k}{V}\right) \left(\frac{V}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{A}\right)^k}$$

Avec: $f(v)$: La fréquence d'occurrence (pourcentage du temps d'analyse rapporté à l'année) de la vitesse v : vitesse moyennée sur 10 minutes

A: Facteur d'échelle (proche de la vitesse moyenne annuelle du vent)

k: Paramétré de répartition représentatif de la turbulence de site, $k=2 \rightarrow$ Courbe de Payleigh



Courbe de Payleigh

3.11.4. Etape 4 Dédire le potentiel énergétique:

Pour déterminer l'énergie E que peut capturer la turbine pendant une période T , on peut simplement multiplier la puissance de l'aérogénérateur donnée par le constructeur $P(V)$ par $f(V) \times T$:

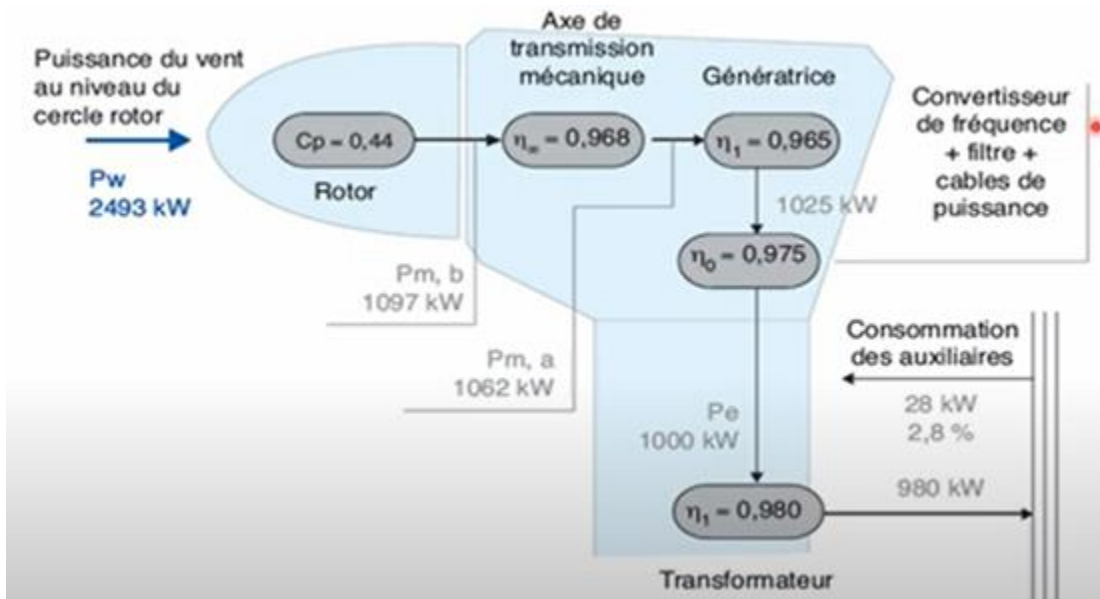
$$E = T \int_{V_i}^{V_o} P(V) \times f(V) dV$$

Avec V_i est la vitesse de démarrage de l'éolienne ($\sim 4\text{m/s}$) et V_o est la vitesse maximale du vent autorisée ($\sim 25\text{m/s}$).

En pratique $T = 8760\text{h}$ pour une année et l'intégrale est résolue numériquement.

Ordres de

grandeur des rendements des systèmes internes d'une éolienne



Réseau électrique

Conclusion

L'éolien est une énergie en forte augmentation, mais elle ne pourra pas fournir à elle seule la totalité de la production, le vent étant une ressource trop aléatoire. A moins de parvenir à stocker l'énergie de manière efficace en grande quantité, l'utilisation des éoliennes ne peut s'envisager seule.

On pourrait éventuellement coupler cette énergie avec celle issue du soleil, afin de produire de l'électricité grâce aux éoliennes lorsqu'il y a du vent et grâce aux panneaux solaires lorsque le soleil brille. En général, le vent souffle quand il n'y a pas de soleil et inversement. Il est aisé de trouver un endroit pour produire de l'électricité grâce à ces deux sources, et de se raccorder aux réseaux électriques. On peut aussi envisager des échanges avec d'autres pays, ou encore l'utilisation des centrales hydrauliques et des énergies renouvelables émergentes, comme la biomasse.

*Exemples
des questions de
cours et
d'exercices sur
les systèmes éoliens*

Compréhension:

- ✓ L'énergie éolienne (ou aérogénérateurs) est produite par : Le vent
- ✓ Répond par « vrai » ou « faux » :
- ✓ Le vent nait des différences de pressions atmosphériques autour du globe. Vrai
- ✓ L'énergie éolienne ne permet pas de fabriquer de l'électricité. faux
- ✓ Une éolienne est composée du mât, l'hélice et la nacelle. faux
- ✓ l'énergie éolienne n'émet pas de gaz à effet de serre. Vrai
- ✓ Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes car (la cause) le vent exerce une force et les fait tourner « vrai »
- ✓ Les éoliennes fonctionnent sur le même principe que les moulins. Le vent fait tourner les hélices placées au sommet d'un mât. Les éoliennes sont généralement placées dans des zones dégagées et venteuses. Vrai

Exemple de calcul de l'énergie mécanique récupérée d'un cas concret d'une éolienne

Diamètre du rotor: 77m avec 3 pâles;
 Vitesse de rotation du rotor : 9,6 à 17,3 tr/min
 Puissance maximale : 1500 kW pour un vent de 13 m/s ;
 Vitesse de vent de démarrage: 3m/s
 Poids: 3400 kg (sans la tour) ; Hauteur de la tour : 80m/s

Vitesse du Vent (m/s)	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Puissance P_{recup} (kW)	44.9	133.5	248.9	408.2	612.4	871.9	1132.1	1359.6	1503.8	1528.2
% du temps	9	8	8	7	7	6	6	6	4	4
Temps/an (h)	788	701	701	613	613	525	525	525	350	350
Energie E_{recup} (MW.h)	35.38	93.58	174.48	251.86	375.40	457.75	594.35	713.79	526.33	534.87

PUISSANCE DU VENT

Exercice n° 1

Calculer la densité de puissance théorique qui correspond à un vent de 40km/h.
 Justifier si ce vent est intéressant pour être exploité par un aérogénérateur.

Exercice n° 2

Calculer la puissance par unité de surface récupérable par un aérogénérateur de rendement $C_p = 0.4$ quand le vent souffle à 36Km/h, avec une densité de l'air de $1,2 \text{ Kg/m}^3$.

Répéter le même calcul pour 20 m/s.

Exercice n° 3

A quelle vitesse doit souffler le vent pour obtenir une puissance $P_{théorique}$ de 2000 W/m^2 , avec une densité de l'air: $\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$

Exercice n° 4 Longueur d'une pale

Nous voulons dimensionner les pales d'une éolienne à vitesse fixe pour obtenir une puissance mécanique de 650 kW pour une vitesse de vent de 13 m/s.

On considère un coefficient de puissance C_p égal à 0,2. Quel sera la longueur de notre pale ou le rayon de la surface balayée par la turbine ?

On utilise la formule suivante:

$$S = \frac{2.P}{C_p V^3 \rho}$$

Exercice n° 5: La puissance l'éolienne

Une éolienne a les caractéristiques suivantes:

- Diamètre de rotor: 100m avec 3 pales;
- Coefficient d'efficacité $C_p = 0,44$

1. Calculer la puissance captée par l'éolienne pour une vitesse de vent de 7 m/s puis pour une vitesse de vent de 10 m/s.

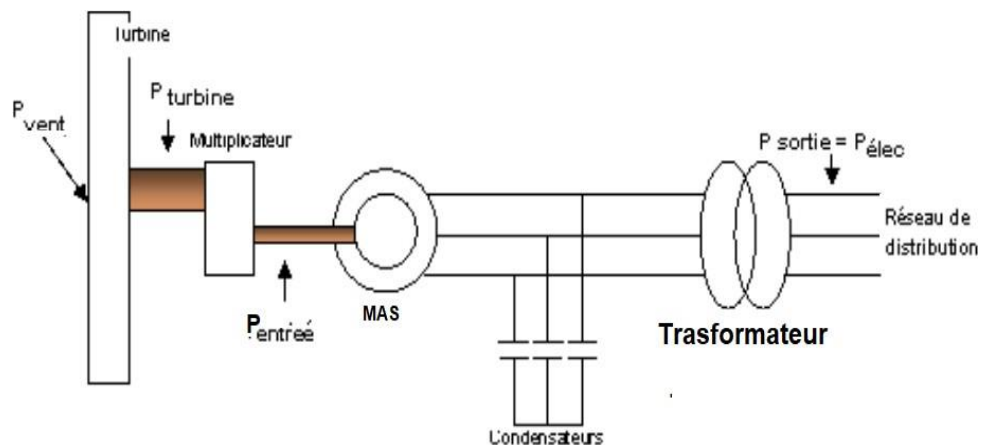
La masse volumique de l'air $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$;

Diamètre de rotor : 100 m avec 3 pales, Coefficient d'efficacité $C_p = 0.44$

Quels paramètres faut-il prendre en compte lors du choix et de l'installation d'une éolienne ?

Exercice n° 6 Etude d'une génératrice asynchrone d'éolienne

L'éolienne sert à transformer l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. On propose d'étudier la génératrice asynchrone à cage d'une éolienne installée au sein d'une ferme éolienne de P_{totale} de 7,5 MW. Les éoliennes fonctionnent à vitesse fixe, la génératrice est reliée au réseau. On va déterminer la puissance, la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice, et le schéma équivalent de la génératrice. Les éoliennes comportent des multiplicateurs. Le schéma est le suivant :



Soient les données suivantes :

$V = 10$ m/s, la vitesse du vent nominale supposée constante

$N = 35$ tr/min, la vitesse nominale de la turbine éolienne

La masse volumique de l'air $\rho = 1,25$ kg/m³

$C_p = 0,3$, le coefficient aérodynamique

$R = 21,7$ m le rayon des pales

Calculez la puissance électrique en sortie de la génératrice P_{elec} et la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice sachant que le multiplicateur utilisé a un rapport de 46,48 et un rendement de 96% et que les éoliennes tournent à 32,5 tr/min. Les pertes dues à la génératrice sont supposées négligeables.[63]

Exercice 7

Calculer la densité de puissance théorique qui correspond à un vent de 60km/h. Justifier si ce vent est intéressant pour être exploité par un aérogénérateur.

Exercice 8

Calculer la puissance par unité de surface récupérable par un aérogénérateur de rendement $C_p = 0.4$ quand le vent souffle à 36Km/h , avec une densité de l'air de 1,2 Kg/m³ . Répéter le même calcul pour 20 m/s.

