

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Électrotechnique
Spécialité : Energie et environnement

Présenté par : **BENBOUABDELLAH Zakaria.**
HADJAL EI Mehdi.

Thème

**MODELISATION ET SIMULATION D'UN
SYSTEME DE STOCKAGE DANS UNE
ALIMENTATION HYBRIDE**

Soutenu publiquement, le 11 / 09 /2020 , devant le jury composé de

Mme. LASSOUANI Fatiha	Docteur	ESSA. Tlemcen	Présidente
Mme. FARADJI Djamila Née KHERBOUCHE	Docteur	ESSA. Tlemcen	Encadrante
Mme. GHOMRI Amina	Professeur	ESSA. Tlemcen	Examinatrice
Mme. BOUKLI HACENE Souhila	Docteur	Université Abou Beker Belkaid Tlemcen	Examinatrice

Année universitaire : 2020 /2021



سبحانك لا علم لنا إلا ما علمتنا إنك أنت
العليم الحكيم



سورة البقرة: الآية: 31

اللهم إنا نسألك علما نافعاً وقلبا خاشعاً ولسانا ذاكراً

Remerciements

Ce travail, a été le fruit d'un dur travail, accompagnés de beaucoup de sacrifices, surtout durant cette pandémie. Nos remerciements, vont tout d'abord au créateur de l'univers, qui nous accordé la force et le courage et l'intelligence, pour mener à bien cette année. On offre nos sincères et chaleureux remerciements, à notre encadreur de mémoire madame **KHERBOUCHE Djamila**, pour avoir accepté de diriger notre travail avec ses précieux conseils. Aussi que les membres du jury trouvent ici nos remerciements les plus vifs, pour avoir accepté d'honorer par leurs jugements notre modeste travail. Enfin, on ne peut pas achever sans exprimer nos sincères remerciements à tous ceux qui nous ont aidé à réaliser ce travail de près ou de loin.

MERCI !



Dédicaces

À ma grand-mère Fatima. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Que dieu, vous protège, préserve santé et longue vie.

À la lumière de mes jours, à mes très chers parents, que j'aime énormément tant pour leurs affections, leurs encouragements et leur patience illimitée. Je vous dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester fidèle à votre fierté et ne jamais vous décevoir.

À mes très chers frère et sœurs, pour les souvenirs d'une enfance agréable et unique. Pour des souvenirs qui n'auraient pu être si les choses étaient un peu différentes.

À mes tendres cousines & cousins, pour les moments passés ensemble, je vous souhaite toute la réussite.

À mes très chers amis, pour l'amitié qui nous unit et les souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble. Merci d'être toujours à mes côtés.
Vous serez à jamais dans mon cœur.

À mes très chères tantes, à mes chers oncles, un remerciement particulier et sincère pour tous vos efforts et votre encouragement. Que ce travail soit un témoignage de ma gratitude et mon profond amour.

BENBOUABDELLAH Zakaria



Dédicaces

À Ma chère grand-mère :

Que ce modeste travail, soit l'expression des vœux que vous n'avez cessé de formuler dans vos prières. Que Dieu vous préserve santé et longue vie

À Ma tendre Mère :

Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

À Mon très cher Père :

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.

À toute ma famille :

Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement et votre bonté exceptionnelle. Que Dieu le Tout Puissant vous garde et vous procure santé et bonheur.

À mes amis :

Vous êtes pour moi des frères sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

HADJAL El Mehdi

SOMMAIRE

Remerciements	II
Dédicaces	III
Dédicaces	IV
SOMMAIRE	V
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	X
Introduction générale	XIII
Chapitre I	I
Introduction	2
I.1 Les énergies renouvelables.....	2
I.1.1 Définition	2
I.1.2 Les différents types des énergies renouvelables.....	3
I.1.2.1 La production de chaleur par les sources renouvelables	3
I.1.2.2 La production d'électricité par les énergies renouvelables.....	5
I.1.3 Les avantages et inconvénients des énergies renouvelables	7
I.1.3.1 Les avantages	7
I.1.3.2 Les inconvénients.....	8
I.2 Les systèmes électriques hybrides.....	9
I.2.1 Introduction	9
I.2.2 Classification	9
I.2.2.1 Le régime du fonctionnement	9
I.2.2.2 La structure du système hybride	10
I.2.3 Importance de l'hybridation	11
I.2.4 Combinaisons des systèmes hybrides à énergie renouvelable :.....	12
I.2.4.1 Architecture à bus CC.....	12
I.2.4.2 Architecture à bus CA	13
I.2.4.3 Architecture mixte à bus CC/CA.....	14

I.2.5	Les différentes combinaisons des systèmes hybrides	14
I.2.5.1	Système hybride photovoltaïque –éolien-diesel	14
I.2.5.2	Système hybride photovoltaïque-batterie et piles à combustible	15
I.2.5.3	Système hybride photovoltaïque –éolien.....	15
I.2.6	Avantages et inconvénients d'un système hybride	16
I.2.6.1	Avantages.....	16
I.2.6.2	Inconvénients.....	16
I.3	Stockage d'énergie.....	16
I.3.1	Définition	16
I.3.2	Avantages techniques et économiques du stockage d'énergie.....	17
I.3.3	Stockage et énergies renouvelables	17
I.3.4	Les différents systèmes de stockage.....	18
I.3.4.1	Stockage d'énergie directe	19
I.3.4.2	Stockage d'énergie indirect	21
	Conclusion	28
	Chapitre II	2
	Introduction	30
II.1	Energie photovoltaïque	30
II.1.1	Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque	30
II.1.2	Les différents systèmes photovoltaïques	30
II.1.2.1	Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau	30
II.1.2.2	Systèmes PV raccordés au réseau avec injection totale.....	30
II.1.2.3	Systèmes PV raccordés au réseau avec autoconsommation :.....	31
II.1.2.4	Systèmes photovoltaïques autonomes.....	31
II.1.2.5	Systèmes photovoltaïques hybrides	32
II.1.3	Conversion de l'énergie solaire.....	33
II.2	Energie éolienne	34
II.2.1	Le principe de fonctionnement d'une éolienne	34
II.2.2	Les différents types d'éoliennes	35
II.2.2.1	Eoliennes a axe vertical.....	35
II.2.2.2	Eoliennes a axe horizontal :	35
II.2.3	Chaînes de conversion électrique	36
II.2.3.1	Systèmes couplés au réseau alternatif	36
II.2.3.2	Systèmes en site isolé	39

II.3	Système de stockage.....	40
II.3.1	Choix du système de stockage	40
II.3.2	Critère de choix.....	40
	Conclusion	45
	Chapitre III.....	30
	Introduction.....	47
III.1	Modélisation des caractéristiques du module/champ PV	47
III.1.1	L'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque :.....	47
III.1.2	L'efficacité (où le rendement) d'un générateur photovoltaïque :.....	47
III.1.3	Modèle de la température de la cellule :.....	48
III.1.4	Modèle électrique de la cellule PV :	49
III.2	Modélisation des caractéristiques d'une éolienne.....	51
III.2.1	Modèle du vent.....	51
III.2.1.1	Energie cinétique du vent	51
III.2.1.2	Limite de Betz/Formule de Betz.....	52
III.2.1.3	La puissance éolienne incidente du vent	52
III.2.2	Coefficient aérodynamique de puissance C_p	52
III.2.3	La vitesse spécifique (Paramètre de rapidité)	53
III.2.3.1	L'équation analytique de C_p en fonction de λ	53
III.2.3.2	Le rendement aérodynamique de l'éolienne :	54
III.2.3.3	Le couple développé sur le rotor de l'éolienne	54
III.2.4	Fonction de probabilité de densité de Weibull :.....	54
III.2.5	La distribution de Rayleigh :.....	55
III.2.6	Loi de Davenport et Harris :	56
III.3	Modélisation d'un système de stockage (Batteries).....	56
III.3.1	Caractéristiques de la batterie.....	56
III.3.1.1	La tension à vide :	57
III.3.1.2	Cycles de charge.....	57
III.3.2	Modèle électrique de CIEMAT	57
III.3.3	Modélisation de la capacité C_{bat} :	58
III.3.3.1	Tension de batterie en régime de décharge :.....	59
III.3.3.2	Tension de batterie en régime de charge	59
III.3.3.3	Tension de batterie en régime de surcharge :.....	59
III.3.4	Modélisation du rendement faradique :.....	60

III.4	Modélisation du système hybride (photovoltaïque-éolien)	60
III.4.1	Capacité du système de stockage	61
III.4.2	Coefficient d'autonomie R :	61
III.4.3	Surfaces retenues des composantes renouvelables.....	61
	Conclusion	62
	Chapitre IV	47
	Introduction	64
IV.1	Présentation de logiciel HOMER PRO	64
IV.2	Les étapes du fonctionnement du logiciel HOMER	65
IV.2.1	Définir le projet	65
IV.2.2	Conception du système (Onglet Design).....	66
IV.2.2.1	Entrer la charge.....	66
IV.2.2.2	Entrer le détail des ressources.....	66
IV.2.2.3	Choisir les composantes.....	69
IV.2.2.4	Modèle des composants du système hybride	74
IV.3	L'analyse des résultats de la simulation (Onglet ResultView)	74
IV.4	L'analyse des résultats d'optimisation du système hybride PV-éolien (Onglet ResultView) ..	77
	Conclusion	79
	Conclusion générale	80
	Bibliographie	81

Liste des figures

Figure I- 1- Energie biomasse.....	3
Figure I-2-La géothermie.....	4
Figure I-3- La biogaz.....	5
Figure I-4- La biogaz.....	5
Figure I-5- énergie hydraulique.....	6
Figure I-6- système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien.....	9
Figure I-7- Classification des systèmes hybrides.....	11
Figure I -8-Système hybride à énergies renouvelables.....	12
Figure I-9-Structure de système hybride à bus à courant continu.....	13
Figure I-10-Structure de système hybride à bus à courant alternatif.....	14
Figure I-11-Structure de système hybride à bus à courant continu/courant alternatif.....	14
Figure I-12-Système hybride photovoltaïque –éolien-diesel.....	15
Figure I-13-Système hybride photovoltaïque -batterie et piles à combustible.....	15
Figure I-14-Système hybride photovoltaïque –éolien.....	16
Figure I-15- classification des différents dispositifs de stockage.....	18
Figure I-16- structure d'un condensateur.....	19
Figure I-17- structure d'un supercondensateur.....	20
Figure I-18- principaux éléments d'un dispositif de stockage d'énergie sous forme magnétique par bobine supraconductrice.....	21
Figure I-19- principe d'un accumulateur électrochimique.....	22
Figure I-20- accumulateur Li-ion.....	23
Figure I-21- accumulateur Pb-ac.....	23
Figure I-22- accumulateur Ni-Cd.....	24
Figure I-23- différentes possibilités de restitution de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké.....	25
Figure I-24- schéma de principe de fonctionnement d'une STEP.....	25
Figure I-25- schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé.....	26
Figure I -26- principaux composants d'un système de stockage électromécanique inertiel.....	27
Figure II-1- installation photovoltaïque autonome.....	33
Figure II-2- installation photovoltaïque couplé au réseau.....	34
Figure II-3-Chaîne de conversion à génératrice asynchrone à cage.....	36
Figure II-4-Chaînes de conversion à génératrice asynchrone à rotor bobiné.....	37
Figure II-5-Chaîne de conversion à génératrice asynchrone à cage et convertisseur de fréquence.....	38
Figure II-6-Chaîne de conversion à génératrice synchrone à rotor bobiné (ou à aimants) et convertisseur de fréquence.....	38
Figure II-7-Aérogénérateur à aimants débitant directement à travers un pont de diodes sur le bus continu.....	39
Figure II-8-différents systèmes de stockage les plus rependus dans les EnR.....	40
Figure II-9-critère de choix par densité de puissance.....	41
Figure III-1- Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	49
Figure III-2-Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée λ	54

Figure III-3-Distribution de la vitesse du vent et de l'énergie correspondante pour différents couples de paramètres de la distribution.	55
Figure III-4-Schéma équivalent électrique de la batterie dans le modèle CIEMAT	57
Figure IV-1-Modèle conceptuel du logiciel HOMER.	65
Figure IV-2-Écran d'accueil HOMER.	66
Figure IV-3-Charge primaire importée dans HOMER (avec spécifications de variabilité aléatoire).....	66
Figure IV-4-Rayonnement quotidien de Adrar région de Reggane.	67
Figure IV-5-Vitesse moyenne mensuelle du vent reçu.	68
Figure IV-6-Température de l'air ambiant moyenne mensuelle reçue.	68
Figure IV-7-Spécifications des modules solaires photovoltaïques.	70
Figure IV-8-Spécifications HOMER pour éolienne	71
Figure IV-9-Courbe de puissance d'éolienne.	71
Figure IV-10-Spécifications HOMER pour le système de stockage (batterie).....	72
Figure IV-11-Spécifications HOMER pour le convertisseur.....	73
Figure IV-12-Schéma du système hybride simulé (Source : HOMER Pro).	74
Figure IV-13-La charge primaire AC (bleu foncé), la charge primaire AC desservie (bleu) et la charge électrique non satisfaite (rouge).....	75
Figure IV-14-1Puissance de sortie photovoltaïque.	75
Figure IV-15-Puissance de sortie de l'éolienne.	76
Figure IV-16-État de charge du stockage de la batterie pendant un an.	76
Figure IV-17-Indicateurs de performance simulés pour le banc de batteries.	77
Figure IV-18-Résultat final du processus de simulation et d'optimisation.	77
Figure IV-19-Production et demande d'électricité pour le système photovoltaïque-éolien.....	78
Figure IV-20-Contribution des unités de puissance pour une utilisation à 100 % des énergies renouvelables.....	78

Liste des tableaux

Tableau I-Rayonnement solaire et vitesse du vent incluant la température moyenne.	69
Tableau II-Paramètres de conception des modules solaires photovoltaïques.....	70
Tableau III- Paramètres de conception de l'éolienne.	72
Tableau IV-Paramètres de conception des batteries.....	73

Introduction générale

Les systèmes de production d'énergie distribuée basés sur les énergies renouvelables, tels que les panneaux photovoltaïques et les éoliennes, sont utilisés pour réduire la consommation de carburant et les émissions de gaz à effet de serre. En raison du comportement intermittent de la vitesse du vent et du rayonnement solaire dans des conditions généralement imprévisibles, la production d'énergie photovoltaïque et la production d'énergie éolienne ont apporté plus d'incertitude au fonctionnement des micro-réseaux indépendants. Le principal défi de l'utilisation de l'énergie éolienne et solaire comme sources d'énergie est que lorsque l'électricité est nécessaire, l'énergie éolienne telle que l'énergie solaire peut ne pas être disponible. L'intégration de systèmes de stockage d'énergie pour réduire l'incertitude associée à la production d'énergie solaire et éolienne améliorera la fiabilité et la sécurité de la production d'électricité. Le système de stockage peut jouer un rôle déterminant dans la génération de l'énergie et ainsi lisser les variations de l'énergie produite sur un horizon temporel souhaité. Les systèmes de stockage peuvent également être utilisés pour atténuer les changements de puissance de charge.