Exercice 9

A quelle vitesse doit souffler le vent pour obtenir une puissance $P_{théorique}$ de 2000 W/m², avec une densité de l'air: $\rho = 1,293$ kg/m³

Corrigé de l'exercice n° 1

La formule théorique qui nous donne la puissance du vent est:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3,$$

où ρ est la densité de l'air qui est d'environ: $\rho = 1,225$ kg/m³,

S est la surface balayée, et v la vitesse du vent

Il faut d'abord passer la vitesse du vent de km/h à m/s pour pouvoir l'introduire dans la formule (de manière à utiliser les unités du système international SI):

$$40 \text{ km/h} = 40 \text{ km/h} \cdot 1000 \text{ m} / 1 \text{ km} \cdot 1 \text{ h} / 3600 \text{ s} = 11,12 \text{ m/s}$$

En introduisant cette valeur, ainsi que la densité de l'air dans la formule, et en la divisant par la surface pour obtenir la densité de puissance nous obtenons:

$$P_{vent}/S = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \text{ kg/m}^3 \cdot (11,12 \text{ m/s})^3 = 842,21 \text{ W/m}^2$$

Remarque: ceci est la puissance théorique.

En pratique, la puissance récupérable par un aérogénérateur sera toujours inférieure et dans tous les cas limitée par le rendement de Betz (16/27), soit ici :

$$842,21 \cdot 16 / 27 = 499 \text{ W/m}^2$$

L'expérience montre que les aérogénérateurs actuels ont habituellement des vitesses de démarrages comprises entre 3

et 4 m/s, et que pour des vitesses de vent de l'ordre 10m/s, ils travaillent dans une zone proche de leur puissance nominale.

Corrigé de l'exercice n° 2

$$V_{\text{vent}} = 36\text{Km/h} \times 1000/1\text{km} \times 1\text{h}/3600\text{s} = 10\text{m/s}$$

$$P_{\text{aérog}}/\text{surface} = 0.4 \times P_{\text{vent}}/\text{surface} \quad P_{\text{aérog}}/\text{surface}$$

$$= 0,4 \times 1/2 \times 1,2 \text{ Kg/m}^3 \times (10\text{m/s})^3 = 240\text{W/m}_2 \quad \text{pour un vent de } 36 \text{ km/h} \quad P_{\text{vent}}/\text{surface} = 0,4 \times 1/2 \times 1,2 \text{ Kg/m}^3 \times (20\text{m/s})^3 = 1920\text{W/m}^2$$

Corrigé de l'exercice n° 3

$$P_{\text{vent}}/S = 2000\text{w/m}^2 = 1/2 \times 1,293 \text{ Kg/m}^3 \times v^3 \quad v = \text{racine cubique } (2000 \times 2 / 1,29^3) = (3093,58)^{1/3} \quad v = 14,57 \text{ m/s}$$

$$\text{Si la vitesse du vent se réduit de } 10\%, \text{ de quel pourcentage se réduit la puissance? } P(\text{vent} \times 0,9) = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot (v \times 0,9)^3 = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot (0,9)^3$$

$$P(\text{vent} \times 0.9) = P(\text{vent}) \cdot 0,729$$

La puissance se réduit de $1 - 0,729 = 27,1 \%$

Corrigé de l'exercice n° 4

Avec les données suivantes

$$P = 650 \cdot 10^3 \text{ W} ;$$

$$V = 13 \text{ m/s} ;$$

$$C_p = 0,2 ;$$

$$\rho = 1,25 \text{ Kg/m}^3$$

$$S = 2.650 \cdot 10^3 / 0,2 \cdot 13^3 \cdot 1,25$$

D'où

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$$

Corrigé de l'exercice n° 6

La puissance du vent à l'entrée de la turbine est :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho S V^3$$

Le vent passe ensuite à travers les pales de la turbine, la puissance récupérée est égale à la puissance du vent, au coefficient C_p près :

$$P_{\text{turbine}} = \frac{1}{2} C_p \rho S V^3$$

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} 0,27 \cdot 1,25 \cdot (\pi \cdot 21,7^2) \cdot 15^3 = 842 \text{ kW}$$

La puissance mécanique récupérable à l'entrée de la génératrice est :

$$P_{entrée} = P_{Turbine} \eta_{multiplicateur} = 842,96 = 808 \text{ kW}$$

Cette puissance est négative, car la machine est en fonctionnement génératrice. Ce qui nous intéresse, c'est la puissance électrique obtenue en sortie de la génératrice. Par hypothèses, les pertes dues à la génératrice étant supposées négligeables :

$$P_{entrée} \approx P_{sortie} \text{ et}$$

$$P_{sortie} = P_{électrique}$$

On en déduit que :

$$P_{électrique} = -808 \text{ kW}$$

On calcule la vitesse de rotation de la génératrice :

$$\Omega_{MAS} = \Omega_{éolienne} \text{ Rapport}$$

$$\Omega_{MAS} = \frac{325,2\pi}{6046,48} = 158,5 \text{ rad/s}$$

Corrigé de l'exercice n° 7

La formule théorique qui nous donne la puissance du vent est:

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3,$$

où ρ est la densité de l'air qui est d'environ: $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, S est la surface balayée, et v la vitesse du vent.

Il faut d'abord passer la vitesse du vent de km/h à m/s pour pouvoir l'introduire dans la formule (de manière à utiliser les unités du système international SI):

$$60 \text{ km/h} = 60 \text{ km/h} \cdot 1000 \text{ m} / 1 \text{ km} \cdot 1 \text{ h} / 3600 \text{ s} = 16.66 \text{ m/s}$$

En introduisant cette valeur, ainsi que la densité de l'air dans la formule, et en la divisant par la surface pour obtenir la densité de puissance nous obtenons:

$$P_{vent}/S = \frac{1}{2} \cdot 1,225 \text{ kg/m}^3 \cdot (16.66 \text{ m/s})^3 = 2832.24 \text{ W/m}^2$$

Attention, ceci est la puissance théorique. En pratique, la puissance récupérable par un aérogénérateur sera toujours inférieure et dans tous les cas limitée par le rendement de Betz (16/27), soit ici :

$$2832.24 \cdot 16 / 27 = 1678.36 \text{ W/m}^2 \text{ En pratique, l'expérience montre que les aérogénérateurs actuels ont}$$

habituellement des vitesses de démarrages comprises entre 3 et 4 m/s, et que pour des vitesses de vent de l'ordre 10m/s, ils travaillent dans une zone proche de leur puissance nominale.

Corrigé de l'exercice n° 8

$$V_{\text{vent}} = 36\text{km/h} \times 1000/1\text{km} \times 1\text{h}/3600\text{s} = 10\text{m/s}$$

$$P_{\text{aérog}}/\text{surface} = 0,4 \times P_{\text{vent}}/\text{surface} \times P_{\text{aérog}}/\text{surface}$$

$$= 0,4 \times 1/2 \times 1,2 \text{ Kg/m}^3 \times (10\text{m/s})^3 = 240\text{W/m}^2 \text{ pour un vent de } 36 \text{ km/h}$$

$$P_{\text{vent}}/\text{surface} = 0,4 \times 1/2 \times 1,2 \text{ Kg/m}^3 \times (20\text{m/s})^3 = 1920\text{W/m}^2$$

Corrigé de l'exercice n°9

$$P_{\text{vent}}/S = 2000\text{w/m}^2 = 1/2 \times 1,293 \text{ Kg/m}^3 \times v^3$$

$$V = \text{racine cubique} (2000 \times 2 / 1,29^3) = (3093,58)^{1/3} \quad v = 14,57 \text{ m/s}$$

Si la vitesse du vent se réduit de 10 %, de quel pourcentage se réduit la puissance ?

$$P (\text{vent} \times 0,9) = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot (v \times 0,9)^3 = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \cdot (0,9)^3$$

$$P (\text{vent} \times 0,9) = P (\text{vent}) \cdot 0,729$$

La puissance se réduit de $1-0,729 = 27,1 \%$

Chapitre 4 Intégration de piles à combustible au réseau électrique

4.1 Introduction

Les énergies renouvelables demandent une adaptation du réseau électrique, d'où les équipes de recherches travaillent depuis de nombreuses années sur une meilleure intégration de énergies renouvelables sur le réseau électrique. Le stockage de l'énergie est l'un des enjeux majeurs. Il permettra d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes. L'énergie est stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins. Inversement, elle sera restituée sur le réseau électrique lorsque les besoins en électricité augmentent. Face à la variation fluctuation de la production des EnR, ce procédé est une réponse pour être constamment à la hauteur de la demande. Le besoin de stockage est une réponse à des considérations d'ordre économique, environnemental, géopolitique et technologique.

Le stockage de l'énergie consiste à préserver une quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure. Par extension, l'expression désigne également le stockage de matière contenant l'énergie. Le stockage de l'énergie est au cœur des enjeux actuels, qu'il s'agisse d'optimiser les ressources énergétiques ou d'en favoriser l'accès. Il permet d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes. L'énergie, stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins, peut être restituée à un moment où la demande s'avère plus importante. Face à l'intermittence ou la fluctuation de production de certaines énergies, par exemple renouvelables, cette opération permet également de répondre à une demande constante.

4.2. La batterie et la pile à combustible (PAC)

La batterie est un dispositif de stockage électrochimique, tandis que la pile à combustible (PAC) est un dispositif de conversion électrochimique. Les électrons qui composent l'électricité refusent d'être stockés dans un réservoir à cause de la charge électrique qui les empêche de se reposer quelques instants. C'est qu'on ne peut pas se contenter de faire comme pour l'essence et le gaz, à les entasser dans des contenants. On doit passer par un intermédiaire. Et cet intermédiaire, c'est le dispositif électrochimique. Son principe repose sur sa capacité à transformer de l'énergie chimique en énergie électrique, et inversement [58].

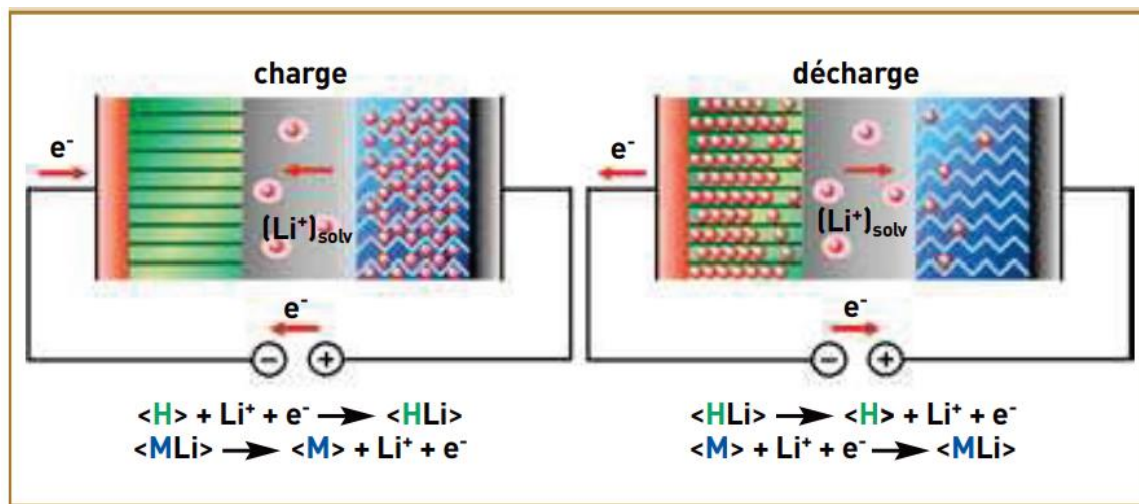


Figure 4.1 Schéma de principe d'une batterie Lithium-ion. Source CEA, 2006.

Qu'elle est la source de cette nuance ? C'est le « combustible », qui est l'hydrogène (plus précisément, le dihydrogène). D'où l'expression « Pile à hydrogène ». Donc l'alimentation d'une PAC se fait par injection continue de combustible à l'anode, généralement de l'hydrogène, et à la cathode, généralement le dioxygène (oxygène dans le langage courant) de l'air ou l'air lui-même. Une énergie électrique continue est alors disponible aux bornes de la pile. La PAC produit de l'électricité en continu. Alors tant qu'elle est alimentée par une source externe de combustible l'hydrogène en l'occurrence), elle génère de l'énergie électrique.

Une PAC permet de convertir directement de l'énergie chimique de combustion (oxydo-réduction) en énergie électrique, en chaleur et en eau. Le cœur d'une PAC est constitué de trois éléments, dont deux électrodes : une anode oxydante (émettrice d'électrons); une cathode réductrice (collectrice d'électrons) séparées par un électrolyte.

L'électrolyte a la propriété de conduire directement d'une électrode à l'autre des molécules ionisées et de faire barrage aux électrons en les obligeant à passer par le circuit extérieur de la pile ou leur énergie électromotrice peut être exploitée [58].

- Une PAC est un dispositif électrochimique qui combine l'hydrogène et l'oxygène de l'air pour générer, grâce à une réaction d'oxydo-réduction, de l'énergie électrique ; l'eau et la chaleur sont les seuls sous-produits.
- Une PAC permet de convertir directement de l'énergie chimique de combustion (oxydo-réduction) en énergie électrique, en chaleur et en eau. Le cœur d'une PAC est constitué de 3 éléments, dont 2 électrodes: une anode oxydante (émettrice d'électrons), une cathode réductrice (collectrice d'électrons) séparées par un électrolyte.
- L'électrolyte a la propriété de conduire directement d'une électrode à l'autre des molécules ionisées et de faire barrage aux électrons en les obligeant à passer par le circuit extérieur de la pile ou leur énergie électromotrice peut être exploitée.
- L'alimentation d'une PAC se fait par injection continue de combustible à l'anode, généralement de l'hydrogène, et à la cathode, généralement le dioxygène (oxygène dans le langage courant) de l'air ou l'air lui-même. Une énergie électrique continue est alors disponible aux bornes de la pile.

Les accumulateurs et les piles sont des systèmes électrochimiques servant à stocker de l'énergie, (voir la

comparaison dans le tableau 4.1, entre une batterie et une PAC). Ceux-ci restituent sous forme d'énergie électrique, exprimée en kWh ; l'énergie chimique générée par des réactions électrochimiques, le terme batterie est utilisé pour caractériser un assemblage de cellules élémentaires) ; Un accumulateur est défini par trois grandeurs [58-60]:

- Sa densité d'énergie massique (ou volumique), correspondant à la quantité d'énergie stockée par unité de masse ou volume d'accumulateur.
- Sa densité de puissance en $\square \text{W/kg} \square$, représente la puissance que peut délivrer l'unité de masse accumulateur.
- Sa cyclabilité, le nombre fois de charge et décharge, caractérise la durée de vie de l'accumulateur.

Tableau 4.1 Comparaisons, entre une PAC et une batterie [60]

	Pile à combustible	Batteries
Carburant	Hydrogène vert	Électricité réseau
Temps de recharge	Minutes	Heures
Autonomie	Grande	Limitée
Poids du système embarqué	Favorable	Pénalisant
Émissions GES (CO ₂ , NO _x , etc.)	Négligeable	Négligeable
Émissions particules fines	Faible	Faible
Bilan environnemental global (fabrication, usage, recyclage, etc.)	Favorable	Favorable

4.3 Les différents constituants d'une PAC

Une PAC est un assemblage de cellules élémentaires, comprenant deux électrodes (l'anode et la cathode) chargées en catalyseur (le plus souvent du platine), séparées par un électrolyte, dont le rôle est de permettre la migration des ions d'une électrode à l'autre, sous l'effet du champ électrique créé, voir Les différents constituants d'une PAC dans la figure 4.2.

Le principe fondamental de la pile à combustible est analogue à celui d'une pile galvanique réaction d'oxydo-réduction. Une réaction électrochimique s'écrit sous la forme :



Le potentiel de la réaction rédox est donné par l'équation de Nernst :

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \left[\frac{\text{produits}}{\text{reactifs}} \right] \quad (4.2)$$

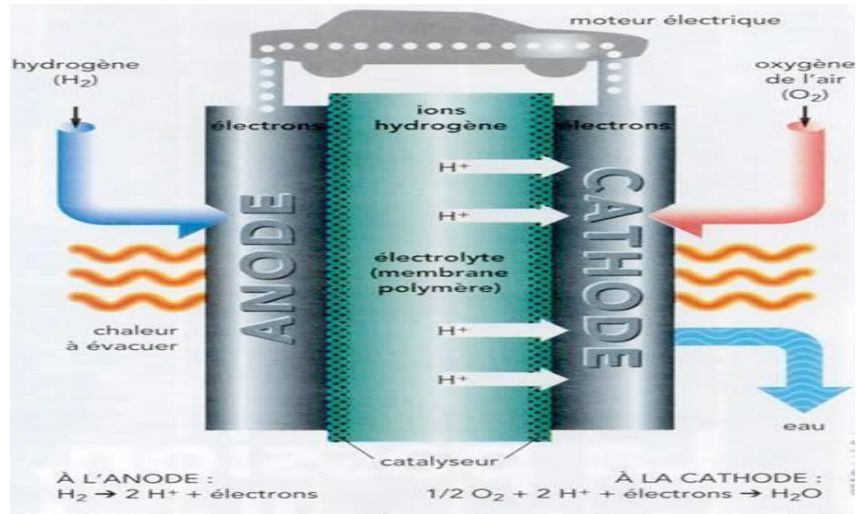


Figure 4.2. Les différents constituants d'une PAC

4.4. Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

En 1839 Sir William Grove construisit la première cellule électrochimique fonctionnant avec de l'hydrogène, comme carburant, mettant en évidence la possibilité de produire du courant électrique par conversion directe de l'énergie chimique du combustible. La pile à combustible ayant la particularité d'utiliser deux gaz (l'hydrogène H_2 et O_2) comme couple électrochimique, les réactions oxydo-réduction qui s'opèrent dans la pile sont donc particulièrement simples. La réaction se produit au sein d'une structure (la cellule électrochimique élémentaire) essentiellement composée de deux électrodes (l'anode et la cathode) séparées par un électrolyte, matériau permettant le passage des ions. Les électrodes mettent en jeu des catalyseurs pour activer d'un côté, la réaction d'oxydation de l'hydrogène, et de l'autre côté, la réaction de réduction de l'oxygène.

Dans le cas d'une pile à électrolyte acide (ou pile à membrane échangeuse de protons), l'hydrogène de l'anode est dissocié en protons (ou ion hydrogène H^+) et en électrons, suivant la réaction d'oxydation :



A la cathode, l'oxygène, les électrons et les protons se combinent pour former de l'eau :



Le principe de la pile à combustible est donc inverse à celui de l'électrolyse de l'eau, (voir figure 4.3).

La tension thermodynamique d'une telle cellule électrochimique est de 1,23 V. Toutefois, en pratique, la pile présente une différence de potentiel de l'ordre de 0,6 V pour des densités de courant de 0,6 à 0,8 A/cm². Le rendement d'une telle cellule est donc d'environ 50 %, l'énergie dissipée étant bien évidemment sous forme de chaleur.

On recense six principaux types de piles à combustibles :

- PEM (membrane échangeuse de protons) est la plus répandue en raison de sa polyvalence, de sa durabilité et de sa large portée d'applications.
- DMFC (pile à combustible au méthanol direct)
- MCFC (pile à combustible à carbonate de molton)
- PAFC (pile à combustible à acide phosphorique)
- SOFC (pile à combustible à oxyde solide)
- AFC (pile à combustible alcaline)

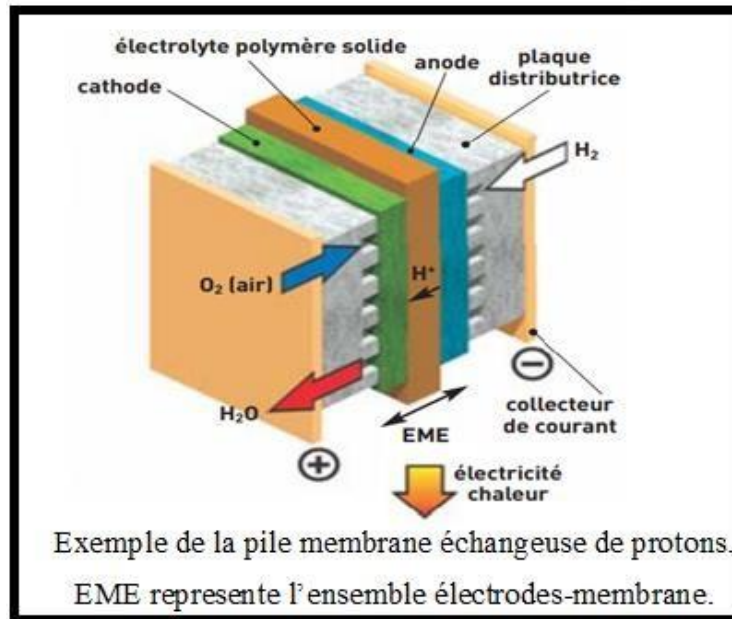


Figure 4.3 Principe de fonctionnement de la pile.

Une seule pile à combustible est constituée d'un électrolyte pris en sandwich entre deux électrodes. L'oxygène de l'air passe sur une électrode et l'hydrogène sur l'autre, produisant de l'électricité, de l'eau et de la chaleur. Les plaques bipolaires de chaque côté de la cellule aident à distribuer les gaz et à collecter le courant électrique [60].

Au niveau de l'anode, la molécule d'hydrogène est séparée en ions et électrons à l'aide de platine (ou d'un catalyseur similaire), créant un courant électrique.

C'est l'oxydation :



Les électrons voyagent à travers un circuit externe, générant la quantité d'énergie requise, tandis que les ions traversent l'électrolyte jusqu'à la cathode où, à l'aide d'un autre catalyseur, ils se joignent aux atomes d'oxygène pour produire de l'eau.