Les systèmes d'énergie solaire/éolienne sont largement utilisés dans des applications autonomes, cependant, le comportement intermittent de l'irradiation et du vent affecte sérieusement la stabilité de la production. En effet, l'énergie photovoltaïque ne peut pas être utilisée la nuit, par temps nuageux ou par temps de neige. Lorsque l'électricité est nécessaire, tout comme l'énergie éolienne, elle n'existe pas en l'absence de vent. L'extraction d'une puissance maximale à partir de sources de nature fluctuante est un problème majeur. L'algorithme de suivi du point de puissance maximale est largement utilisé dans la littérature pour résoudre ce problème. La plupart des recherches sur le stockage des batteries concernent les applications mobiles et les véhicules électriques. Nous vous proposons ici un système de stockage couplé à une production solaire éolienne monté sur une charge variable allant jusqu'à 40KW. L'intégration de systèmes de stockage est nécessaire afin de restaurer la production excédentaire ou de fournir des pics de demande occasionnels dans cette situation particulière.

Le présent travail se situe donc dans un souci d'exploitation du potentiel en énergie renouvelable d'un système hybride Solaire-Éolien avec récupération d'énergie. Nous avons pour

tâche la modélisation et la simulation d'un système de stockage associé au dit système hybride pour l'exploitation efficace et simultanée de ces deux formes d'énergie.

Pour atteindre un tel objectif, nous avons élaboré un plan d'étude scindé par des chapitres :

Premièrement, une généralité et état de l'art sur le stockage d'énergie dans un système hybride photovoltaïque éolienne.

Deuxièmement, Choix et modélisation des différents éléments du système étudié.

Finalement, Simulation et interprétation des résultats obtenu dans notre étude « stockage d'un système hybride monté sur une charge variable allant jusqu'à 40KW.

Chapitre I

Généralités et état de l'art sur les énergies renouvelables et les systèmes hybride

Introduction

Actuellement, de nombreux villages et villes des pays sous-développés, en développement et même développés souffrent encore d'un manque d'électricité. Cependant, l'électricité est la forme d'énergie la plus simple disponible aujourd'hui. Mais avant de le consommer, il faut la produire, la transformer, puis la transporter aux consommateurs. Dans les pays industrialisés, ce système est désormais très centralisé, même si l'évolution des réglementations tend à amorcer une décentralisation de la production. Compte tenu de la difficulté d'assurer l'extension du réseau électrique aux zones reculées et des inconvénients environnementaux et économiques de l'utilisation de combustibles fossiles, les défis énergétiques auxquels le monde est confronté nécessitent une plus grande attention aux énergies renouvelables. La solution technique proposée est basée sur l'énergie photovoltaïque et éolienne, et les générateurs peuvent produire de l'électricité pour répondre à la demande d'énergie. Mais l'une des contraintes qui limitent l'utilisation de ces technologies dans les zones reculées est la variabilité et la disponibilité de l'énergie. En effet, s'il n'y a ni soleil ni vent, les systèmes photovoltaïques et les systèmes éoliens ne produiront pas d'électricité. Afin d'assurer l'autonomie et la sécurité d'approvisionnement énergétique, il est nécessaire d'envisager d'inclure un système de récupération d'énergie afin d'optimiser la combinaison de ces deux sources pour fournir une alimentation électrique continue et stable. Au cours des dernières décennies, le problème énergétique est devenu un véritable problème à l'échelle mondiale. On estime que près de 80 % de la production mondiale totale d'énergie primaire provient d'énergies fossiles telles que le pétrole, le gaz naturel, le charbon et l'énergie nucléaire., etc. (1)

I.1 Les énergies renouvelables

I.1.1 Définition

Les énergies renouvelables sont importantes pour les êtres humains depuis le début de la civilisation. Elles présentent le plus grand taux de croissance parmi les sources d'énergie.

Certains nombres de facteurs sont à l'origine de cette attention accrue sur les sources d'énergies renouvelables. Les inquiétudes sur la volatilité des prix du pétrole, la dépendance sur les sources d'énergie étrangères, et les conséquences environnementales par les émissions de gaz à effet de serre sont tous des facteurs contribuant à l'intérêt actuel pour les sources d'énergie renouvelables. De plus, l'émergence de politiques gouvernementales a été essentielle dans la

promotion des énergies renouvelables comme solution viable, composante du portefeuille d'énergie des différents pays. Les sources d'énergies renouvelables (à l'exception de l'hydroélectricité) continueront d'offrir plus de potentiel que la production actuelle basée sur les sources d'énergie fossile. (2)

I.1.2 Les différents types des énergies renouvelables

Compte tenu de deux usages importants de l'énergie, chaleur et électricité, on classera les énergies renouvelables en deux groupes :

I.1.2.1 La production de chaleur par les sources renouvelables

a. La biomasse :

Représentant toute la matière organique, qu'elle soit d'origine végétale ou animale. Il peut provenir des forêts, des milieux marins et aquatiques, des parcs et jardins, des industries qui produisent des sous-produits, des déchets organiques ou des eaux usées du bétail. C'est la principale source d'énergie pour la cuisine et le chauffage, y compris tous les produits obtenus à partir de végétaux ou de résidus végétaux, séchés ou déshydratés, tels que le bois, la paille de riz, le grignon d'olive, peut être utilisée par combustion ou métabolisme.

Cependant, pour devenir une véritable source d'énergie renouvelable, la quantité brûlée ne doit pas dépasser la quantité produite. Selon les besoins, il peut générer de la chaleur ou de l'électricité. En conséquence, par rapport aux autres sources d'énergie, sa participation à la production mondiale d'énergie est énorme.

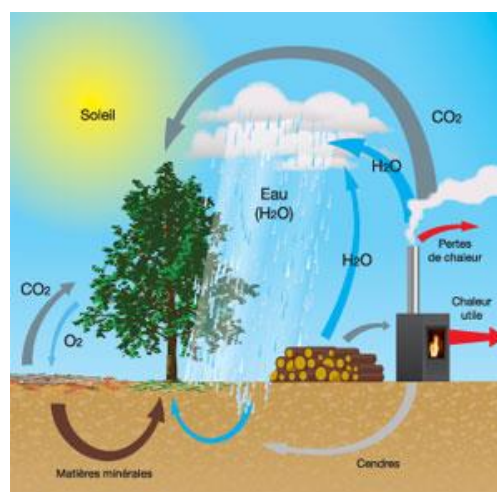


Figure I- 1- Energie biomasse

b. La géothermie :

Le mot « géothermie » recouvre les Méthodes de captage de la Chaleur intérieure terrestre et l'utiliser comme source de chaleur ou la convertir en énergie électrique grâce à des turbines et des générateurs électriques. Afin de capter cette énergie, des fluides circulent dans les profondeurs terrestres. Ces fluides peuvent être des fluides injectés dans des roches imperméables chaudes ou des couches d'eau captives naturelles dans des puits spéciaux. Dans tous les cas, le fluide (eau) se réchauffe et monte à mesure que la température augmente (3)

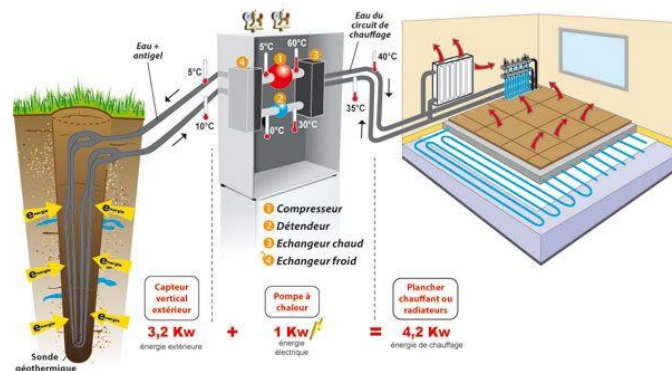


Figure I-2-La géothermie.

c. La méthanisation – le biogaz :

Ce sont les matières organiques qui libèrent le biogaz lors de leur décomposition selon un processus de fermentation (méthanisation). On l'appelle aussi « gaz naturel renouvelable » ou encore « gaz de marais », par opposition au gaz d'origine fossile.

Mélange de méthane et de gaz carbonique additionné de quelques autres composants, le biogaz est un gaz combustible. Il sert à la production de chaleur, d'électricité ou de biocarburant.

Le biogaz peut être directement capté dans les centres d'enfouissement des déchets ou produit dans des unités de méthanisation.

Sous-produits de l'industrie agro-alimentaire, boues des stations d'épurations, lisiers, animaux ou déchets agricoles peuvent être méthanisés dans des unités industrielles. (4)

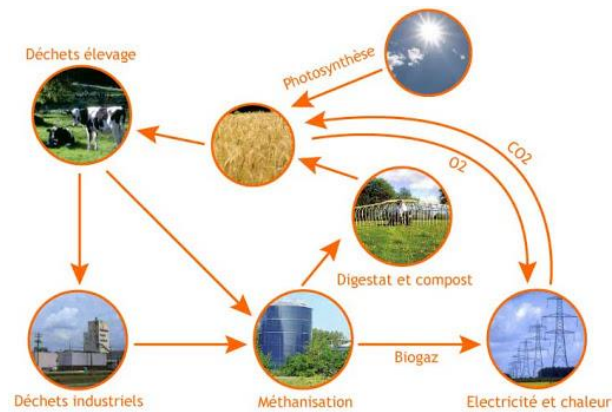


Figure I-3- La biogaz.

d. Le solaire thermique :

Le solaire thermique basse température permet essentiellement le chauffage de l'eau sanitaire et, dans une moindre mesure, la production combinée de chauffage par plancher chauffant (plancher solaire direct). Cette application de l'énergie solaire, industrialisée depuis plus de 25 ans, est actuellement en phase de croissance accélérée aux États-Unis, au Japon et en Europe. (5)

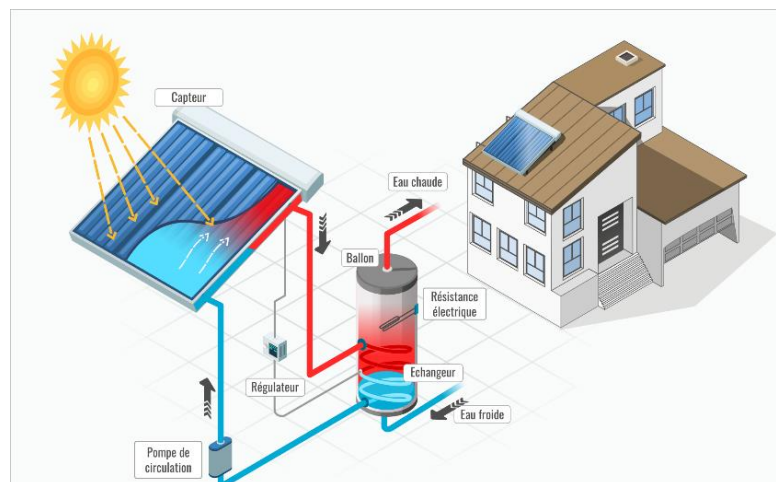


Figure I-4- La biogaz.

I.1.2.2 La production d'électricité par les énergies renouvelables

Les sources d'énergie disponibles dans notre environnement proche et permettant de produire de l'électricité sont : l'eau, le soleil et le vent. Directement compétitives pour les sites isolés (les coûts de raccordement au réseau électrique sont très élevés), les centrales électriques à sources renouvelables peuvent aussi, sous certaines conditions, être directement raccordées au réseau.

a. Énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique permet de fabriquer de l'électricité, dans les centrales hydroélectriques, grâce à la force de l'eau. Cette force dépend soit de la hauteur de la chute d'eau (centrales de haute ou moyenne chute), soit du débit des fleuves et des rivières (centrales au fil de l'eau).

L'énergie hydraulique dépend du cycle de l'eau. Elle est la plus importante source d'énergie renouvelable.

Sous l'action du soleil, l'eau des océans et de la terre s'évapore. Elle se condense en nuages qui se déplacent avec le vent. La baisse de température au-dessus des continents provoque des précipitations qui alimentent l'eau des lacs, des rivières et des océans.

Une centrale hydraulique est composée de 3 parties :

- Le barrage qui retient l'eau.
- La centrale qui produit l'électricité.
- Les lignes électriques qui évacuent et transportent l'énergie électrique. (6)

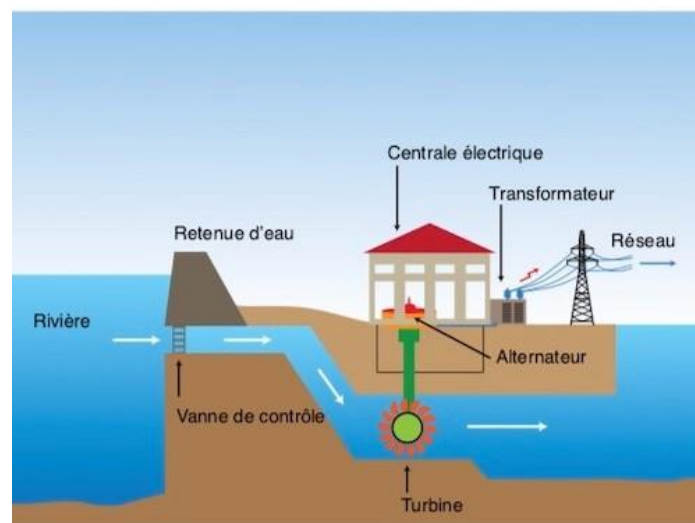


Figure I-5- énergie hydraulique.

b. Le solaire photovoltaïque :

L'élément de base de l'énergie solaire photovoltaïque est la cellule photovoltaïque : exposée à la lumière, elle absorbe l'énergie des photons lumineux -- d'une partie d'entre eux. Ceux-ci mettent en mouvement des électrons qui sont attrapés par un champ électrique interne. Les électrons collectés à la surface de la cellule génèrent un courant électrique continu.

Car rappelons qu'une cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de matériaux semi-conducteurs. Du silicium, essentiellement, de nos jours. On y trouve plus précisément, deux types de semi-conducteurs : l'un présentant un excès d'électrons et l'autre, un déficit d'électrons. Les spécialistes parlent de dopage. Ainsi l'une des couches de la cellule solaire photovoltaïque en silicium va, par exemple, comporter des atomes de phosphore -- avec un électron de plus que le silicium -- et l'autre, des atomes de bore -- avec un électron en moins. Lorsque les deux couches sont mises en contact, les électrons proches de la jonction ont tendance à diffuser de la couche où ils sont en excès vers l'autre. Le tout créant un champ électrique interne indispensable au fonctionnement de la cellule. Lorsque la cellule capte des photons, ceux-ci excitent des électrons du matériau semi-conducteur qui vont alors diffuser vers la zone de jonction entre les deux couches précitées. Et c'est le champ électrique interne qui va les accélérer et les orienter jusqu'à un circuit extérieur. (7)

c. L'éolien

L'énergie éolienne est l'énergie du vent, dont la force motrice (énergie cinétique) est utilisée dans le déplacement de voiliers et autres véhicules ou transformée au moyen d'un dispositif aérogénérateur, comme une éolienne ou un moulin à vent, en une énergie diversement utilisable. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.

L'énergie éolienne est une source d'énergie intermittente qui n'est pas produite à la demande, mais selon les conditions météorologiques ; elle nécessite donc des installations de production ou de stockage en remplacement pendant ses périodes d'indisponibilité. Celles-ci peuvent être prévues avec une assez bonne précision. La part de l'éolien dans la production mondiale d'électricité atteignait 4,8 % en 2018 et est estimée à 5,3 % en 2019. Les principaux pays producteurs sont la Chine (28,4 % du total mondial en 2019), les États-Unis (21,2 %) et l'Allemagne (8,8 %).

L'énergie éolienne est une source d'énergie intermittente qui n'est pas produite à la demande, mais selon les conditions météorologiques ; elle nécessite donc des installations de production ou de stockage en remplacement pendant ses périodes d'indisponibilité. (8)

I.1.3 Les avantages et inconvénients des énergies renouvelables

I.1.3.1 Les avantages

- Sûreté : En les utilisant en majorité, on retrouverait une stabilité climatique, économique, environnementale et sociale surtout en développant de grandes centrales

thermiques. La sûreté est l'un des avantages principaux, car il existe de très faibles risques d'accident.

- Peu de déchets : Elles génèrent également peu de déchets, et ces déchets sont parfois recyclables.
- La décentralisation des énergies renouvelables est aussi un facteur positif très important pour développer certains territoires et le développement local. Le marché du travail concernant ces énergies représente presque un million deux cent mille emplois surtout dans le photovoltaïque, l'éolien et la biomasse. Ces énergies respectent l'environnement pendant leur fabrication, leur fonctionnement et lors de leur fin de vie, au moment de leur démantèlement. (9)

I.1.3.2 Les inconvénients

- Leur disponibilité dépend du climat. Pour celles fonctionnant au solaire, il n'est possible d'utiliser que 50 % de leur capacité réelle dans les zones équatoriales et encore moins à cause de la disparition du soleil pendant plusieurs mois dans les pôles. En outre, quand le ciel est nuageux, le rayonnement solaire est moindre. Lors de périodes anticycloniques, il n'y a pas de vent. Cette énergie n'est pas très stable.
- La responsabilité sur le réchauffement climatique des énergies renouvelables est un inconvénient majeur. Elles sont souvent présentées et admises pour justement résoudre ce problème, mais pour que ce soit réel, il faudrait diminuer considérablement la consommation des énergies fossiles comme le pétrole, le charbon ou le gaz et mieux maîtriser l'énergie renouvelable pour l'économiser davantage.
- L'impact visuel sur le paysage est à prendre en compte surtout lors de constructions de grandes centrales solaires ou de champs d'éoliennes. Ces productions décentralisées aideraient à diminuer le nombre de lignes à haute tension. Elles restent donc une pollution pour la faune. De plus, les expériences menées déjà dans certains pays montrent qu'elles aident à l'accroissement de ces mêmes lignes.
- Les problèmes majeurs pour la faune sont les barrages hydroélectriques, car ils inondent des vallées entières et ont un fort impact négatif sur l'écosystème. Les poissons migrent difficilement vers leurs lieux de reproduction - même si des passes à poissons ont été construites. Les éoliennes sont un danger pour les oiseaux et les chauves-souris. (9)

I.2 Les systèmes électriques hybrides

I.2.1 Introduction

Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables. Il consiste en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie par une meilleure disponibilité. 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 (Fig. I-6).



Figure I-6- système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien.

A : Panneau Photovoltaïque / a : Parafoudre / B : Éolienne / m : Moniteur de batterie

R : Chargeur de batterie / S : Sectionneur / 1 : Disjoncteur de protection / 2 : Régulateur charge/décharge / 3 : Disjoncteur CC / 4 : Batterie / 5 : Onduleur / 6 : Coffret de branchement électrique / 7 : Charge électrique

I.2.2 Classification

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Dans la suite sont présentées les classifications les plus répandues. (10)

I.2.2.1 Le régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi

connectés réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc. (10)

I.2.2.2 La structure du système hybride

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. (10)

La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, 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 I-7. (10)

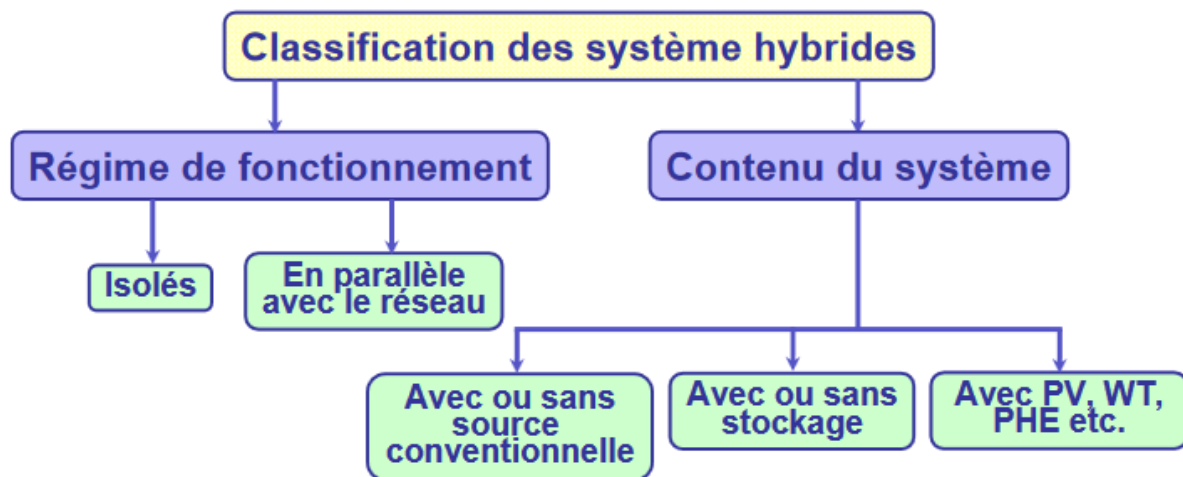


Figure I-7- Classification des systèmes hybrides.

I.2.3 Importance de l'hybridation

Aujourd'hui, il est devenu impératif pour les chercheurs de trouver en dehors des énergies fossiles et fissiles d'autres sources d'énergie propre et renouvelable. Il s'agit entre autres des énergies provenant des sources comme le soleil, le vent, la géothermie, la biomasse et l'océan. Ces sources d'énergie propre et durable sont favorables à l'environnement contrairement aux sources d'énergie conventionnelles. Toutefois, ces sources d'énergies renouvelables varient en fonction du temps de la journée, de la saison et de l'année. La nature aléatoire de ces sources a conduit les chercheurs à se tourner vers l'hybridation, c'est-à-dire la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergies renouvelables. L'hybridation apporte donc au système une disponibilité accrue et un approvisionnement constant des charges en énergie. D'après le Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne de l'Université du Québec à Rimouski, la combinaison de plusieurs sources d'énergie, surtout les renouvelables, permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique. L'hybridation des sources d'énergies renouvelables a un intérêt considérable par leur flexibilité incomparable, leur souplesse de fonctionnement et leur prix de revient attractif. De plus, l'hybridation permet de :

- Lisser la puissance délivrée par la source d'énergie ;
- Palier pendant une durée limitée une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie.

Cependant, ces solutions exigent un dimensionnement laborieux préalable basé sur une connaissance approfondie du gisement en énergies renouvelables du site d'implantation en amont, une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite à l'aval. Cette gestion rigoureuse de l'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle. (11)

I.2.4 Combinaisons des systèmes hybrides à énergie renouvelable :

Il existe plusieurs structures ou dispositions de systèmes hybrides à énergies renouvelables. L'électronique de puissance est très importante dans un système hybride à énergies renouvelables (Fig.2.1). Les systèmes de stockage comme les batteries et le stockage d'hydrogène (piles à combustible) sont habituellement utilisés. (11)

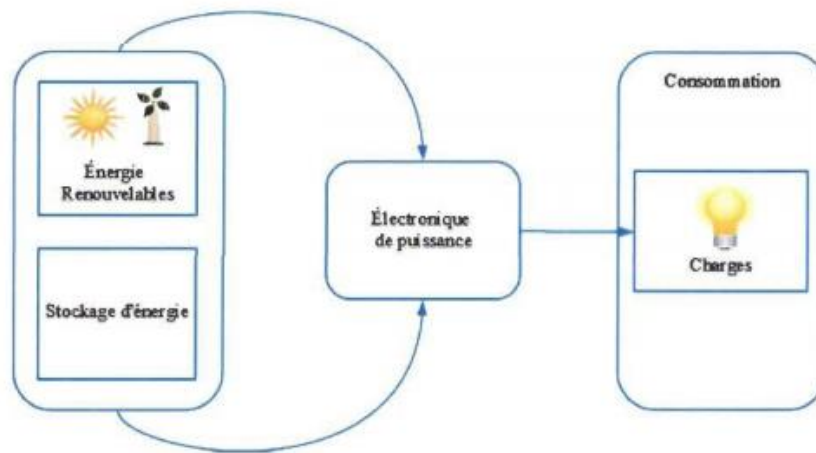


Figure I -8-Système hybride à énergies renouvelables.

Un système hybride à énergies renouvelables combine deux ou plusieurs technologies d'énergies renouvelables comme les panneaux photovoltaïques, les éoliennes, les petites turbines hydroélectriques, etc. En outre, il comprend des équipements d'électronique de puissance et des systèmes de stockage. Trois architectures s'imposent parmi les SHER à savoir : architecture à bus CC, architecture à bus CA et architecture mixte à bus CC-CA. (11)

I.2.4.1 Architecture à bus CC

Dans cette architecture (Figure I-4), les composants de production d'énergie (électricité) sont tous connectés au bus à courant continu CC à travers des convertisseurs de puissance. Les composants de production d'énergie à CA sont d'abord connectés à un redresseur qui se chargera de la conversion CA-CC. Le système de stockage (par exemple une batterie ou un accumulateur électrochimique) est connecté au bus CC. Généralement, les batteries sont protégées contre la

surcharge et la décharge profonde par un régulateur de charge. Les charges à courant alternatif peuvent être alimentées en énergie à travers un onduleur. Les batteries et les convertisseurs sont dimensionnés pour alimenter des pics de charge. L'avantage d'une telle architecture réside dans sa simplicité, ce qui permet de simplifier le système de commande. Cependant, le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs. (11)

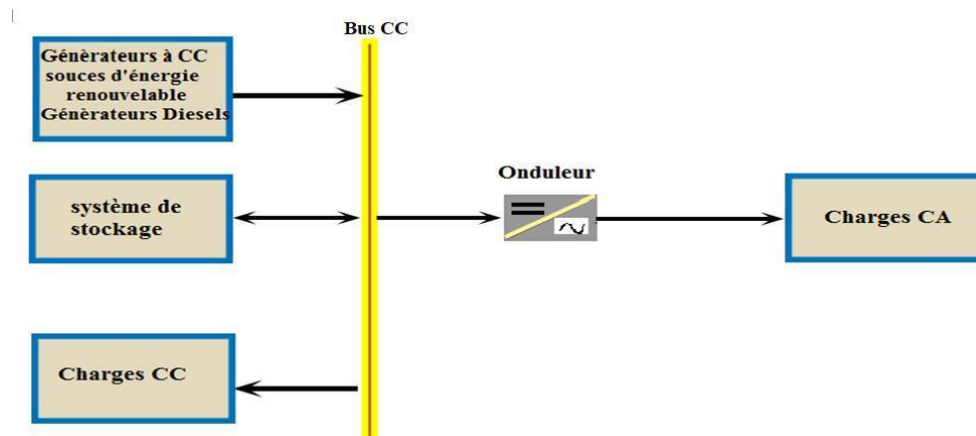


Figure I-9-Structure de système hybride à bus à courant continu.

I.2.4.2 Architecture à bus CA

La puissance fournie par chaque composant de production d'électricité est centralisée sur un bus à courant alternatif (CA). Les générateurs CA peuvent être directement connectés sur le bus CA ou avoir besoin d'un convertisseur CA/CA. Les générateurs CC utilisent un onduleur pour être connectés sur le bus CA. Les batteries sont liées au bus CA à travers un convertisseur bidirectionnel. Les charges CC peuvent éventuellement être alimentées par les batteries. (11)

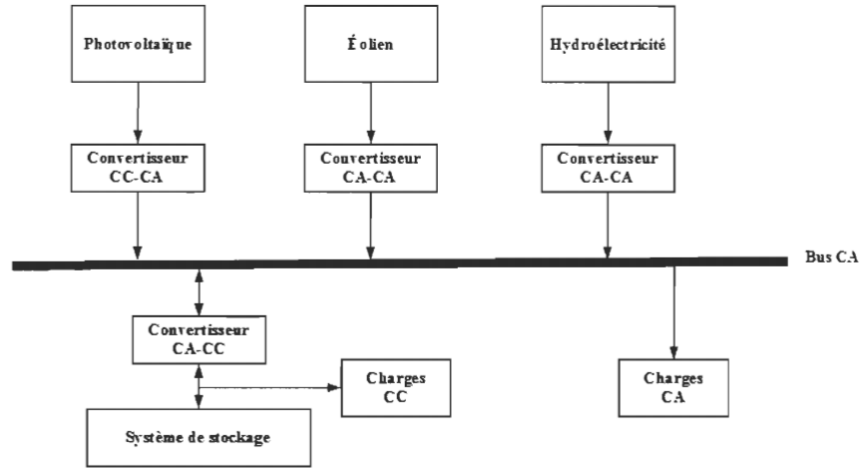


Figure I-10-Structure de système hybride à bus à courant alternatif.

I.2.4.3 Architecture mixte à bus CC/CA

Dans la configuration à deux bus, les sources d'énergie renouvelable peuvent alimenter une partie de la charge en CA et l'autre partie en CC. Les deux bus doivent être reliés par un convertisseur bidirectionnel. (11)

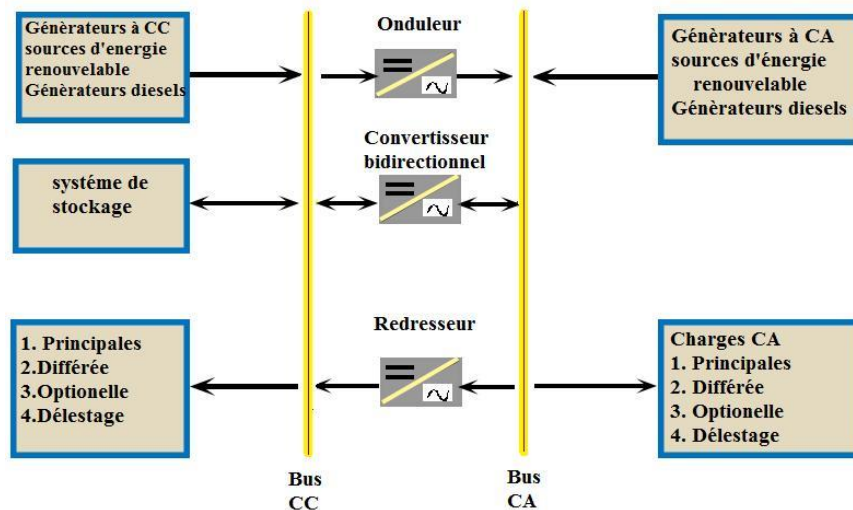


Figure I-11-Structure de système hybride à bus à courant continu/courant alternatif.