C'est la réduction :



4.5. Sources et modes de stockage pour l'hydrogène

La synthèse, le stockage et l'approvisionnement du dihydrogène sont une partie du défi à relever pour l'utiliser comme vecteur d'énergie. Si sur Terre l'hydrogène est abondant, il est presque toujours combiné à l'oxygène (H₂O, c'est-à-dire l'eau), au soufre (sulfure d'hydrogène, H₂S), au carbone (gaz naturel ou pétrole), etc.

- Le dihydrogène peut être produit en décomposant de l'eau, du méthane ou du bois/gazogène (durant deux ans le projet « Epilog » a testé avec succès des piles à combustible au gaz naturel à Forbach, par voie thermique ou électrochimique (électrolyse de l'eau).

Produire de l'hydrogène nécessite une source d'énergie renouvelable (comme l'hydroélectrique, le solaire, l'éolien), ou de l'électricité nucléaire ou des combustibles fossiles [59].

- Le dihydrogène peut être stocké et transporté :

- Par voie gazeuse : comprimé dans des bouteilles ou des réservoirs sous haute pression (350, 700 bars, voire plus) ;
- Par voie solide : combiné dans des hydrures métalliques ;
- Par voie liquide : liquéfié (filère abandonnée pour la mobilité) ou combiné chimiquement sous forme de méthanol ou de méthane pour être ensuite transformés pour libérer du dihydrogène, potentiellement dans des nanotubes de carbone.

Tableau 4.2. Les principales applications des piles à combustible [59]. *) APU: générateur électrique auxiliaire
Source: L-B-Systemtechnik, *Brennstoffzellen- und Wasserstoff-Technologien als wirtschaftliche Chance für Hamburg*, 2004.

Applications	Portable		Transports		Stationnaire	
	micro	mini	compacte	propulsion	énergie domestique	énergie décentralisée
	Télé-phones portables	Ordinateurs portables, outillage électrique	cycles, APU *)	Véhicules particuliers et industriels, générateurs électriques	Habitat individuel	Industrie, approvisionnement urbain
Puissance	2 – 5 W	25 W – 1 kW	0,1 – 5 kW	30 – 300 kW	0,5 – 50 kW	5 kW – 5 MW
Types de piles	PEMFC, DMFC	PEMFC, DMFC, SOFC (APU)	PEMFC	PEMFC, SOFC	PEMFC, MCFC, SOFC	PEMFC, DMFC
Combustible	Hydrogène, méthanol	Hydrogène, méthanol, diesel, essence	Gaz naturel, gaz liquide, fuel domestique, hydrogène, biomasse	Hydrogène, méthanol	Hydrogène, méthanol, diesel, essence	Gaz naturel, gaz liquide, fuel domestique, hydrogène, biomasse
Commercialisation **)	2004	2003	2006	2010	2005	2004

4.5. Rendements globaux

Le rendement global, qui est le rapport entre la quantité d'électricité produite par la pile à hydrogène et la quantité d'électricité dépensée dans l'électrolyse pour synthétiser de l'hydrogène, est assez faible.

Un groupe électrogène permet un rendement de 25 % et une pile à hydrogène peut atteindre 60 % de rendement électrique, s'il existe un besoin pour la chaleur de récupération mais les rendements énergétiques cumulés de la synthèse du dihydrogène et de la compression ou liquéfaction sont encore assez faibles. Ici, le dihydrogène n'est pas une source d'énergie primaire ; c'est un vecteur d'énergie. Le rendement sur une automobile serait de 35 %. Selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, le rendement global de la chaîne électricité-hydrogène-électricité est de l'ordre de 25 %.

4.6. Les champs d'applications

Transport

- Voitures particulières,
- Autobus (transports urbains et autobus scolaires)
- Camions (livraison urbaine, ordures, camions de distribution, transporteurs de fret...),
- Chariots élévateurs,
- Équipement de soutien au sol d'aéroport,
- Drones, avions, trains, bateaux (navires, ferries et bateaux de plaisance) [60]

Stationnaire

- Puissance et chauffage primaires pour les maisons et les bâtiments;
- Alimentation de secours pour l'éclairage critique, le générateur ou d'autres utilisations en cas de panne des systèmes ordinaires;
- Alimentation sans interruption (UPS) pour fournir une protection instantanée contre les pannes de courant

Portable

- Electronique grand public
- Équipement de chantier à distance
- Génératrices de courant électrique [60]

4.7. Principe de fonctionnement d'un accumulateur au Lithium

En cours d'utilisation, donc lors de la décharge de l'accumulateur, le lithium relâché par l'électrode négative (matériau d'intercalation hôte « H ») sous forme ionique Li^+ migre à travers l'électrolyte conducteur ionique et vient intercaler dans le réseau cristallin du matériau actif de l'électrode positive (composé d'insertion du lithium de type oxyde métallique « MLi »). Le passage de chaque ion Li^+ dans le circuit interne de l'accumulateur est exactement compensé par le passage d'un électron dans le circuit externe, générant ainsi un courant électrique. La densité d'énergie massique libérée par ces réactions est à la fois proportionnelle à la différence de potentiel entre les deux électrodes et la quantité de lithium qui se sera intercalé dans le matériau d'insertion. Elle est également inversement proportionnelle à la différence de potentiel entre les deux électrodes et à la quantité de Lithium qui sera intercalé dans le matériau d'insertion. Elle est également inversement proportionnelle à la masse totale du système. Or le Lithium est en même temps le plus léger (avec une masse molaire atomique de 6,96g) et le plus réducteur des métaux : les systèmes électrochimiques qui l'emploient peuvent atteindre des tensions de 4V, contre 1,5V pour les autres systèmes. Il permet ainsi aux batteries au Lithium d'offrir les importantes densités d'énergie massique et volumique (typiquement plus de 160 Wh/l et

400Wh/l), supérieures en moyen de plus de 50 %, à celles des batteries conventionnelles. Le principe de fonctionnement d'un accumulateur au Lithium est le même selon qu'elle est utilisée une électrode négative de Lithium métallique ou à base de Carbone (Voir figure 4.1).

4.8. Principe des moyens de stockage d'énergie

Dans ces dernières années, un grand nombre de systèmes de stockage d'énergie pour l'énergie électrique ont été développés. Les systèmes les plus fréquemment utilisés sont montrés à la figure 4.4. Ils peuvent être divisés en stockage indirect en utilisant un milieu intermédiaire et de stockage direct comme le stockage dans le champ magnétique ou électrique [61].

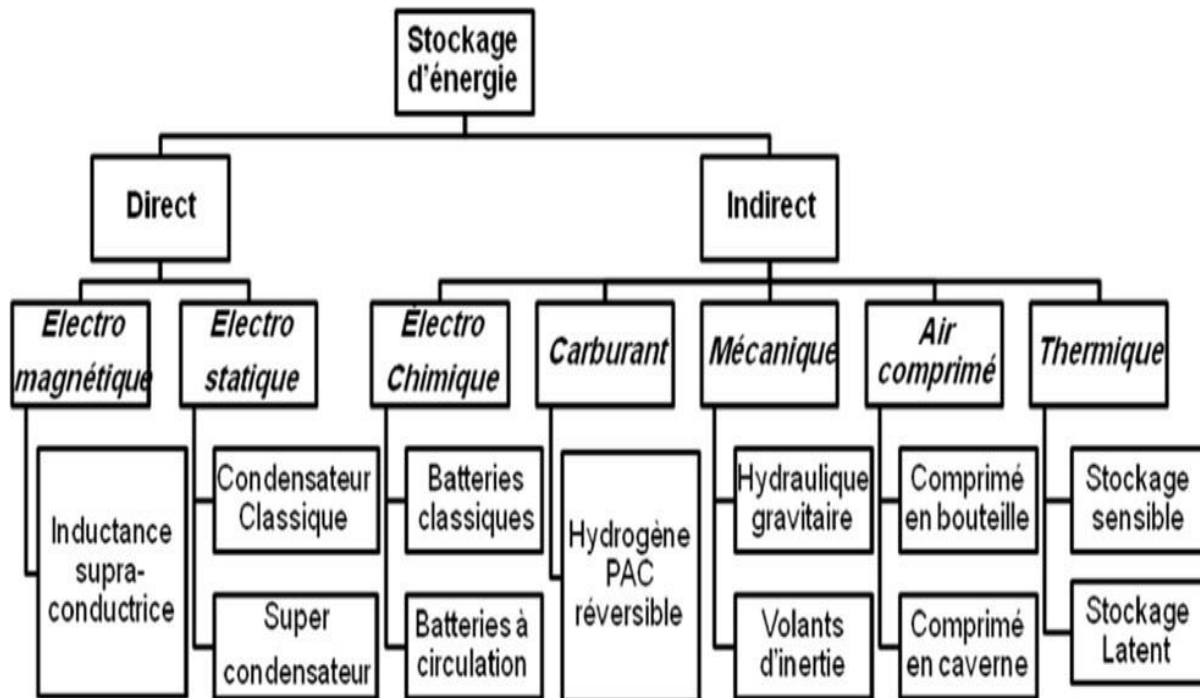


Figure 4.4. Vue de l'ensemble des moyens de stockage d'énergie [62].

Le classement des techniques de stockage peut se faire en deux grandes catégories :

1) Techniques de stockage à moyenne et faible échelles dont les usages peuvent également servir le réseau, mais aussi la production décentralisée pour de nombreuses applications.

Ces techniques comprennent le stockage :

- Sous forme mécanique (volants d'inertie),
- Sous forme électrochimique (accumulateurs et supercondensateurs),
- Sous forme magnétique, ou sous forme d'air comprimé ou d'hydrogène (piles à combustible).

2) Techniques de stockage à grande échelle dont les usages peuvent être utilisés par un gestionnaire de réseau.

Ces techniques comprennent le stockage :

- Sous forme d'énergie gravitaire (systèmes hydrauliques),

- Sous forme d'énergie thermique,
- Sous forme d'énergie de pression (air comprimé),
- Sous forme chimique (batteries chimiques).

4.9. Les dispositifs stockage

Dans le cas des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau, l'ajout de ces dispositifs peut améliorer les performances du système: Réduction des fluctuations de puissance, Alimentation des charges critiques lors de coupures de courant en plus d'être un support de puissance réactive. Il existe une variété de dispositifs de stockage tels que les batteries, les super-condensateurs, le stockage inertiel, le stockage sous forme d'hydrogène. Ces dispositifs varient en fonction de leurs caractéristiques, fonctionnement, et par conséquent, les fonctions qu'ils peuvent effectuer.

Les dispositifs de stockage les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques sont: les batteries électrochimiques, les piles à combustibles, les super-condensateurs et l'air comprimé.

4.9.1 Stockage électrochimique

Les batteries stockent l'énergie sous forme électrochimique et sont utilisées dans de nombreuses applications. Ce sont des dispositifs de stockage qui peuvent convertir l'énergie électrochimique en énergie électrique avec un rendement allant de 85 à 90%. Les batteries dites « primaires » ne sont pas très attractives du fait qu'elles ne sont pas réversibles et qu'elles doivent être écartées après leur décharge complète. Les batteries dites « secondaires » sont en revanche très utilisées. Une batterie secondaire peut être rechargée après une décharge en lui injectant un courant continu à partir d'une source externe [18].