I.2.5 Les différentes combinaisons des systèmes hybrides

I.2.5.1 Système hybride photovoltaïque –éolien-diesel

Les systèmes hybrides connectent l'énergie photovoltaïque et / ou éolienne à d'autres sources d'énergie. Habituellement, cela comprend les éoliennes et les générateurs de secours au diesel, au propane ou à l'essence. Ce système peut convenir aux bâtiments résidentiels ou

commerciaux qui ne sont pas connectés au réseau de distribution La plupart des systèmes hybrides sont équipés de batterie. (12)

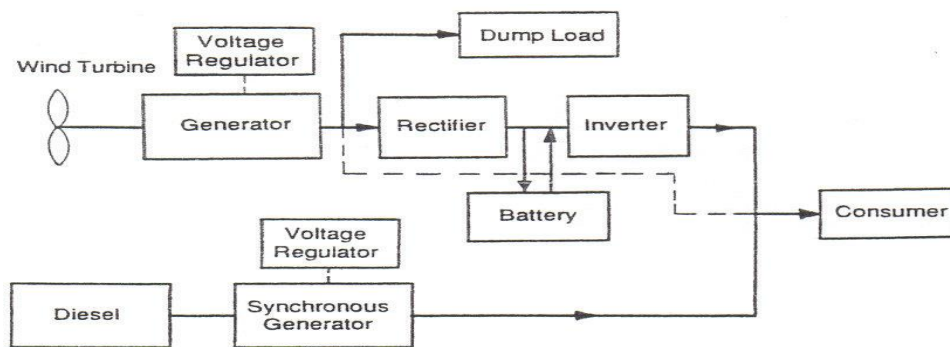


Figure I-12-Système hybride photovoltaïque –éolien-diesel.

I.2.5.2 Système hybride photovoltaïque-batterie et piles à combustible

Le générateur diesel de ce système est remplacé par un système de pile à combustible. (12)

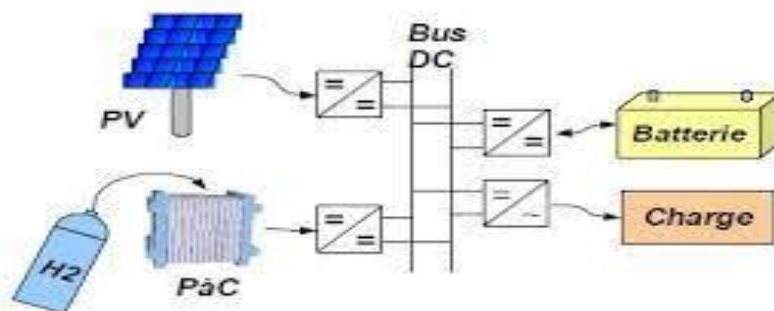


Figure I-13-Système hybride photovoltaïque -batterie et piles à combustible.

I.2.5.3 Système hybride photovoltaïque –éolien

L'utilisation du stockage électrochimique pour optimiser l'énergie éolienne et photovoltaïque dépend largement du modèle économique de chaque système. Cette configuration se compose de deux sources d'énergie complémentaires (photovoltaïque et éolien) et d'une batterie. (12)

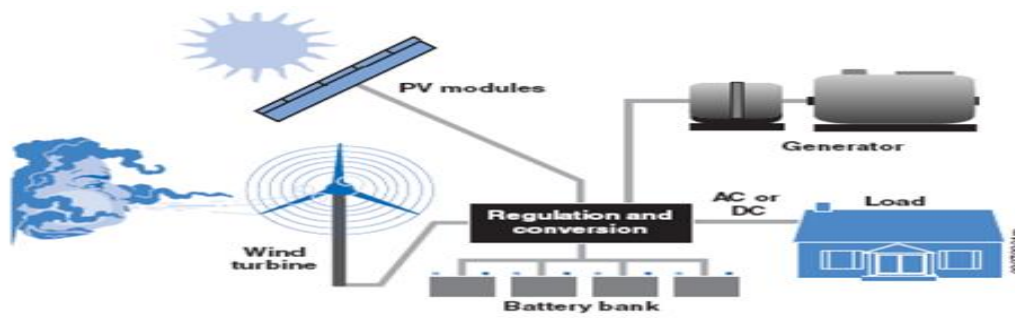


Figure I-14-Système hybride photovoltaïque –éolien.

I.2.6 Avantages et inconvénients d'un système hybride

I.2.6.1 Avantages

- ✓ Ne repose pas sur une seule source d'énergie.
- ✓ Capable de répondre à la charge évolutive, Opération simple, réduisant l'entretien et la révision.
- ✓ Faibles coûts associés au cycle de vie de l'application. (13)

I.2.6.2 Inconvénients

- ✓ Comparé aux générateurs diesel, le coût en capital est élevé.
- ✓ Plus complexe qu'un système électrique isolé, nécessite un stockage par batterie et un conditionnement d'alimentation. (13)

I.3 Stockage d'énergie

I.3.1 Définition

Le stockage de l'énergie est aujourd'hui reconnu comme un élément clé de la chaîne d'approvisionnement énergétique moderne. Cela est principalement dû au fait qu'il peut renforcer la stabilité du réseau, augmenter la pénétration des ressources énergétiques renouvelables, améliorer l'efficacité des systèmes énergétiques, conserver les ressources énergétiques fossiles et réduire l'impact de la production d'énergie sur l'environnement. Bien que de nombreuses technologies de stockage d'énergie aient déjà été passées en revue dans la littérature, ces technologies ont actuellement différents niveaux de maturité technologique et quelques-unes ont déjà fait leurs preuves pour une application à l'échelle commerciale. La plupart des travaux de synthèse sur le stockage de l'énergie évoquent toutefois en détail ces technologies qu'il en reste peu d'informations sur l'application réelle de ces technologies à des

fins de stockage d'énergie. Dans les auteurs ont effectué une synthèse visant à combler cette lacune en fournissant une analyse détaillée des applications et des performances réelles des différentes technologies de stockage d'énergie. Dans ce chapitre un accent particulier sera mis sur l'investigation des différentes technologies de stockage électrique et leurs applications ; une analyse détaillée des différents systèmes de stockage sera évoquée. Finalement une comparaison selon quelques critères fondamentaux sera ensuite élaborée et un choix sera retenu. (14)

I.3.2 Avantages techniques et économiques du stockage d'énergie

Le stockage d'énergie présente de nombreux avantages. C'est important dans la gestion de l'énergie. Il contribue à réduire le gaspillage d'énergie et à augmenter 54 l'efficacité d'utilisation de l'énergie des systèmes de traitement. Le stockage de formes d'énergie secondaire telles que la chaleur et l'électricité contribue à réduire la quantité d'énergie primaire consommée (combustibles fossiles) pour les générer. Cela, non seulement réduit les émissions de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre ainsi que le réchauffement planétaire associé, mais contribue également à la préservation des combustibles fossiles considérés comme étant épuisables. Il peut également jouer un rôle crucial dans l'augmentation de la pénétration des énergies renouvelables, propres et intermittentes. Des ressources énergétiques telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire et les courants de marée marins menant au réseau et facilitent le transfert de charge. Le stockage d'énergie aide à la planification, à l'exploitation et à la régulation de la fréquence du réseau électrique. Il contribue à maintenir la stabilité des systèmes énergétiques, à améliorer la qualité de l'énergie dans les systèmes de micro-réseaux et à faire correspondre la demande à l'offre. (15)

I.3.3 Stockage et énergies renouvelables

Le développement et l'utilisation des énergies renouvelables ont connu une croissance rapide au cours des dernières années. Au cours des prochaines années, tous les systèmes d'énergie durable devront reposer sur l'utilisation rationnelle des ressources traditionnelles et une utilisation accrue des énergies renouvelables. La production électrique décentralisée à partir de sources d'énergie renouvelable permet aux consommateurs de disposer d'un approvisionnement plus sûr, tout en réduisant les risques pour l'environnement. Cependant, le caractère imprévisible de ces sources nécessite que des règles d'approvisionnement et/ou de réseau soient établies pour un fonctionnement optimal du système. Les ressources renouvelables ont un inconvénient majeur : elles fluctuent indépendamment de la demande.

Pourtant, ils sont nombreux et les systèmes de conversion deviennent de plus en plus abordables. Leur contribution importante à 55 l'utilisation durable de l'énergie nécessitera toutefois un développement considérable des méthodes de stockage. Cela ouvrira un nouveau champ d'application, notamment en raison de la croissance de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables, ainsi que de la production décentralisée. (15)

I.3.4 Les différents systèmes de stockage

Le stockage de l'électricité peut être réalisé efficacement. Initialement, il doit être transformé en une autre forme d'énergie stockable et être reconverti en cas de besoin. Il existe de nombreuses techniques possibles de stocker de l'énergie, que l'on retrouve dans pratiquement toutes les formes d'énergie : mécanique, chimique et thermique. Les technologies de stockage répondant à des critères techniques et économiques spécifiques, qui varient considérablement en fonction des applications et des besoins, seront évidemment de types différents. Les technologies sont nombreuses, mais une étude comparative est rendue difficile par le fait que, entre autres, leur niveau de développement varie considérablement. Il existe différentes technologies de stockage d'énergie électrique, chacune adaptée à leur domaine d'application. En général, plusieurs critères sont analysés lors de la considération et du choix des technologies du système de stockage pour une application spécifique. Ces critères incluent la durée de vie le cycle de vie, la puissance et l'énergie, les taux d'autodécharge, l'impact sur l'environnement, l'efficacité du cycle, le coût en capital, la durée de stockage et la maturité technique. Selon la nature du stockage, on peut distinguer le. Stockage direct et le stockage indirect (15) comme l'illustre la classification suivante :

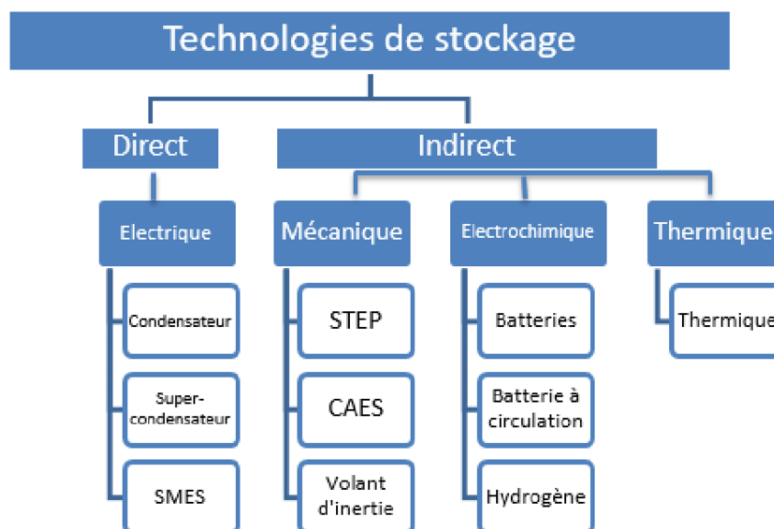


Figure I-15- classification des différents dispositifs de stockage.

I.3.4.1 Stockage d'énergie directe

Ce sont des techniques qui permettent de stocker directement l'énergie sous forme électrique. Il s'agit des Condensateurs, des supercondensateurs et des Inductance supraconductrice, ces techniques de stockage sont considérées comme des sources de puissance à cause de leur grande puissance spécifique et de leur faible densité. (16)

a. Condensateur

Un condensateur est un composant de stockage électrostatique, sa structure est donnée par :

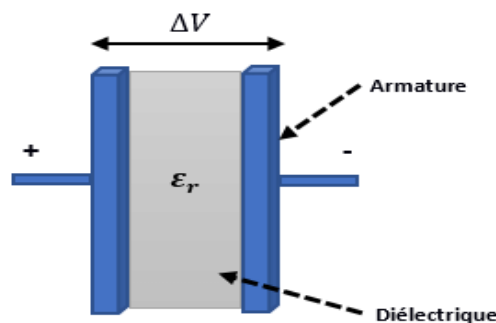


Figure I-16- structure d'un condensateur.

- Principe :

Le condensateur permet d'emmagasiner transitoirement une charge électrique entre deux électrodes séparées par un isolant diélectrique. En fonction de la nature des électrodes et de l'isolant, on peut distinguer plusieurs familles de condensateurs : le condensateur céramique, le condensateur électrochimique ou électrolytique et le condensateur à film plastique. (16)

b. Supercondensateur

Un supe-condensateur est formé de deux collecteurs métalliques généralement en aluminium, de deux électrodes conductrices électroniques à très haute surface spécifique plongées dans un électrolyte et d'une membrane de séparation poreuse (Figure 3). (16)

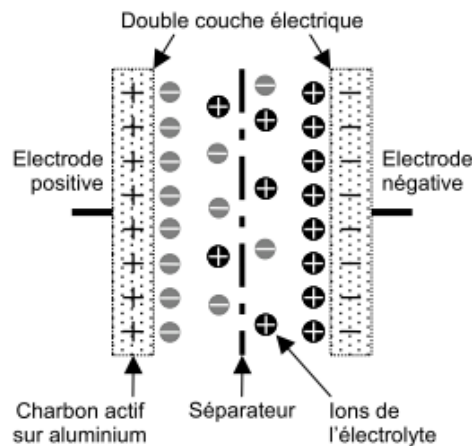


Figure I-17- structure d'un supercondensateur.

- Principe :

Le fonctionnement d'un supercondensateur est basé sur le stockage de l'énergie par distribution des ions provenant de l'électrolyte au voisinage de la surface des deux électrodes. En effet, lorsque l'on applique une tension aux bornes d'un supercondensateur, on crée une zone de charge d'espace aux deux interfaces électrode-électrolyte. C'est ce que l'on appelle la double couche électrique. Ainsi, dans le supercondensateur, l'énergie est stockée sous forme électrostatique. (16)

c. Inductances supraconductrices

Une station de stockage électromagnétique se compose principalement d'enroulements supraconducteurs appelés bobines supraconductrices connectées à un générateur par des transformateurs et des convertisseurs alternatif-continu à thyristors (Figure 4) (16)

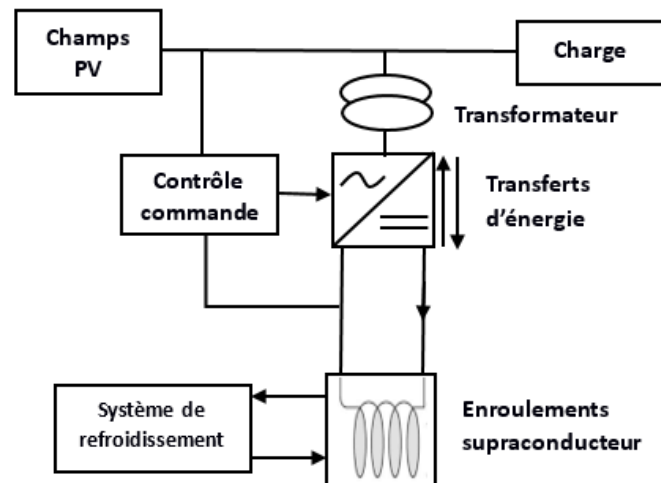


Figure I-18- principaux éléments d'un dispositif de stockage d'énergie sous forme magnétique par bobine supraconductrice.

- Principe :

Le stockage d'énergie dans une inductance supraconductrice est fait sous forme de champ magnétique, lorsqu'on fait passer un courant électrique continu dans une bobine supraconductrice court-circuitée. Le courant circule sans perte par effet Joule dans la bobine supraconductrice et stocke ainsi une certaine quantité d'énergie pour une durée théoriquement infinie. La bobine est réalisée en matériau supraconducteur (matériau à très basses températures proches du zéro absolu 4,2 K) dans le but que l'énergie stockée ne soit pas dissipée par effet joule. La résistance ohmique du supraconducteur étant nulle, les seules pertes sont dues aux résistances de contacts et à la puissance nécessaire pour maintenir la bobine froide (environ $-269,5\text{ °C}$). Pour récupérer l'énergie stockée, il suffit d'ouvrir le circuit et de le brancher sur un récepteur électrique à alimenter. L'énergie stockée dans la bobine supraconductrice est transférée en un temps très court (50% en moins d'une seconde). (16)

I.3.4.2 Stockage d'énergie indirect

Pour stocker l'énergie de façon significative et l'utiliser sur de longues périodes, il est nécessaire de la transformer d'abord en une autre forme d'énergie intermédiaire et stockable (potentielle, cinétique, chimique ou thermique). (16)

a. Accumulateurs électrochimiques

Une batterie est constituée d'un assemblage en série et/ou en parallèle d'accumulateurs électrochimiques. Chaque accumulateur est constitué de deux électrodes, l'une positive et

l'autre négative séparée par un électrolyte. L'accumulateur est un générateur électrochimique capable de fournir une énergie électrique à partir d'une énergie stockée chimiquement. Cette conversion d'énergie est réversible pour un accumulateur, contrairement à une pile. (16)

- Principe :

Aux interfaces électrodes-électrolyte de l'accumulateur interviennent des réactions électrochimiques d'oxydation ou de réduction des matières actives des électrodes : - au niveau de l'anode (électrode négative en décharge), s'effectue une réaction d'oxydation suivant la relation $M1 \rightarrow M1^{n+} + ne^-$ de potentiel redox $E1$; - à la cathode (électrode positive en décharge), les électrons libérés à l'anode transitent par le circuit extérieur pour atteindre la cathode où s'opère une réaction de réduction suivant l'équation $M2^{n+} + ne^- \rightarrow M2$ de potentiel redox $E2$. $M1$ et $M2$ représentent respectivement les espèces actives à l'anode et à la cathode. L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydoréduction, qui s'écrit $M1 + M2^{n+} \rightarrow M1^{n+} + M2$. Le transport engendre une force électromotrice $E = E2 - E1$. Durant la charge, le phénomène s'inverse. La Figure I-12 montre le principe de fonctionnement d'un accumulateur électrochimique. (16)

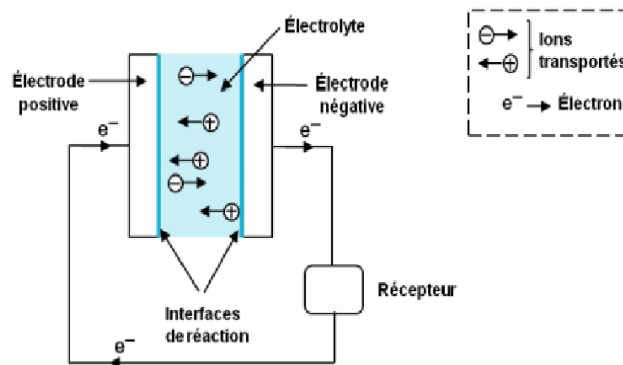


Figure I-19- principe d'un accumulateur électrochimique.

- Différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques :

Différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques dont les plus utilisées sont : lithium-ion, plomb-acide et nickel-cadmium.

- Accumulateurs au lithium-ion (Li-ion) :

Durant la charge, les ions lithium viennent s'insérer dans la structure de l'électrode négative en carbone graphité. Lors de la décharge, l'anode libère ces ions qui viennent se placer dans

la structure de la cathode. L'équation électrochimique globale est la suivante : $Li + MI \rightarrow LiMI$ MI le matériau d'insertion (graphite, coke ...) placé à l'électrode positive. Par rapport aux batteries au plomb, les batteries au lithium-ion n'ont pas besoin de maintenance. Elles ont une durée de vie assez importante et présentent une plus grande résistance aux conditions extérieures. La tension d'un accumulateur lithium-ion varie de 2,5V (état de charge minimum) à 3,7V (état de charge maximum). (16)



Figure I-20- accumulateur Li-ion.

- Accumulateurs au plomb-acide (Pb-ac) :

La batterie au plomb-acide est la technologie la plus ancienne et la plus utilisée dans le monde. Son électrolyte est une solution aqueuse d'acide sulfurique, l'électrode positive est constituée d'oxyde de plomb PbO_2 et l'électrode négative de plomb Pb . La réaction mise en jeu est la suivante : $Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \rightleftharpoons 2PbSO_4 + 2H_2O$. La tension aux bornes d'un accumulateur varie de 1,7V (état de charge minimum) à 2,5V (état de charge maximum). (16)



Figure I-21- accumulateur Pb-ac.

- Accumulateurs au nickel cadmium (Ni-Cd) :

Les accumulateurs au nickel-cadmium offrent des performances supérieures au plomb en termes de capacité et de durée de vie. Cependant leur prix est nettement plus élevé et leur tension plus faible (1,15V à 1,45V) que ceux des batteries au plomb. L'électrolyte est à base de potasse, l'électrode positive est composée d'hydroxyde de nickel et l'électrode négative de cadmium. Ces éléments réagissent de la manière suivante : $2Ni(OH) + Cd + 2H_2O \rightleftharpoons 2Ni(OH)_2 + Cd(OH)_2$. (16)



Figure I-22- accumulateur Ni-Cd.

b. Stockage sous forme d'hydrogène

Le stockage par la filière hydrogène nécessite une transformation de l'énergie électrique en dihydrogène (H₂) puis une deuxième transformation du dihydrogène en électricité. (16)

- Principe :

L'excès de l'énergie produit par le système PV est utilisé par un électrolyseur (passage d'un courant continu à travers deux électrodes immergées dans un électrolyte liquide ou solide) pour décomposer l'eau en oxygène et en hydrogène suivant l'équation : $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$. L'hydrogène ainsi produit est stocké sous forme gazeuse, liquide ou solide. Durant les périodes de fortes consommations, il existe différents moyens pour produire de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké : - le premier consiste à alimenter une pile à combustible qui utilise l'hydrogène et l'oxygène comme couple électrochimique ; - le deuxième consiste à synthétiser du gaz naturel selon un procédé de la méthanation qui consiste à utiliser l'hydrogène produit par l'électrolyseur pour produire du méthane. Le méthane ainsi obtenu peut certes être injecté directement dans le réseau de gaz ou être utilisé pour alimenter une centrale à gaz « classique », produisant de l'électricité ; - le troisième consiste à utiliser l'hydrogène directement dans une centrale à gaz spécialement conçue à cet effet, afin de produire de l'électricité. Le principe de restitution de l'énergie à partir de l'hydrogène stocké est résumé sur la Figure 6. (16)

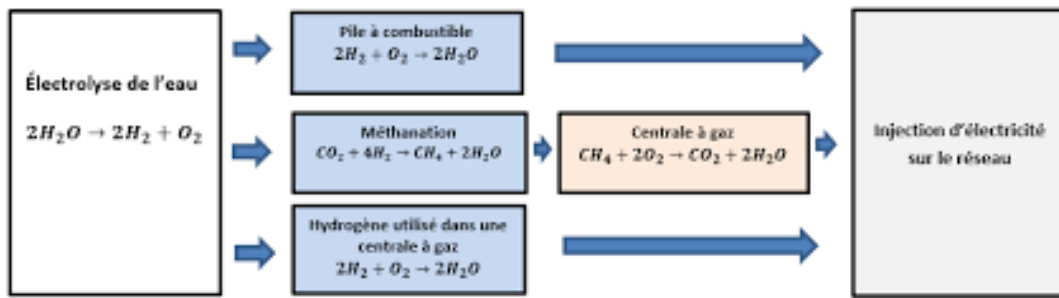


Figure I-23- différentes possibilités de restitution de l'électricité à partir de l'hydrogène stocké.

c. Stockage hydraulique

Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) sont composées de deux retenues d'eau situées à des hauteurs différentes et reliées par un système de canalisation. Elles sont équipées d'un système de pompage permettant de transférer l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur. La figure I-17 montre le principe de fonctionnement d'une STEP. (16)

Durant les périodes de forts ensoleillements, lorsque le champ photovoltaïque fournit un surplus d'électricité, l'eau du bassin inférieur est pompée et conduite vers le bassin supérieur. Sous l'effet de la pesanteur, cette masse d'eau représente une future capacité de production électrique. Lorsque le réseau connaît un déficit de production électrique, une partie du réservoir supérieur, est vidée et par gravité, l'eau fait tourner une turbine hydraulique qui alimente un alternateur et produit de l'électricité comme indiqué sur la figure I-17. Le stock d'énergie potentielle est ainsi reconstitué indéfiniment. (16)

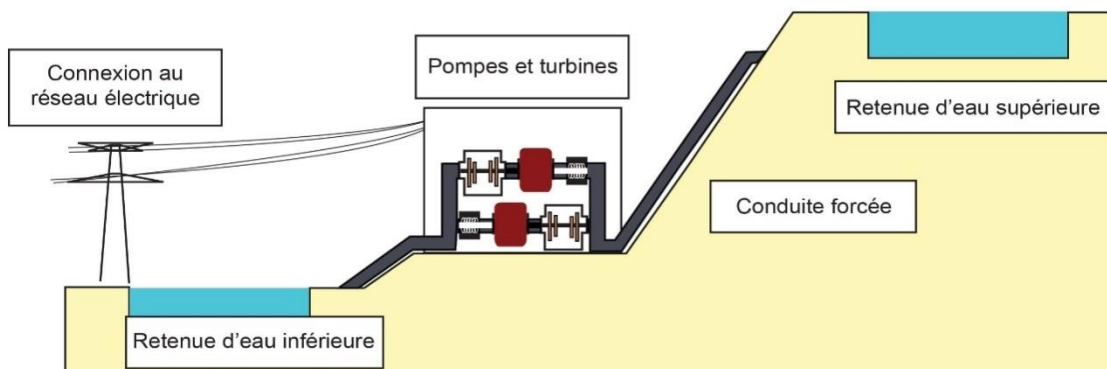


Figure I-24- schéma de principe de fonctionnement d'une STEP.

d. Stockage à air comprimé (CAES)

Dans cette technologie de stockage, l'air est comprimé et stocké dans des réservoirs ou dans des cavités souterraines. (16)

L'énergie produite par une centrale photovoltaïque peut d'une part être injectée dans le réseau et d'autre part être utilisée pour comprimer (grâce à un turbocompresseur) l'air ambiant à haute pression (100 à 300 bars) pendant les périodes de faibles consommations. L'air est ensuite stocké à une pression moyenne de 40 à 70 bars et à une température proche de l'ambiante. Pour récupérer l'énergie stockée, l'air comprimé est dirigé vers une machine semblable à une turbine à gaz. Dans laquelle, il est chauffé grâce à un apport d'énergie venant de l'extérieur ; ce qui augmente sa pression. Puis, il est détendu dans une turbine. La turbine a pour rôle de convertir l'énergie cinétique issue de la combustion de l'air en travail mécanique. L'énergie mécanique obtenue est ensuite convertie en énergie électrique grâce à un alternateur. Le principe de fonctionnement est résumé dans la Figure I-18. La chaleur résiduelle de la compression peut être récupérée et utilisée pour chauffer l'air (stockage adiabatique). (16)

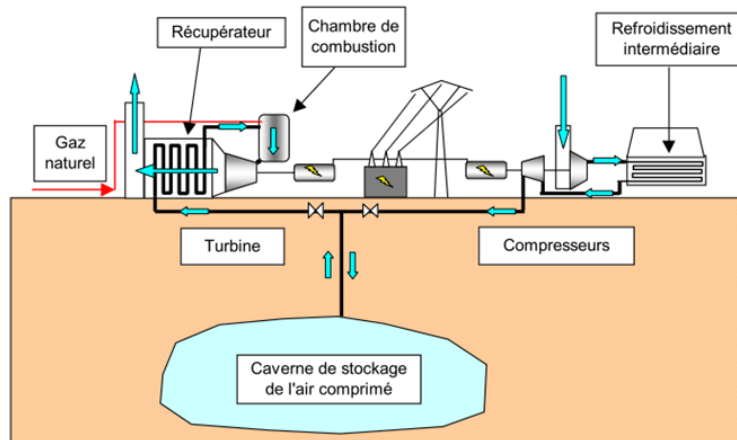


Figure I-25- schéma de principe d'une installation de stockage à air comprimé.

e. Volant d'inertie

Un volant d'inertie stocke l'énergie fournie par un générateur photovoltaïque sous forme d'énergie cinétique de rotation. Il est constitué d'une masse (anneau ou tube) en fibre de carbone entraînée par un moteur électrique comme illustré sur la Figure I-19. (16)

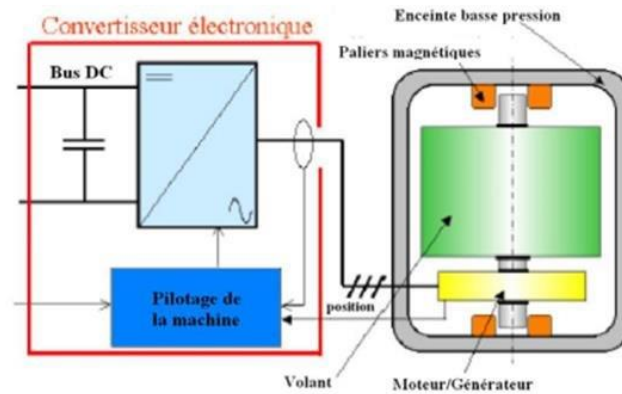


Figure I -26- principaux composants d'un système de stockage électromécanique inertiel.

L'apport d'énergie électrique permet de faire tourner la masse à des vitesses très élevées (entre 8 000 et 16 000 tour/min) en quelques minutes. Une fois lancée, la masse continue de tourner, même si aucun courant ne l'alimente. L'énergie stockée dans le volant d'inertie est donc sous forme d'énergie cinétique. Elle pourra être restituée en utilisant un moteur comme génératrice électrique, entraînant la baisse progressive de la vitesse de rotation du volant d'inertie. (16)

f. Stockage sous forme thermique

Une grande partie de la conversion ou du transport énergétique se fait sous forme de chaleur, il est alors important d'examiner le potentiel du stockage thermique.