Une batterie est caractérisée par sa capacité mesurée en ampère-heure (Ah): une capacité de 1 Ah veut dire que la batterie peut délivrer un courant de 1/N (Ampère) pendant N heures.

La vitesse d'une batterie est sa tension moyenne en mode décharge. Plusieurs autres caractéristiques doivent être prises en compte pour un bon choix de la batterie pour une application donnée : puissance, densité de puissance, endurance aux cycles charge-décharge, plage de température de fonctionnement...

La figure 4.4, montre un exemple d'une batterie Sodium-Soufre (cellule et batterie).

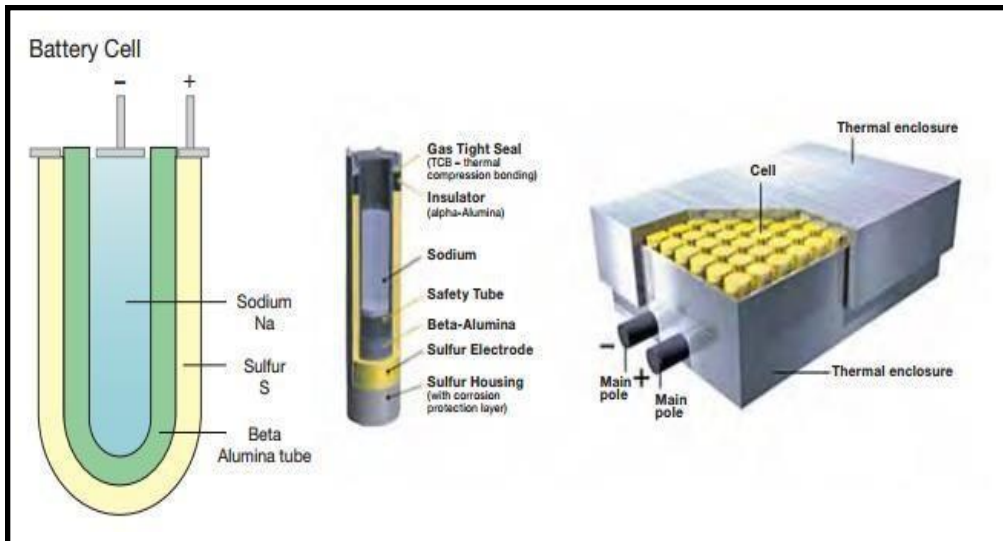


Figure 4. 4. Batterie de type NaS, structure d'une cellule et module de 50kW [25]

4.9.2 Stockage sous forme d'hydrogène

L'énergie électrique peut être convertie en hydrogène par électrolyse. L'hydrogène peut être stocké et converti en électricité, avec un rendement de plus de 50%, par des piles à combustible. Un système de stockage sous forme d'hydrogène consiste donc en un électrolyseur, un réservoir de stockage d'hydrogène et une pile à combustible (figure 4.5). Un électrolyseur est un dispositif électrochimique qui scinde l'eau en hydrogène et oxygène tout en consommant de l'énergie électrique. L'hydrogène, produit ainsi, peut être stocké sous pression dans des bouteilles de gaz ou des réservoirs. Ceci présente un avantage certain par rapport aux batteries: l'alimentation en électricité peut être assurée pour un temps illimité (puissance et énergie découplées).

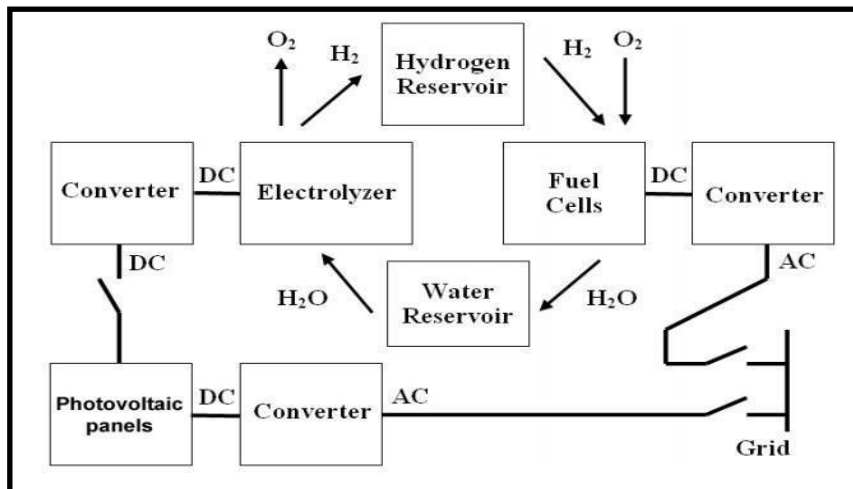


Figure 4.5. Schéma simplifié d'un système PV avec stockage en hydrogène [26]

La technologie des piles à combustible est à la base de l'utilisation de l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie, permettant, selon les spécialistes, d'ouvrir de larges perspectives pour les systèmes énergétiques. Une pile à combustible est un dispositif qui convertit directement l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique. Le principe d'une pile à combustible repose sur l'inverse de l'électrolyse : former de l'eau à partir de l'hydrogène et de l'oxygène tout en fournissant de l'énergie électrique (sous forme de courant continu).

4.9.3 Les super-condensateurs

Un super-condensateur (appelé aussi condensateur à double couche électrochimique) est un condensateur de technologie particulière, caractérisé par une très grande capacité, une densité de puissance (de l'ordre de plusieurs kW/kg) intermédiaire entre les batteries et les condensateurs électrolytiques conventionnels, et un bon rendement même par très faibles températures. Constitués de plusieurs cellules, les super-condensateurs peuvent restituer l'énergie stockée plus rapidement que les batteries en plus de supporter plus de cycles charge/décharge [27]. Par conséquent, ils sont très utilisés dans des systèmes exigeant des réponses dynamiques rapides (voiture électrique, train, ascenseurs...). Ils sont généralement associés à d'autres moyens de stockage (pile à combustible, batteries...), ce qui permet de combiner les avantages de chaque type de stockage et peuvent ainsi répondre aux exigences d'une gamme très large de systèmes énergétiques [28]. La figure 4.6, montre les courbes (appelées diagramme de Ragone) de différents moyens de stockage d'énergie et dispositifs de conversion [29]. Ce diagramme, représentant, sur axes logarithmiques, la densité d'énergie et la densité de puissance, montre que les super-condensateurs présentent l'avantage d'avoir le meilleur compromis entre ces deux paramètres.

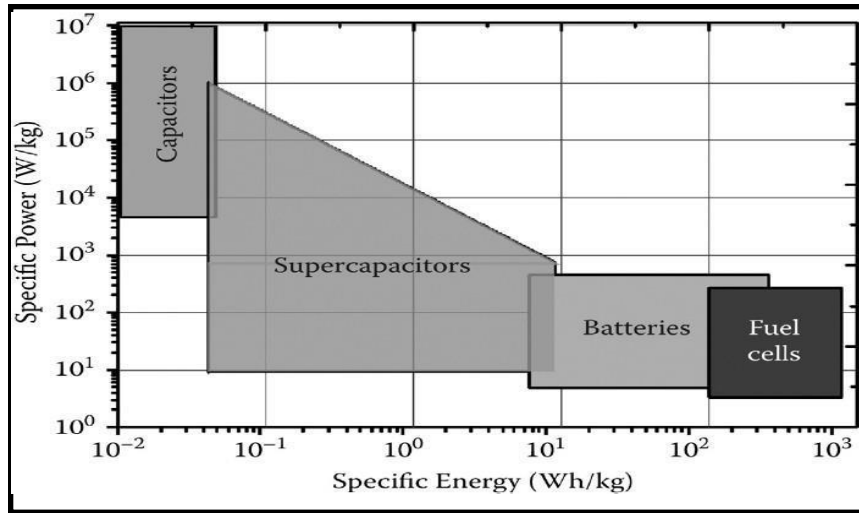


Figure 4.6. Diagramme de Ragone pour différents moyens de stockage [29]

4.9.4 Le stockage sous forme d'air comprimé

Le principe des systèmes de stockage sous forme d'air comprimé (énergie mécanique) repose sur l'élasticité de l'air: l'air est d'abord comprimé via un système de compresseurs, à très haute pression (100 à 300 bar) pour être stocké dans des réservoirs ou des caves souterraines. Pour récupérer cette énergie potentielle, l'air est détendu dans une turbine qui entraîne un alternateur. Comme l'air se réchauffe pendant sa compression, la chaleur à la sortie du compresseur peut être récupérée via des échangeurs et stockée afin d'être utilisée pour réchauffer la turbine. Ces systèmes se distinguent par une longue période de service, des coûts d'énergie concurrentiels, de maintenance simple et une densité de puissance élevée [30]. Deux technologies de stockage par air comprimé existent : les systèmes adiabatiques (sans aucun transfert thermique avec le milieu extérieur) (Figure 4.7) et les systèmes isothermes (encore au stade de prototype. Dans ce domaine, l'EPFL (Suisse) développe depuis 2002, cette solution de stockage avec des résultats montrant sa faisabilité pour le cas des systèmes à énergies renouvelables [31, 32].

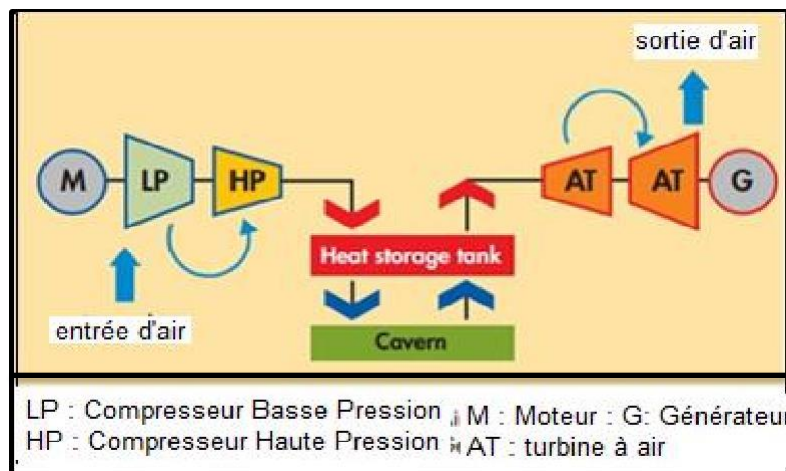


Figure 4.7. Système de stockage à air comprimé adiabatique. [32]

4.10. Les avantages et les inconvénients de la pile à combustible

4.10.1. Les avantages de la pile à combustible:

- Les piles à combustible ne dégagent aucune émission locale (hormis de l'eau), ce qui constitue un atout de taille pour la qualité de l'air, notamment dans les centres urbains.
- Elles offrent également des rendements supérieurs à un moteur thermique (mais inférieur à une batterie), sont silencieuses, peuvent être modulées, supportent des températures allant jusqu'à 1000°C (dans le cas des piles SOFC) et peuvent être utilisées pour des applications très variées [60].
- Haut rendement énergétique
- Ravitaillement rapide
- Fiabilité
- Absence d'émissions de GES
- Faible niveau sonore (faible vibration)
- Format compact, constituées en bloc, une superposition de plusieurs piles à combustibles uniques
- Faibles coûts de maintenance
- Longévité
- Adaptabilité aux longues portées, dans le cas de la mobilité lourde et intensive

4.10.2. Les inconvénients de la pile à combustible

- Le coût est le principal inconvénient de la pile à combustible,
- L'usage de matériaux chers et les volumes de production encore limités ne permettent pas de diminuer les prix de façon suffisante.
- La problématique de la durée de vie, jugée encore insuffisante pour des applications larges.
- Sur le volet environnemental, la question de la source énergétique doit aussi être posée. Si une pile à combustible affiche un fonctionnement « zéro émission », la source d'énergie en amont doit être évidemment prise en compte. Gris, bleu, vert... selon sa couleur,
- L'hydrogène est plus ou moins émetteur en CO₂.