Le stockage de chaleur peut se faire de deux manières différentes :

- Le stockage thermique par chaleur sensible consiste à chauffer un corps (sodium, sel, eau sous pression, etc.) qui ne subit pas de changement d'état pendant la phase d'accumulation de la chaleur. La quantité d'énergie stockée est alors directement proportionnelle à la variation de la température et à la quantité de matière concentrée ;
- Le stockage thermique par chaleur latente de fusion consiste à stocker de l'énergie thermique dans un matériau qui subit un changement d'état à une température donnée. En effet, l'excès de l'énergie fournit par un générateur photovoltaïque peut être utilisé pour élever la température d'un matériau. Le matériau tel que : Al, Mg, Si ou Zn possède des propriétés appropriées à cet effet. Lorsque la température du matériau atteint la température de changement d'état, le matériau initialement solide passe à l'état liquide grâce à la chaleur absorbée. L'énergie thermique accumulée par le matériau est restituée avec une baisse progressive de la température lorsque le

générateur photovoltaïque connaît un déficit. Le matériau passe alors de l'état liquide à l'état solide en restituant la chaleur absorbée. Au-delà, du changement d'état solide-liquide, il peut y avoir d'autres changements d'états de la matière : gaz-solide, gaz-liquide... (16)

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu des concepts d'énergies renouvelables et identifier leurs types et modes de fonctionnement, nous avons aussi mentionner certains avantages et inconvénients de ces systèmes.

À travers ce chapitre aussi, nous avons présenté les système énergétique hybride, ainsi que donner un aperçu sur les éléments de sa composition et les différentes méthodes de production d'énergie électrique et bien sûr sans oublier les différents types de stockage d'énergie électrique.

Dans le prochain chapitre, nous étudierons les différents composants d'un système hybride photovoltaïque _ éolienne.

Chapitre II

Systeme hybride photovoltaïque -éolien

Introduction

II.1 Energie photovoltaïque

II.1.1 Généralité sur l'énergie solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se manifeste par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction entre un métal et un semi-conducteur ou entre deux semi-conducteurs lorsque le dispositif reçoit un rayonnement lumineux de longueur d'onde adéquate. Ainsi une cellule photovoltaïque peut convertir l'énergie solaire en énergie électrique en mettant en jeu ce phénomène physique optoélectronique. Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12% avec du silicium polycristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe. (15)

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass. Celle-ci n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée. (15)

II.1.2 Les différents systèmes photovoltaïques

II.1.2.1 Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau sont d'abord des équipements de production destinés à générer de l'énergie électrique d'origine photovoltaïque, qui sera injectée dans le réseau électrique fourni par d'autres sources de production à partir de machines tournantes de plus forte puissance. Deux architectures de raccordement électrique peuvent être envisagées avec injection totale ou avec autoconsommation. (17)

II.1.2.2 Systèmes PV raccordés au réseau avec injection totale

a. Injection totale sans stockage

Les générateurs photovoltaïques convertissent directement le rayonnement solaire en énergie électrique. Le courant continu généré par le module photovoltaïque est converti en courant alternatif compatible avec les caractéristiques électriques du réseau public de distribution grâce

à un onduleur photovoltaïque. L'énergie produite est entièrement injectée dans le réseau public de distribution pour pouvoir être valorisée dans les meilleures conditions économiques du producteur. En cas de panne du réseau (perte de tension ou tension et fréquence hors tolérance), L'onduleur photovoltaïque cesse de fonctionner. (17)

b. Injection totale avec stockage

Son principe est le même que ci-dessus, mais le stockage d'énergie de l'accumulateur est intégré dans l'usine de production. Cependant, pour des raisons économiques, ce stockage est très limité afin de stabiliser la production ou bien de restituer l'énergie. (17)

II.1.2.3 Systèmes PV raccordés au réseau avec autoconsommation :

a. Autoconsommation sans stockage

Le système est directement connecté à l'installation électrique intérieure sur site. L'énergie solaire est consommée par le récepteur utilisé. Tout excès d'énergie solaire généré sera injecté dans le réseau de distribution public. Si le réseau tombe en panne (la tension ou la perte de tension et de fréquence dépasse la tolérance), l'onduleur photovoltaïque s'arrêtera de fonctionner et ne fournira plus d'alimentation au récepteur. (17)

b. Autoconsommation avec stockage

Le stockage d'énergie est intégré au système via l'accumulateur, ce qui permet de stocker l'énergie produite par le générateur photovoltaïque pendant la journée et de la restituer pour une consommation locale la nuit. Cependant, pour des raisons économiques, le dispositif de stockage ne peut fonctionner que quelques heures et ne peut pas se débarrasser complètement des ennuis du réseau. (17)

II.1.2.4 Systèmes photovoltaïques autonomes

Dans les systèmes photovoltaïques qui ne sont pas connectés au réseau, on peut distinguer le fonctionnement du système autonome au lieu d'utiliser l'énergie photovoltaïque et hybride qui utilisent l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, des générateurs ou d'autres types d'une ou plusieurs sources d'énergie complémentaires (renouvelables ou non renouvelables) Système sans utiliser aucune autre énergie. Ces systèmes hors réseau sont principalement utilisés pour fournir des services aux utilisateurs. C'est pourquoi le concept de systèmes photovoltaïques évoque tous les composants : production, stockage, gestion, conversion, distribution et utilisation. On peut distinguer les systèmes qui fonctionnent sans stockage (au soleil) et les systèmes qui ont des batteries de stockage. (17)

a. Systèmes photovoltaïques autonomes sans stockage

Ils fonctionnent de la manière suivante. Pendant la journée, les générateurs photovoltaïques alimentent les utilisateurs directement ou via des convertisseurs CC / CC ou CC / AC. La puissance fournie dépend de la quantité de lumière solaire. Pendant la nuit, l'appareil n'est plus alimenté, Les principales applications photovoltaïques fonctionnant sous le soleil (pompage, ventilation, réfrigération, dessalement...) (17)

b. Systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage

Pendant la journée, le générateur photovoltaïque alimente le récepteur CC et charge la batterie de stockage. Le contrôleur de charge empêche la surcharge de la batterie en cas de surproduction d'énergie solaire. La nuit et par mauvais temps, lorsque le récepteur est alimenté par la batterie et profondément déchargé, le limiteur peut protéger la batterie. Dans le cas du récepteur fonctionnant sur courant alternatif AC, ainsi l'onduleur autonome convertit la tension continue en tension alternative. (17)

II.1.2.5 Systèmes photovoltaïques hybrides

On peut considérer deux architectures électriques de systèmes hybrides basées sur l'existence ou absence de stockage :

- Installations photovoltaïques dont les accumulateurs sont connectés à des sources d'énergie renouvelables (éolienne, micro-hydraulique, etc.)
- Des systèmes photovoltaïques sans accumulateurs couplés avec des groupes électrogènes.

a. Systèmes photovoltaïques hybrides avec stockage

Pendant la journée, le générateur photovoltaïque charge la batterie tout en alimentant l'onduleur, ce dernier convertit la tension continue en tension alternative et alimente le récepteur qui fonctionne en alternance. Le contrôleur de charge empêche la batterie de se surcharger lorsque l'énergie solaire est surproduite. La nuit, l'onduleur est alimenté par des batteries. En cas d'ensoleillement insuffisant ou de consommation plus élevée du récepteur, un générateur de secours ou de secours peut fournir une alimentation directe au récepteur et charger la batterie pour assurer la continuité du service. (17)

b. Systèmes photovoltaïques hybrides sans stockage

Le générateur photovoltaïque injecte une puissance variable dans le réseau en fonction de la quantité d'ensoleillement. Toute l'énergie fournie par le générateur PV ne sera pas fournie par le groupe électrogène, de sorte que la consommation de carburant et les coûts d'exploitation peuvent être réduits. Les systèmes hybrides avec une capacité de stockage (de quelques kilowatts à des centaines de kilowatts) sont largement utilisés, notamment pour fournir des maisons individuelles, des refuges de montagne et des répéteurs de télécommunications haute puissance et pour l'électrification rurale. Les systèmes hybrides sans stockage (de plusieurs dizaines de kilowatts à plusieurs mégawatts) sont principalement utilisés pour l'électrification des grands villages et les alimentations électriques pour les mines d'extraction. (17)

II.1.3 Conversion de l'énergie solaire

Dans le cas d'installations autonomes, l'énergie produite par les panneaux solaires photovoltaïques est utilisée immédiatement (pompage, ventilation, etc....) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée. Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230 Volts alternatif. (5)

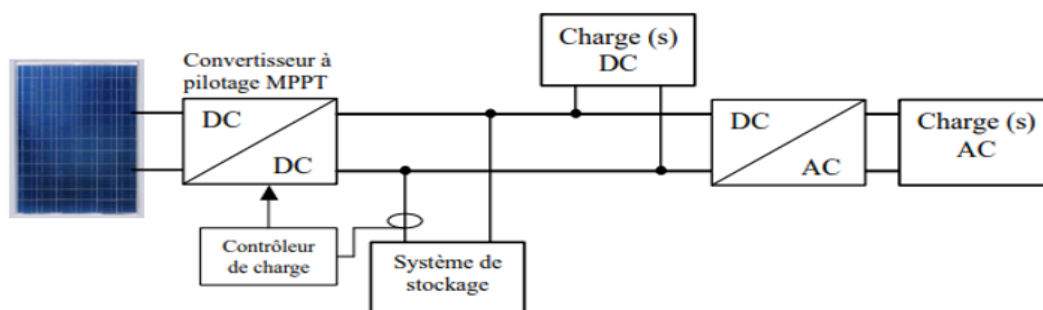


Figure II-27- installation photovoltaïque autonome.

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. (5)

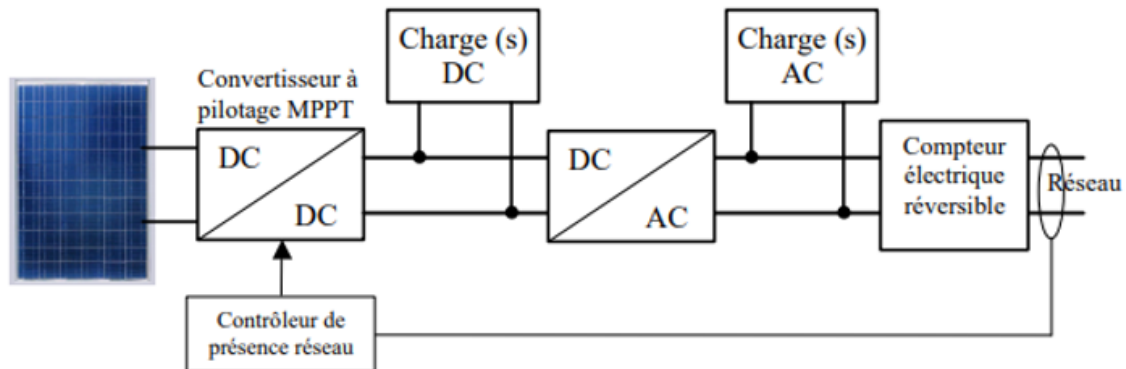


Figure II-28- installation photovoltaïque couplé au réseau.

II.2 Energie éolienne

II.2.1 Le principe de fonctionnement d'une éolienne

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz en Europe), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent. La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public (en France, le réseau EDF). La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public. Pour les centrales éoliennes de 10 à 15 MW de capacité, le niveau de tension de raccordement est, en France, généralement de 20 KV. Pour les centrales de capacité plus importante, le niveau de tension de raccordement peut aller de 60 à 90 KV, voire même 225 KV. Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de

tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements. Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants... La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs. (18)

II.2.2 Les différents types d'éoliennes

II.2.2.1 Eoliennes a axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessible et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts. Il existe des systèmes grâce auxquels les ailes se décalent plus ou moins pour augmenter l'étendue des vitesses d'action. Si la vitesse du vent est basse, les ailes sont complètement déployées, si la vitesse est trop forte, les ailes sont complètement fermées et l'éolienne forme un cylindre. Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. (19)

II.2.2.2 Eoliennes a axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamique ment à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien .Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles

représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal. (19)

II.2.3 Chaînes de conversion électrique

Diverses chaînes de productions coexistent pour la production d'électricité par aérogénérateurs. Elles peuvent être très différentes selon que l'on est en forte ou en petite puissance, en fonctionnement à vitesse fixe (ou peu variable) ou à vitesse variable. On peut, par exemple, classer ces solutions par leur fonctionnement couplé ou non au réseau.). (5)

II.2.3.1 Systèmes couplés au réseau alternatif

- Génératrices asynchrones à cage :

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Bien que la première machine qui vient à l'esprit pour de tels systèmes soit la génératrice synchrone, le faible coût et la standardisation des machines asynchrones a conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage jusqu'à des puissances dépassant le mégawatt. Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive (Figure II-3) et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau.

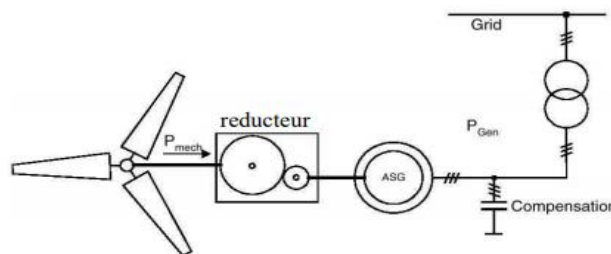


Figure II-29-Chaîne de conversion à génératrice asynchrone à cage.

Nous avons vu précédemment l'intérêt de la variation de vitesse. Une solution couramment employée consiste à utiliser des machines asynchrones à cage à 2 configurations polaires du bobinage statoriques qui procurent ainsi deux vitesses de synchronisme. (5)

- Génératrices asynchrones à rotor bobiné

La machine asynchrone à rotor bobiné et à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo-synchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence (plus ou moins élaboré). Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit. En effet, si K est le rapport de la vitesse maximale sur la vitesse minimale (par exemple $K = \frac{\omega_{max}}{\omega_{min}}$), sa puissance de dimensionnement est $\frac{k-1}{2.k}$ fois la puissance maximale générée (30%). (5)

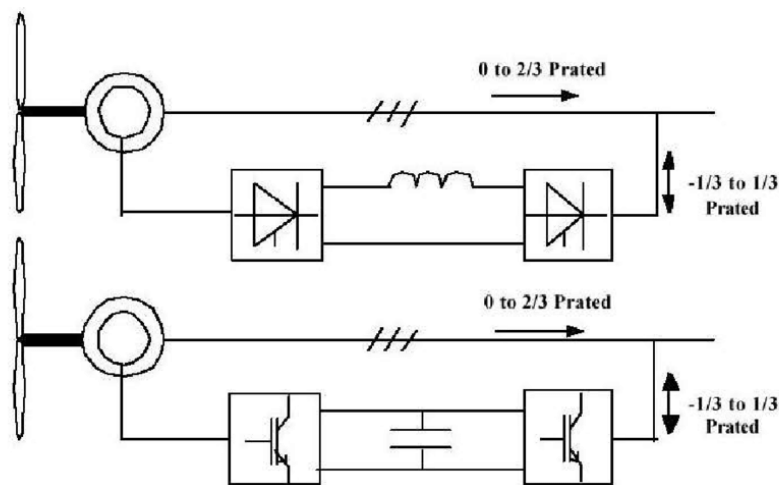


Figure II-30-Chaînes de conversion à génératrice asynchrone à rotor bobiné.