4.11. Les Système de stockage raccordés au réseau (grid-connected).

Pour le cas d'un système de stockage raccordé au réseau, la situation est sensiblement différente, car les contraintes sont toutes autres. Si l'électricité est fournie au « fil du vent », du soleil ou de la houle, le stockage est inutile. Pour autant, la présence d'un stockage offre la possibilité de participer aux « services systèmes » (régulation du réseau) et de mieux valoriser économiquement l'énergie produite. Dans ce contexte, le dimensionnement du stockage relève d'une problématique différente de celle précédemment d'écrite, notamment à travers les critères et les contraintes, mais les paramètres à optimiser restent les mêmes. Un tel dispositif permet également l'ilotage en cas de connexion du réseau. Dans ce cas, on se retrouve dans la situation autonome d'écrite précédemment

Donc, dans les systèmes autonomes, le stockage est nécessaire afin de respecter l'adéquation entre production et consommation. Des délestages de production (partiels ou totaux selon la technologie du système de production) peuvent être effectués en cas de surplus d'énergie lorsque la puissance produite à partir des éléments naturels intermittents (vent, houle, solaire) est supérieure à la somme de la puissance consommée et de la puissance maximale acceptable par le dispositif de stockage, fonction de l'état de charge réciproquement, des délestages de consommation peuvent éventuellement être opérés en cas de puissance demandée supérieure à la somme de la puissance produite et de la puissance maximale dérivable par l'accumulateur, toujours fonction de son état de

charge. Mais ces délestages sont généralement considérés comme indésirables et le système est dimensionné pour les éviter. Dans le cas de systèmes raccordés au réseau, la situation est sensiblement différente, car les contraintes sont toutes autres. Si l'électricité est fournie au « fil du vent », du soleil ou de la houle, le stockage est inutile. Pour autant, la présence d'un stockage offre la possibilité de participer aux « services systèmes » (régulation du réseau) et de mieux valoriser économiquement l'énergie produite. Dans ce contexte, le dimensionnement du stockage relève d'une problématique différente de celle précédemment décrite, notamment à travers les critères et les contraintes, mais les paramètres à optimiser restent les mêmes. Un tel dispositif permet également l'îlotage en cas de déconnexion du réseau. Dans ce cas, on se retrouve dans la situation autonome décrite précédemment.

Conclusion

Les domaines d'application de la pile à combustible sont de trois ordres : l'alimentation en énergie d'appareils portables, la propulsion ou l'alimentation électrique des moyens de transport, ainsi que la production stationnaire de chaleur et d'électricité. Le privilège de l'hydrogène utilisé comme combustible est la facilité de son stockage ; il devrait donc s'imposer dans tous les domaines où une réserve continue en électricité est requise, mais difficile à réaliser. La pile à combustible devrait donc se substituer largement aux batteries traditionnelles et ouvrir de nouvelles perspectives à la génération mobile d'électricité dans le secteur des transports. Parallèlement, elle permettra une production décentralisée d'électricité et/ou de chaleur, ce qui en fait un enjeu primordial dans le contexte de la libéralisation des marchés énergétiques, mais aussi de la diversification des sources d'approvisionnement.

*Exemples d'exercices
portant sur le principe
des piles à combustible*

William Grove - PAC:

Le principe des piles à combustible a été découvert par l'électro chimiste William Grove en 1839, mais leur utilisation réelle ne date que des années 1960, à l'occasion des programmes spatiaux de la NASA.

Ces piles alimentaient en électricité des ordinateurs de bord des vaisseaux Gemini et Apollo et fournissaient l'eau de consommation.

En effet par comparaisons aux piles saline et alcalines, les piles à combustible, type hydrogène-oxygène, présentent deux avantages :

- Faire appel à des réactifs (dioxygène de l'air et dihydrogène) disponible, en grand quantité et
- être non polluantes car libèrent de l'eau

Le principe de fonctionnement :

La cellule de réaction est composée de deux électrodes séparées par un électrolyse (exemple: l'acide phosphorique H₃PO₄) . Elle est alimentée en dihydrogène et en continu

Le fonctionnement de la pile repose sur une réaction d'oxydoréduction au niveau des électrodes

Données:

Masse molaires atomique: M(H) = 1,0 g / mol; M(O) = 16,0 g / mol

Constante d'Avogadro: N_A = 6,02 x 10²³ mol⁻¹

Faraday: 1F = 96500C. mol⁻¹

A. Schéma de la pile à combustible

- Quelle est la nature des porteurs de charges à l'extérieur de la pile
- Légènder le schéma de la pile en indiquant le sens conventionnel de circulation du courant électrique I et le sens de circulation des porteurs de charges à l'extérieur de la pile (en ajoutant des flèches bien orientés)

B. Les couples d'oxydoréduction mis dans réaction sont

H⁺ / H₂O et O₂ / H₂O

- Ecrire les demi-équations électroniques pour chaque couple mis en jeu, quand la pile débite.
- En déduire l'équation de la réaction modélisant la transformation ayant lieu dans cellule de réaction

Chapitre 5.

Réseaux intelligents (Smart grid)

5.1. Introduction

Les réseaux intelligents ou « smart grids » sont des réseaux d'électricité qui, grâce à des technologies informatiques, ajustent les flux d'électricité entre fournisseurs et consommateurs. En collectant des informations sur l'état du réseau, les smart grids contribuent à une adéquation entre production, distribution et consommation.

5.2. Définition et catégories

Il est nécessaire de différencier smart grid et compteur communicant (ou « smart meter »), qui renseigne le consommateur sur sa demande en électricité. « Smart grids » est une appellation générale pour l'ensemble des technologies et des infrastructures « intelligentes » installées. Chez le particulier, le compteur communicant est une première étape dans la mise en place des smart grids.

Les réseaux intelligents peuvent être définis selon quatre caractéristiques en matière de :

- Flexibilité: ils permettent de gérer plus finement l'équilibre entre production et consommation ;
- Fiabilité: ils améliorent l'efficacité et la sécurité des réseaux ;
- Accessibilité: ils favorisent l'intégration des sources d'EnR sur l'ensemble du réseau ;
- Economie: ils apportent, grâce à une meilleure gestion du système, des économies d'énergie et une diminution des coûts (à la production comme à la consommation), voir module Réseaux intelligents "Smart grid" figure 5.1.

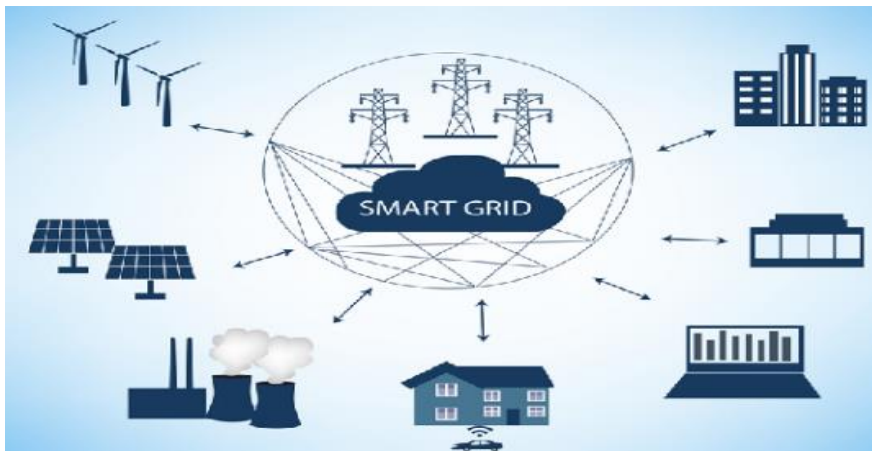


Figure 5.1. Réseaux intelligents (Smart grid)

5.3. *Fonctionnement*

Au sens large, un réseau intelligent associe l'infrastructure électrique aux technologies numériques qui analysent et transmettent l'information reçue. Ces technologies sont utilisées à tous les niveaux du réseau: production, transport, distribution et consommation.

- **Un contrôle des flux en temps réel:**

Des capteurs installés sur l'ensemble du réseau indiquent instantanément les flux électriques et les niveaux de consommation. Les opérateurs du réseau peuvent alors réorienter les flux énergétiques en fonction de la demande et envoyer des signaux de prix aux particuliers pour adapter leur consommation (volontairement ou automatiquement).

- **L'interopérabilité des réseaux:**

L'ensemble du réseau électrique comprend le réseau de transport et le réseau de distribution. Le premier relie les sites de production d'électricité aux zones de consommation : ce sont les grands axes qui quadrillent le territoire. Le réseau de distribution s'apparente aux axes secondaires. Il achemine l'électricité jusqu'aux consommateurs finaux.

Par l'échange instantané d'informations, les smart grids favorisent une interopérabilité entre les gestionnaires du réseau de transport et ceux du réseau de distribution.

- **L'intégration des énergies renouvelables au réseau:**

Les réseaux intelligents reposent sur un système d'information qui permet de prévoir à court et à long terme le niveau de production et de consommation.

Les énergies renouvelables qui fonctionnent souvent par intermittence et de façon peu prévisible (ex : l'éolien) peuvent ainsi être mieux gérées.

- **Une gestion plus responsable des consommations individuelle:**

Les compteurs communicants (ou compteurs évolués, « Linky » pour l'électricité) sont les premières versions d'application du réseau intelligent. Installés chez les consommateurs, ils fournissent des informations sur les prix, les heures de pointe de consommation, la qualité et le niveau de consommation d'électricité du foyer.

Les consommateurs peuvent alors réguler eux-mêmes leur consommation au cours de la journée. De leur côté, les opérateurs du réseau peuvent détecter plus vite les pannes.