La Figure II-4 montre deux systèmes à double alimentation. Le premier est à convertisseurs à thyristors. Il n'est plus utilisé car il présente trop d'inconvénients en termes de facteur de puissance et de formes d'ondes (côté machine et côté réseau). Actuellement, ce sont les systèmes à deux convertisseurs triphasés à modulation de largeur d'impulsion qui sont utilisés (second système), généralement à IGBT.

Les machines à rotor bobiné (double alimentation) nécessitent un rotor sensiblement plus complexe ainsi qu'un système triphasé de bagues et balais pour connecter les enroulements rotoriques au convertisseur. Les problèmes d'usure et de maintenance associée pourraient conduire à préférer une solution à vitesse variable constituée d'une génératrice asynchrone à cage associée à un convertisseur de fréquence (Figure II-5), mais il ne semble pas qu'elle ait encore trouvé un débouché, sans doute pour des raisons économiques. (5)

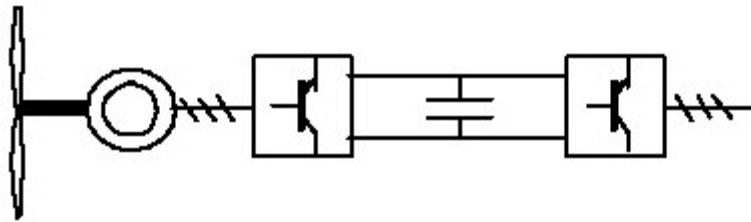


Figure II-31-Chaîne de conversion à génératrice asynchrone à cage et convertisseur de fréquence.

- Génératrices synchrones :

Enfin, tout particulièrement dans le cas des entraînements directs (sans multiplicateur mécanique), on utilise des machines synchrones. Leurs performances, notamment en termes de couple massique, sont très intéressantes lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles, leur fréquence étant alors incompatible avec celle du réseau, le convertisseur de fréquence s'impose naturellement. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont toutes à vitesse variable.

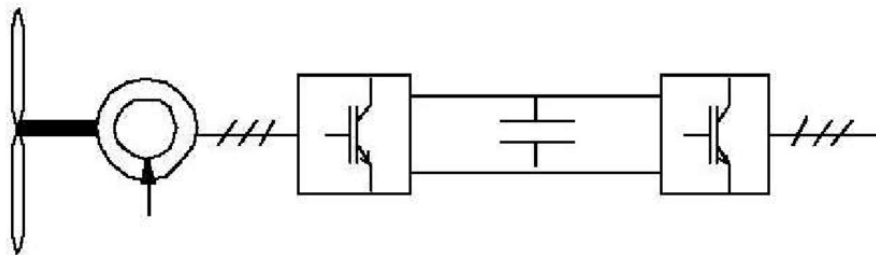


Figure II-32-Chaîne de conversion à génératrice synchrone à rotor bobiné (ou à aimants) et convertisseur de fréquence.

Les génératrices synchrones à entraînement direct sont encore peu nombreuses, le principal fabricant est Enercon (plusieurs milliers de machines sont déjà en service, 300 kW, 600 kW, 1 MW et 1,8 MW). L'inducteur (rotor) est bobiné, il nécessite un système bagues lisses-balais ou un système à diodes tournantes sans contact (comme dans les « alternateurs classiques » de production) pour amener le courant continu. Le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit réglé par l'onduleur MLI. Pour des raisons de compacité et de rendement, des génératrices synchrones à aimants permanents apparaissent (Jeumont Industrie, 750 kW) et devraient prendre une place croissante dans les prochaines années

On trouve également des machines synchrones « rapides » associées à un multiplicateur de vitesse, comme chez le constructeur Made (gamme au-delà de 800 kW). Ces machines

fonctionnent à vitesse variable, elles débitent sur un redresseur à diodes, puis la tension continue est convertie à travers un onduleur MLI pour être compatible avec le réseau auquel elles sont connectées. (5)

II.2.3.2 Systèmes en site isolé

Pour les réseaux de petites puissances en site isolé, une solution couramment employée consiste à associer les aérogénérateurs à un ou des groupes électrogènes, souvent diesel. Dans la version la plus rudimentaire, la génératrice est de type asynchrone à cage et est auto-amorcée par condensateurs. Pour éviter des démarrages trop fréquents du groupe électrogène, ou pour assurer les transitions, des batteries électrochimiques, voire des accumulateurs inertiels, peuvent également être associées via un convertisseur électronique. Une autre solution couramment employée consiste à utiliser un bus continu intermédiaire avant de transformer l'énergie en courant alternatif. Dans le cas des très petites puissances, l'énergie est directement consommée en courant continu. Le bus continu présente l'avantage d'interconnecter plus aisément divers systèmes de production (éolien, photovoltaïque, pile à combustible...) et des batteries électrochimiques qui peuvent se trouver directement en tampon sur de tels bus. (5)

La figure II-8 montre une solution de plus en plus employée pour associer un aérogénérateur à un tel système. La génératrice est de type synchrone à aimants permanents (entraînement direct comme il s'agit de puissances modestes) débitant directement, à travers un pont de diodes triphasé, sur le bus continu et l'accumulateur électrochimique. (5)

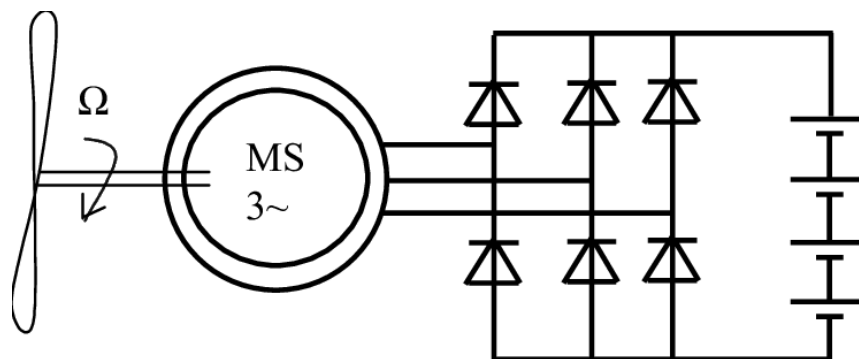


Figure II-33-Aérogénérateur à aimants débitant directement à travers un pont de diodes sur le bus continu.

Le débit direct (à travers un simple redresseur en pont à diodes) de la machine synchrone sur une source de tension continue peut surprendre. En fait, c'est grâce à l'inductance d'induit de la machine synchrone de forte valeur que les courants restent proches des formes sinusoïdales et que les rendements de conversion sont corrects. En cas de surcharge de la batterie (trop de

tension), un contacteur met en court-circuit l'induit de la génératrice. La turbine est alors arrêtée en rotation. (5)

II.3 Système de stockage

II.3.1 Choix du système de stockage

À l'échelle mondiale, divers types de projets de stockage d'énergie ont été exécutés à différentes échelles. Une analyse détaillée de la base de données de projets de stockage d'énergie globale du « Department of Energy » des États-Unis révèle que la télologie de stockage d'énergie par batterie compte le plus grand nombre de projets opérationnels lié aux EnR (figure II-8). (20)

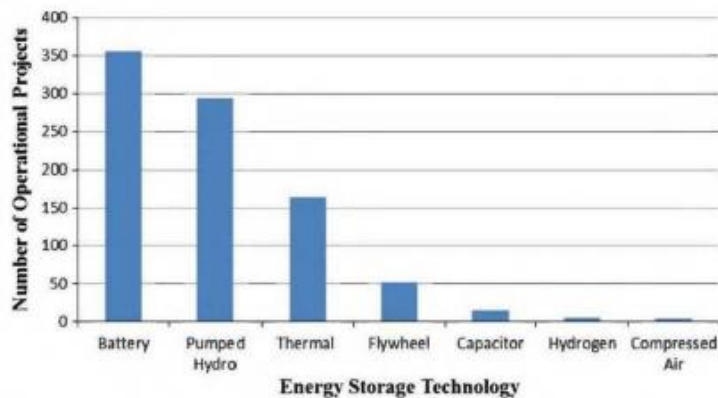


Figure II-34-différents systèmes de stockage les plus rependus dans les EnR.

Aujourd'hui les accumulateurs électrochimiques ont une densité énergétique se situant entre 150 et 250 kWh/kg avec une durée de vie relativement faible de l'ordre de 200 à 10000 cycles. Les accumulateurs électrochimiques notamment ceux au lithium-ion occupent la quasi-totalité du marché de la téléphonie mobile. Ils sont également utilisés dans les applications de forte puissance et dans l'aérospatiale telle que les satellites Galileo. Les accumulateurs Ni-Cd sont aussi utilisés dans les applications demandant une forte puissance et peuvent fonctionner sous une température relativement élevée. Pour ce qui est de la batterie au plomb, son marché est un enjeu industriel important. Il concerne les batteries de démarrage ainsi que la plupart des batteries stationnaires. En fonction de la nature des électrodes et de l'électrolyte, on rencontre différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques dont les plus utilisées sont : plomb acide, nickel-cadmium et lithium-ion. (21)

II.3.2 Critère de choix

Le système de stockage a pour rôle d'assurer une permanence de production dans un réseau électrique (Système hybride) et d'absorber les pics de consommation afin d'éviter les déséquilibres énergétiques. La sélection d'un mode de stockage dépend de plusieurs critères parmi lesquels on cite :

- Densité de puissance et densité d'énergie ;
- Coûts d'investissement ;
- Rendement ;
- Cycle de vie ;
- Taille d'application
- Maturité téléologique et adaptation à l'environnement etc. (15)

En termes de densité de puissance, le stockage d'énergie par batterie Lithium-ion occupe la seconde place (figure II-9) comparativement aux autres excepté le supercondensateur. (15)

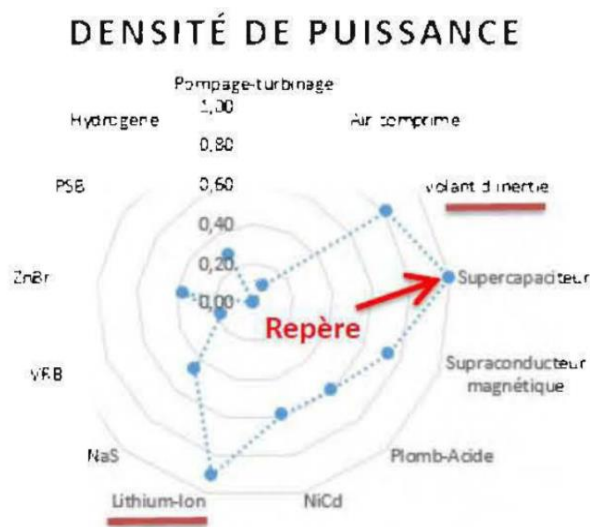


Figure II-35-critère de choix par densité de puissance.

En termes de densité de puissance, le stockage d'énergie par batterie Lithium-ion occupe la seconde place (figure II-10) comparativement aux autres excepté le supercondensateur. (15)

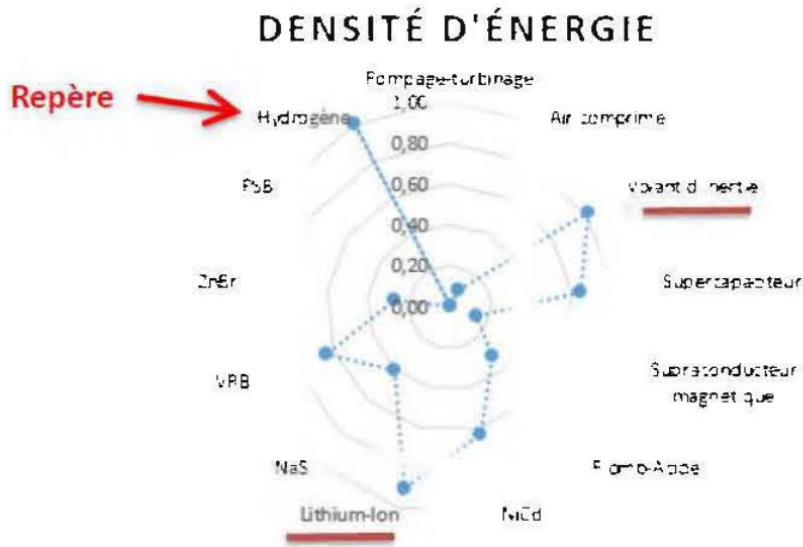


Figure II-1 -choix par densité d'énergie.

Le coût d'investissement du stockage par batterie lithium-ion reste plus élevé comparé à la plupart des technologies de stockage. Néanmoins, en termes de coût d'amortissement et d'efficacité à long terme et la baisse sans cesse des prix des batteries au lithium (figure II-11) leur permettra de concurrencer les autres systèmes dans l'avenir. La dernière étude effectuée par la société des études Bloomberg New Energy Finance (BNEF) aux États-Unis a annoncé d'ailleurs depuis mars 2019 que le prix des batteries lithium-ion a chuté de 35% à 187 USD par méga-wattheure depuis la dernière étude. (15)

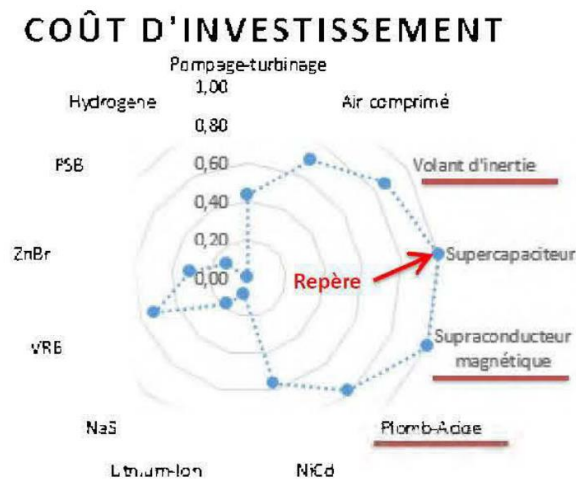


Figure II-2 -comparaison par coût d'investissement.

Les batteries lithium-ion occupent quasiment la première place en termes de rendement énergétique, c'est ce qui les rend plus attractifs dans les micro-réseaux (Figure II-12).

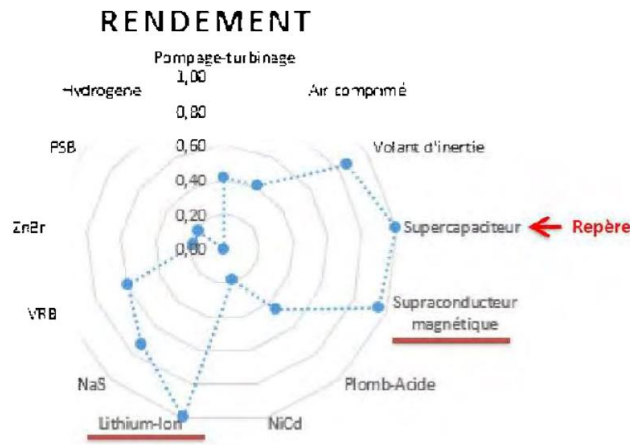


Figure II-3-critère de choix par rendement.