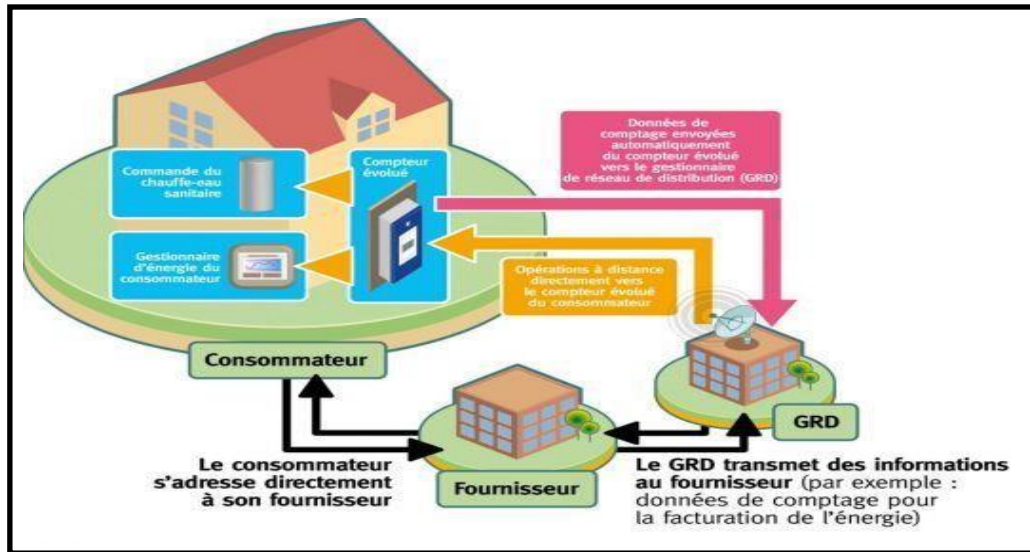


Figure 5.2. Principe des compteurs électriques évolués

5.4. Enjeux par rapport à l'énergie

À l'heure actuelle, les réseaux électriques doivent faire face à de nouveaux besoins en énergie, avec notamment le développement de la climatisation, des appareils électroniques ou du chauffage électrique. Cette hausse devrait être amplifiée par de nouveaux usages tels que la voiture électrique ou les pompes à chaleur. Les smart grids visent à apporter une réponse à ces contraintes.

5.4.1. Des avantages économiques et environnementaux

Les smart grids améliorent la sécurité des réseaux électriques. En équilibrant l'offre et la demande, ils évitent le suréquipement des moyens de production et permettent une utilisation plus adaptée des moyens de stockage de l'électricité, disponibles de manière limitée. Les réseaux intelligents augmentent aussi l'efficacité énergétique globale : ils réduisent les pics de consommation, ce qui atténue les risques de panne généralisée. Enfin, ils limitent l'impact environnemental de la production d'électricité en réduisant les pertes et en intégrant mieux les énergies renouvelables.

5.4.2. Les limites dans la mise en œuvre

Cependant, le coût des investissements reste élevé. En effet, les smart grids doivent être implantés sur l'ensemble du réseau et impliquer tous les acteurs pour être efficaces. L'autre obstacle est la diversité des acteurs, car ils doivent mettre au point des systèmes communicants variés avec des logiques convergentes. De plus, les données recueillies sont complexes à gérer et à stocker, compte tenu de l'importante quantité d'informations à traiter. Enfin, les informations sur les horaires ou les activités des consommateurs et des producteurs sont confidentielles. Des normes sur la protection des données doivent être appliquées.

5.5. Acteurs majeurs

Le développement des réseaux intelligents nécessite le concours de nombreux acteurs:

- Les consommateurs, (en régulant eux-mêmes leur consommation d'électricité) participent à l'efficacité du système ;
- Les producteurs d'électricité comme alimentent les réseaux de transport d'électricité et doivent être capables de répondre en temps réel à la demande. Le développement des smart grids permet également aux producteurs décentralisés de petites capacités (ex: les éoliennes ou les panneaux photovoltaïques appartenant à des particuliers) d'être raccordés ;
- Les gestionnaires des réseaux de transport et de distribution ainsi que les constructeurs de matériel électrique gèrent et installent les équipements de mesure assurant la sécurité et le fonctionnement des réseaux. Ils sont les acteurs techniques majeurs du développement des smart grids ;
- Les gestionnaires de processeurs et de systèmes informatiques comme InfoVista, Intel, Google ou Cisco System, développent les technologies d'information indispensables au fonctionnement des réseaux intelligents ;

Les pouvoirs publics soutiennent et encadrent le développement des réseaux intelligents notamment par la définition de normes de communication et la protection des systèmes contre les intrusions ou détournements.

5.6. Zone de présence ou d'application

À court et moyen termes, les réseaux intelligents seront essentiellement déployés dans les pays développés car la modernisation du réseau nécessite d'importants investissements. Les États-Unis ont été précurseurs dans le développement des smart grids. De grands investissements sont en effet consentis afin de moderniser un réseau électrique défaillant et souvent obsolète. En Europe, le niveau des avancées varie selon les pays. Les pays dont les réseaux sont fragiles et dont la production est largement émettrice de CO₂ sont les plus volontaires, tout comme ceux qui ont des préoccupations écologiques anciennes.

Les investissements entrepris et les avancées réalisées concernent principalement l'installation de compteurs intelligents à ce jour. On estime à 80% le nombre de foyers qui pourraient théoriquement être équipés de compteurs intelligents d'ici 2020 en Europe. Il s'agit d'une condition indispensable mais non suffisante pour avoir des réseaux intelligents réellement efficaces. L'effort devra être conduit en parallèle sur les autres composants du réseau, notamment son système d'information.

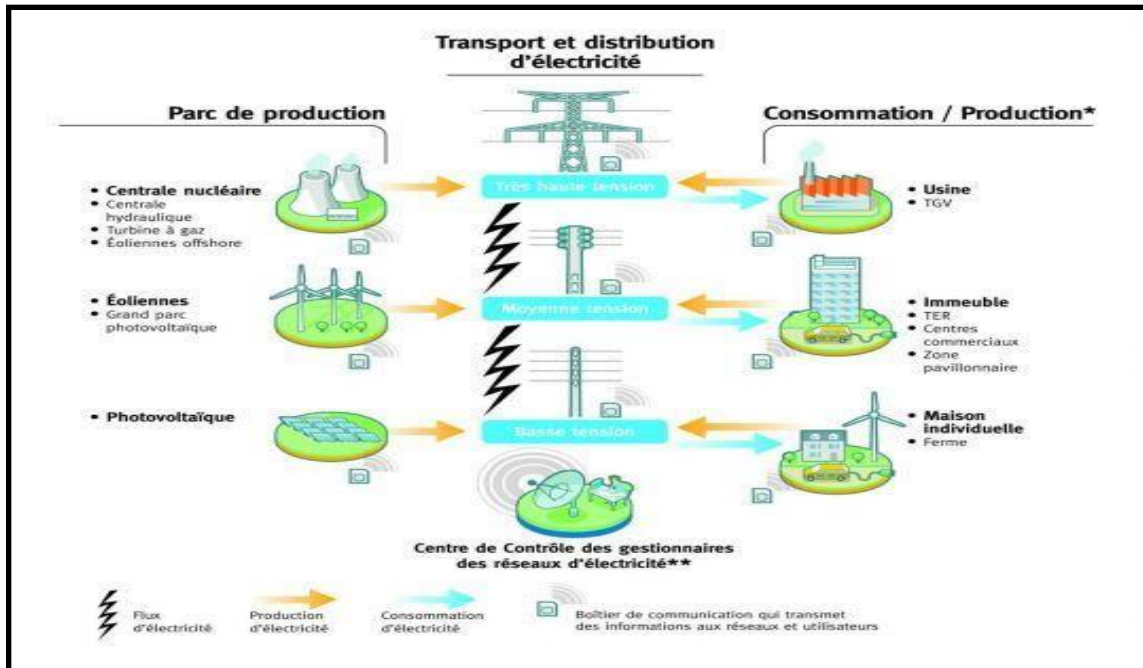


Figure 5.3. Fonctionnement des smart grids

Conclusion

Les équipes des énergies renouvelables travaillent depuis de nombreuses années sur une meilleure intégration de l'énergie renouvelable sur le réseau électrique.

Le stockage de l'énergie est l'un des enjeux majeurs. Il permettra d'ajuster la « production » et la « consommation » d'énergie en limitant les pertes. L'énergie est stockée lorsque sa disponibilité est supérieure aux besoins. Inversement, elle sera restituée sur le réseau électrique lorsque les besoins en électricité augmentent. Face à la variation fluctuation de la production, ce procédé est une réponse pour être constamment à la hauteur de la demande.

Les équipes des Energie se sont engagés depuis déjà plusieurs années dans une démarche d'adaptation profonde de leurs réseaux. L'objectif est d'accueillir les nouvelles installations de production d'électricité, qui se caractérisent par leur nombre, leur disparité de taille et de répartition, et une production variable pour ce qui concerne l'éolien et le solaire, tout en garantissant la sécurité et la sûreté du système électrique.

Les opérateurs des réseaux développent un ensemble de solutions intelligentes pour améliorer la performance du système électrique en facilitant l'intégration des énergies renouvelables. Les solutions peuvent viser :

- Soit à faciliter l'insertion des EnR dans les réseaux: optimisation de l'utilisation des infrastructures existantes ;
- Soit à densifier les échanges d'informations entre gestionnaires de réseaux et producteurs afin de valoriser la flexibilité que ces partenaires peuvent offrir pour la gestion des contraintes sur le réseau, les missions d'équilibrage et de sécurité d'approvisionnement.

Après avoir présenté le contexte général dans lequel l'émergence des Smart Grids devenait inévitable, une définition commune à plusieurs institutions a pu être donnée. Aussi pour bien comprendre

les nouveautés et enjeux liés à ces réseaux, il fallait en présenter les nouvelles technologies afférentes, les nouveaux acteurs entrant en jeu et les modèles d'affaire qui lient ces nouveaux partis. Une fois ce cadre général mis en place, un ensemble de nouvelles fonctions intelligentes a été mises en exergue.

Parmi ces nouveautés et enjeux, apparaît la cyber-sécurité qui constitue aujourd'hui un élément majeur de l'environnement technique.

Toutefois, l'acceptabilité et le déploiement de ces solutions ne peuvent passer sans des réflexions faites au sein d'initiatives institutionnelles, gouvernementales ou plus académiques et enfin sans la phase préliminaire qui passe par les démonstrateurs.

Références bibliographiques

- [1] Azzeddine Hocine Abdelhak Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques avec stockage connectés au réseau. Université de MB USTO Oran, thèse de doctorat, 2018
- [2] International Energy Agency. *Key World Energy Trends*. Edition 2016, disponible sur: www.iea.org, consulté le 03/12/2016
- [3] A. Khaligh, O.C. Onar. *Energy harvesting: Solar, Wind, and Ocean Energy Conversion Systems*. Taylor and Francis Group, New York, 2010.
- [4] <http://reseaux-chaleur.cerema.fr/les-differents-stades-de-lenergie>
- [5] International Energy Agency. *Key Renewables Trends*. 2016, disponible sur : www.iea.org,
- [6] T. K. Freddy, N. Abd Rahim. *Photovoltaic Inverter Topologies for Grid Integration Applications*. in: M.R. Islam, F.Rahman, W. Xu (Editeurs). *Advances in Solar Photovoltaic Power Plants*. Springer, Berlin Heidelberg, 2016, pp 13-42.
- [7] Frankfurt School-UNEP Centre. *Global Trends in Renewable Energy Investment 2016*: www.fs-unep-centre.org, consulté le 03/03/2016.
- [8] A Labouret, M Villoz. *Installations photovoltaïques Conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau*. Dunod, Paris, 2012. ISBN 978-2-10-057247-2, 5e édition
- [9] A.V. Da Rosa. *Fundamentals of Renewable Energy Processes*. Elsevier, 2005.
- [10] F.S. Johnson. *The solar constant*. Journal of meteorology, Vol.11, N°. 6, 1954, pp 431-439.
- [11] D. Rekioua, E. Matagne. *Optimization of Photovoltaic Power Systems: Modelization, Simulation and Control*. Springer, London, 2012.
- [12] A. Aziz, K. Kassmi, F. Olivie, G. Sarrabayrouse, A. Martinez, Synthèses bibliographiques sur les chaînes photovoltaïques. 1-générateur photovoltaïque, Rapport LAAS N°04348, 27p, Juin 2004,
- [13] A. Aziz, Ka. Kassmi, K. Kassmi, F. Olivie, R. Maimouni, G. Sarrabayrouse, A. Martinez *Modélisation des panneaux solaires dans l'environnement OrCAD*, MAJECSTIC'04. CDROM, Art 14_2_7. Calais- France, 13-15 Octobre 2004.
- [14] A. Aziz, K. Kassmi, R. Maimouni, F. Olivie, G. Sarrabayrouse, A. Martinez *Symbolisation du schéma électrique des panneaux solaires Commercialisés dans l'environnement Orcad- Pspice*. PREMME – 2005, Université My Ismail, FST- Errachidia- Maroc, 15-16 Septembre 2005,
- [15] M Chergui., □ *Nouvelle technique de commande et optimisation d'un système de pompage photovoltaïque* □.
Thèse doctorat 2013. Université de l'USTO-Oran
- [16] L.PROTIN, S.ASTIER, "CONVERTISSEURS PHOTOVOLTAÏQUES", TECHNIQUE DE L'INGENIEUR, REF: D3360, 1997.
- [17] B. Multon, *Production d'énergie électrique par sources renouvelables*. Technique de l'ingénieur Traité génie électrique, D 3 2003.
- [18] N.M. Pearsall, R. Hill. *Photovoltaic modules, systems and applications*. in: M.D. Archer, R. Hill, *Clean Energy from Photovoltaics*. World Scientific Publishing, 2001, pp 671-712.
- [19] W. Omaran. *Performance Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems*. Thèse de doctorat, Université de Waterloo, Canada, 2010.
- [20] S.R. Wenham, M.A. Green, M.E. Watt, R. Corkish. *Applied PVs*. Earthscan, Royaume Uni, 2007.

- [21] Y. Wang, K. Itako, T. Kudoh, K. Koh, Q. Ge. *Voltage-Based Hot-Spot Detection Method for Photovoltaic String Using a Projector*. *Energies*, Vol.10, 2017, p. 1- 14.
- [22] K. Ishaque, Z. Salam. *A review of MPPT of PV system for uniform insolation and partial shading condition*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.19, 2013, pp. 475–488.
- [23] Y. Yang, F. Blaabjerg. *Overview of Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems*. *Electric Power Components & Systems*, Vol.43, 20015, pp 1352-1363.
- [24] M.Grapp, S.Dupuis, *Stabilité et sauvegarde des réseaux électriques*. Hermès 2003
- [25] P. Moldrik, Z. Hradilek. *Hydrogen Production for Solar Energy Storage*. *RE&PQJ*, Vol. 1, No.9,2011, pp. 518-523.
- [26] N. Benyahia, H. Denoun, M. Zaouia, S. Tamalouzt, M. Bouheraoua, N. Benamrouche, T. Rekioua, S. Haddad. *Characterization and Control of Supercapacitors Bank for Stand-Alone Photovoltaic Energy*. *Energy Procedia*, Vol. 42, 2013, pp. 539-54
- [27] Z. Cabrane, M. Ouassaid, M. Maaroufi. *Analysis and evaluation of battery- supercapacitor hybrid energy storage system for photovoltaic installation*. *International journal of hydrogen energy*, 2016
- [28] B. Viswanathan. *Energy Sources Fundamentals of Chemical Conversion: Processes and Applications*. Elsevier, Amsterdam, Hollande, 2007
- [29] K. Herriman. *Small Compressed Air Energy Storage Systems*. Thèse de doctorat, Université de Southern Queensland, Australie, 201.
- [30] U. E. Barraud. *L'Etat de Vaud soutient le stockage d'énergie par air comprimé*. EPFL Lausanne, Suisse, disponible sur: www.epfl.ch, consulté le 20/05/2015.
- [31] A. Rufer, S. Lemofouet. *Energetic performance of a hybrid energy storage system based on compressed air and super capacitors*. in: *IEEE International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion 2006*. Taormina, Italy, 2006, pp 469-474.
- [32] N. Opiyo. *Power Electronics for PV-Based Communal Grids*. *Smart Grid and Renewable Energy*, Vol. 7, 2016, pp. 67-82.
- [33] T.M.C. Le. *Couplage onduleurs photovoltaïques et réseau, aspects contrôle, commande et rejet de perturbations*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, Grenoble, France, 2012.
- [34] K.S.V Swarna, A. Vinayagam, S.Y. Khoo, A. Stojcevski. *An Experimental Study to Investigate PQ Impacts in a Grid Connected PV System*. *International Journal of Sustainable and Green Energy*, Vol.5, N° 4, 2016; pp. 46-58.
- [35] International Energy Agency. *Overcoming PV grid issues in the urban areas*. 2009, disponible sur: www.iea-pvps.org, consulté le 02/03/2015.
- [36] M. Thomson, D.infield. *Impact of widespread photovoltaics generation on distribution systems*. *IET Renewable Power Generation*, Vol. 1, 2007, pp. 33-40.
- [37] R. Tonkoski, L.A.C. Lopes. *Impact of active power curtailment on overvoltage prevention and energy production of PV inverters connected to low voltage residential feeders*.

Renewable Energy, Vol. 36, 2011, pp. 3566-3574.

- [38] N. Cullen, J. Thornycroft, A. Collinson. *Risk analysis of islanding of PV power systems within low voltage distribution networks*. International Energy Agency, Rapport IEA PVPS T5-08, Mars 2002.
- [39] A. Datta, A. Ray, D. Mukherjee, H. Saha. *Selection of islanding detection methods based on multi-criteria decision analysis for grid-connected photovoltaic system applications*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 7, 2014, pp. 111-122.
- [40] B. Yu, M. Matsui, G. Yu. *A review of current anti-islanding methods for photovoltaic power system*. Solar Energy, Vol. 84, 2010, pp. 745-754.
- [41] C.L. Trujillo, D. Velasco, E. Figueres, G. Garcerá. *Analysis of active islanding detection methods for grid-connected microinverters for renewable energy processing*. Applied Energy, Vol. 87, N° 11, 2010, pp. 3591-3605.
- [42] V. Menon, M.H. Nehrir. *A hybrid islanding detection technique using voltage unbalance and frequency set point*. IEEE Transactions of Power Systems; Vol. 22, N° 1, 2007, pp. 442-448.
- [43] L. Bowtell, A. Ahfock. *Direct current offset controller for transformerless single-phase photovoltaic grid-connected inverters*. IET Renewable Power Generation, Vol. 4, N° 5, 2010, pp. 428-437.
- [44] S. Hwang; L. Liu; H. Li; J.M Kim. *DC Offset Error Compensation for Synchronous Reference Frame PLL in Single-Phase Grid-Connected Converters*. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 27, N 8, 2012, pp 3467 – 3471.
- [45] IEEE Standard Association. *519-2014-IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. Disponible sur: www.standards.ieee.org.
- [46] Y. Wang, P. Zhang, W. Li. *Online Overvoltage Prevention Control of Photovoltaic Generators in Microgrids Sign In or Purchase*. IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, N° 4, 2012.
- [47] M.A. Ghasemi, M. Parniani. *Prevention of distribution network overvoltage by adaptive droop-based active and reactive power control of PV systems*. Electric Power Systems Research, Vol. 133, 2016, pp. 313-327.
- [48] D. REKIOUA, Z. ROUMILA et T. REKIOUA, « Etude d'une centrale hybride photovoltaïque - éolien - diesel », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 11. N°4. 623 – 633, 2008.
- [49] D. Saheb-Koussa, M. Belhamel, « Production d'électricité sans interruption moyennant un système hybride (éolien - photovoltaïque - diesel) », Revue des Energies Renouvelables, ICRESD-07 Tlemcen 121 – 128, 2007.
- [50] Musseli, M., Notton, G. & Louche, A., « Design of Hybrid-Photovoltaic power generator, with optimization of energy management », Solar Energy, Vol.65, No.3, 1999, pp. 143-157.
- [51] H. Ibrahim A. Ilinca J. Perron, « Investigations des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés », Rapport interne, Laboratoire de Recherche en

Énergie Éolienne (LREE), Université du Québec, Septembre 2008.

- [52] L. Stoyanov, « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables, » Thèse de doctorat de l'université Technique De Sofia, 28 octobre 2011
- [53] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne>
- [54] A. Lilia « Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement, » Thèse de doctorat, université de Hadj L, Batna, 2012
- [55] <http://tpeeoliennefoucauld20092010.wifeo.com/conclusion.php>
- [56] https://sites.uclouvain.be/elee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Generalites/exercices/ExercicesEolien_exo4.htm
- [57] <https://www.wind-energy-the-facts.org/partie-iiiintegration-au-reseau-.html>
- [58] « L'énergie: stockage électrochimique et développement durable – L'énergie : stockage électrochimique et développement durable – Collège de France ».
- [59] L-B-Systemtechnik, *Brennstoffzellen und Wasserstoff-Technologien als wirtschaftliche Chance für Hamburg*, 2004.
- [60] <https://hydrolux.ca/la-pile-a-combustible-une-solution-simple-pour-une-equation-complexe/>
- [61] SELS, U, T. VAN, et C. DRAG T, "New Energy Storage Devices for an Improved Load. Managing on Distribution Level," *Porto Power Tech Conference*, Sep. 2001.
- [62] DIAB, Y. "في محاضرات 'الكهربائية الطائفة نخزبن'" 2009. *Damascus, of University*
- [63] https://sites.uclouvain.be/elee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Generalites/exercices/ExercicesEolien_exo3.htm