En termes de cycle de vie les batteries aux lithium-ion sont moyen comparer au volant d'inertie, super-condensateur, etc., mais largement supérieur aux batteries aux plombs, très répandues dans les micro-réseaux autonomes (Figure II-13).

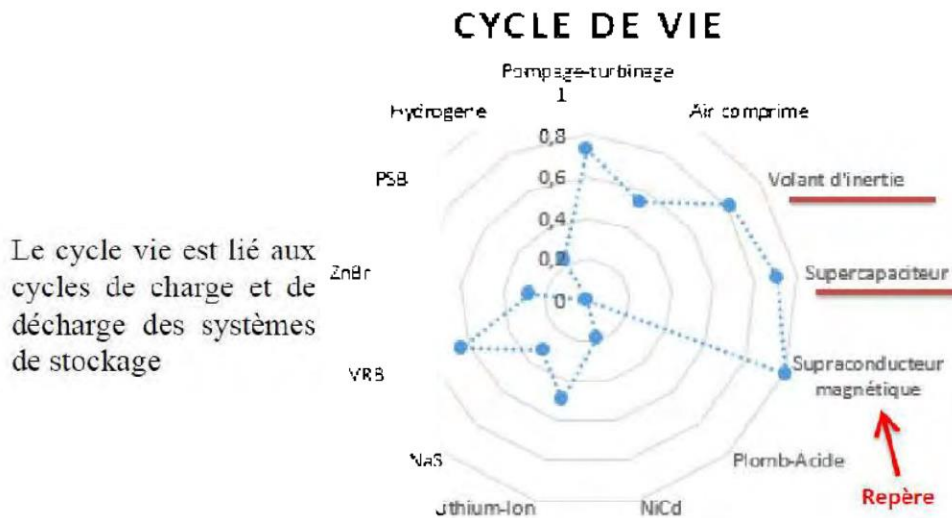


Figure II-4-comparaison par cycle de vie.

La taille d'application des systèmes de stockages se mesure par famille comme présentée à la (figure II-14). Les stockages par batteries, volant d'inertie ou encore les super-condensateurs sont une puissance nominale allant de quelques KW à 1MW pour une durée de décharge de quelques secondes à quelques heures ou plus selon l'utilisation. Cependant c'est le stockage

par pompage-turbinage qui occupe une place incontestable à ce sujet avec près de 1 TW de puissance délivrée pour plusieurs jours (voire des mois) de temps de décharge. (15)

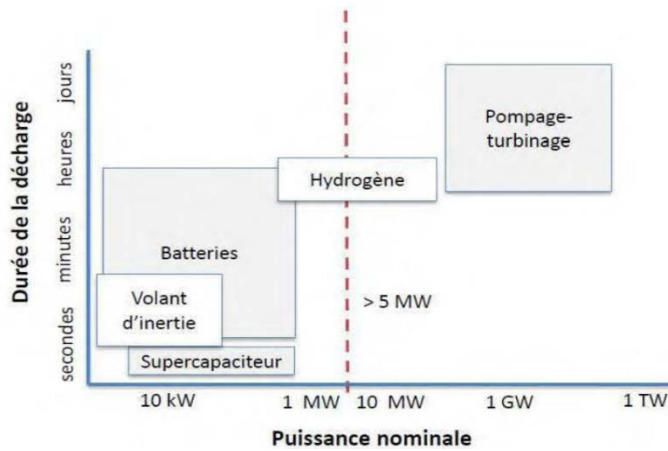


Figure II-1-comparaison par taille d'application.

Mis sur le marché pour la première fois par la compagnie Sony Energitech dans les années 1990, les batteries lithium-ion sont plus récentes comparées aux plomb-acide, nickel Cadmium (NiCd), volant d'inertie et le plus ancien, le pompage-turbinage (figure II-15). La bonne nouvelle est que les batteries au lithium sont en pleine expansion et pourraient faire oublier ou réduire l'utilisation de certaines formes de stockages dans les prochaines années. (15)

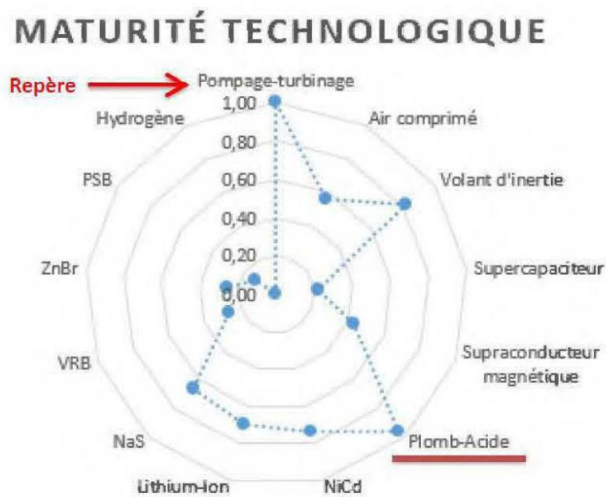


Figure II-2-maturité des différents systèmes de stockage.

Le stockage par hydrogène, par air comprimé, volant d'inertie ou encore le super-condensateur sont les plus respectueux de l'environnement comparativement aux autres technologies de stockage d'énergie (Figure II-16). Heureusement des études poussées sont en train de se faire

par beaucoup de chercheurs afin de réduire considérablement l'impact des batteries lithium-ion sur l'environnement. (15)

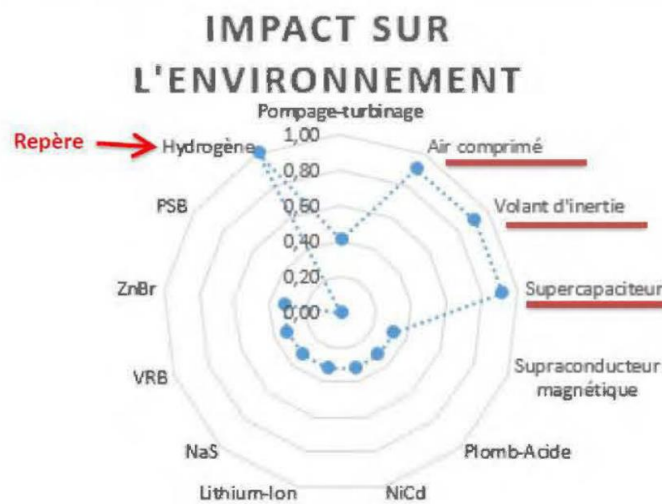


Figure II-3-Impact environnemental des différents systèmes de stockages.

Conclusion

Ce chapitre traite le choix des différents éléments du système étudié ainsi les termes généraux des lois qui peuvent être utilisées pour obtenir une modélisation du système hybride pour l'énergie solaire et éolienne, également dans l'étude du modèle de système de stockage.

Le chapitre suivant aborde, la modélisation du système énergétique hybride pour les deux énergies photovoltaïque et éolienne et ses composants. Dans le but d'alimenter une zone isolée en énergie électrique.

Chapitre III

Modélisation des déléments éléments du système étudié

Introduction

Une modélisation représente l'ensemble du processus, permettant une intervention mathématique basée sur expérience ou observation, un élément essentiel des processus scientifiques, notamment en physique, elle permet de représenter sous une forme simplifiée des systèmes ou des phénomènes afin d'en décrire, expliquer ou prédire certains aspects de ceux-ci. Pour cette raison, une modélisation doit être réalisée pour établir une relation directe entre l'énergie produite par l'installation et la demande d'utilisation. À partir de recherche théorique et expérimentale, l'adaptabilité du système à chaque période de l'année peut être estimée. Dans ce cas, nous introduirons d'abord la modélisation du système hybride photovoltaïque-éolien, ainsi qu'une modélisation du système de stockage dans ce chapitre, car nous proposons de développer des modèles mathématiques de deux systèmes de production différents photovoltaïque et éolien pour renforcer leur développement d'exploitation, notamment la maîtrise du notamment du point de vue des flux de capacité de production.

III.1 Modélisation des caractéristiques du module/champ PV

L'énergie produite par le générateur photovoltaïque est estimée sur la base des données d'irradiance totale sur la pente, la température ambiante et les données constructeur des modules photovoltaïques utilisés. (22)

III.1.1 L'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque :

$$E_{pv} = \eta_{ge} S_{pv} p_f H \quad (1)$$

Où :

E_{pv} : représente la surface totale du générateur photovoltaïque (m^2) ;

η_{ge} : le rendement du générateur photovoltaïque ;

H : l'irradiation solaire sur un plan incliné ($kWh/m^2.mois$) ;

p_f : le facteur de remplissage du module égal à 0.9.

III.1.2 L'efficacité (où le rendement) d'un générateur photovoltaïque :

$$\eta_{\text{gen}} = \eta \{ 1 - \gamma (T_J - 25) \} \quad (2)$$

Où :

γ : représente le coefficient tenant compte de la variation du rendement du module photovoltaïque en fonction de la température, qui est pris à (0.0045 /°C) ;

η : le rendement de référence du générateur photovoltaïque.

III.1.3 Modèle de la température de la cellule :

Ce modèle suppose que la température de jonction de la cellule T_c (°C) est une fonction linéaire de la température ambiante T_a (°C) et de l'éclairement G .

$$T_c = T_a + \left(\frac{\text{NOCT} - 20}{800} \right) G \quad (3)$$

D'où : **NOCT** est la température nominale de fonctionnement (°C) atteinte par les cellules dans les conditions suivantes $T_a = 20$ °C, $G = 800$ W / m²; vitesse du vent **1 m / s** ; distribution spectrale **AM = 1,5** ; L'intégration de MPPT peut simplifier le modèle de diode simple, n'obtenant ainsi qu'une équation empirique. Désormais, en utilisant uniquement les données climatiques de terrain (lumière du soleil et température ambiante) et les données du fabricant du module, nous pouvons connaître la puissance maximale disponible à la sortie du module PV. Par conséquent, la génération électrique du champ CC est directement proportionnelle à la génération du module photovoltaïque. Une multiplication de la puissance de sortie d'un module par le nombre de modules qui composent le générateur photovoltaïque est suffisante pour trouver la puissance totale qu'il fournit. Ce modèle ne prend pas en compte la perte de connexion entre les modules. (23)

$$P_{MPPT} = N_{PV} \frac{G}{G_{\text{réf}}} [P_{0 \text{ max}} + \mu_{Pm} (T_c - T_{c \text{ réf}})] = N_{PV} P_{\text{max}} \quad (4)$$

Avec :

G : Irradiation solaire globale du lieu considéré (W/m²) ;

$G_{\text{réf}} = 1000$ (W/m²) : Irradiation solaire dans les conditions standard de référence ;

P_{MPPT} : Puissance fournie par le champ PV (W)

N_{PV} : Nombre de modules composant le PV ;

$P_{0\ max}$: Puissance maximale du module dans les conditions standards (W) ;

μ_{Pm} : Coefficient de variation de la puissance en fonction de la température ;

T_c : Température de jonction du module PV (°C) ;

$T_{c\ ref}$: Température de jonction dans les conditions de références du module PV (25°C) ;

T_a : Température ambiante du lieu considéré (°C) ;

NOCT : Température de fonctionnement des cellules PV dans les conditions de références.

III.1.4 Modèle électrique de la cellule PV :

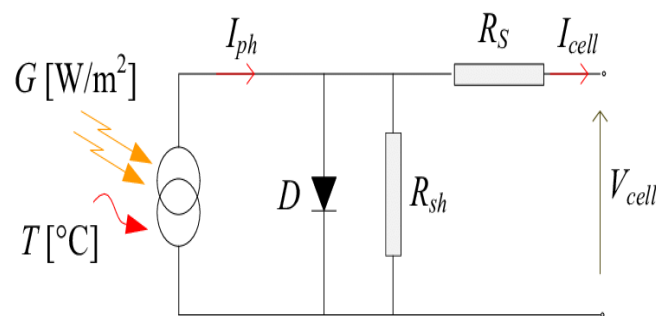


Figure III-36- Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Une cellule solaire Photovoltaïque est une diode électronique PN de grande surface qui, exposée à la lumière (photons), génère une tension électrique (volts), une cellule photovoltaïque idéale peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode. En addition au modèle idéal, le modèle réel tient compte des propriétés résistives de la cellule qui sont modélisées par une résistance série R_s mais aussi des courants de fuites modélisés par une résistance shunt R_{sh} . (22)

$$I_{ph} = I_D + I_{Rsh} + I \quad (5)$$

D'après la loi de Kirchhoff, le courant de sortie de la cellule est donné par :

$$I = I_{ph} - I_D \quad (6)$$

Le courant photonique est lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence par :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{réf}} I_{sc} T_C (1 + \alpha (T_C - T_{C,réf})) \quad (7)$$

Le courant de la diode est donné par l'expression de Shockley :

$$I_D = I_0 \left\{ \exp \left(\frac{q(V + I R_s)}{A K T_C} \right) - 1 \right\} \quad (8)$$

La résistance shunt est déduite par l'équation suivante :

$$R_{Sh} = -\frac{dV}{dI} V_{oc} T_C + \frac{A K T_C}{q I_{sc} T_C} \quad (9)$$

Le courant dans la résistance R_{Sh} est donné par :

$$I_{Sh} = \frac{V + R_s I}{R_{Sh}} \quad (10)$$

D'où

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V + R_s I}{A K T_C} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{Sh}} \quad (11)$$

G : représente l'éclairement de fonctionnement et $G_{réf}$ l'éclairement normalisé ;

α : le coefficient de température du courant I_{ph} (mA/°C) ;

A : le facteur d'idéalité de la jonction P-N ;

k : la constante de Boltzmann, 1.381×10^{-23} J/K ;

$T_{C,réf}$: la température absolue de référence de la cellule ;

q : la charge d'un électron, 1.602×10^{-19} C ;

V : la tension imposée aux bornes de la cellule ;

I_0 : le courant de saturation à l'obscurité ;

$I_{sc} T_C$: le courant de court-circuit de la cellule à la température ambiante T_C ;

$V_{oc} T_C$: la tension du circuit ouvert à la température T_C ;

Le modèle est basé sur le calcul des cinq paramètres de la fonction $I = f(I, V)$ qui sont : I_{ph} , I_0 , R_s , R_{sh} et A . Ces paramètres sont déterminés à partir des données qui sont : le courant de court-circuit I_{cc} , la tension à circuit ouvert V_{co} , le courant I_m et la tension V_m , au point de puissance maximale P_m et les pentes au voisinage de V_{co} et de I_{cc} .

$$I_0 = \left(I_{cc} - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \right) \exp \left(q \frac{V_{co}}{A K T_c} \right) \quad (12)$$

$$I_{ph} = I_{cc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + I_0 \left(\exp \frac{I_{cc} R_s}{A} - 1 \right) \quad (13)$$

Supposant que la résistance parallèle est infinie ($R_{sh} = \infty$)

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{V + I R_s}{A K T_c} \right) - 1 \right] \quad (14)$$

III.2 Modélisation des caractéristiques d'une éolienne

III.2.1 Modèle du vent

Le vent est le vecteur énergétique d'entrée d'une chaîne éolienne, déterminant pour le calcul de la production de l'électricité, les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent considéré dans ce modèle se limite à une dimension. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps. Elle sera modélisée, dans cette partie, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques. (24)

$$V(t) = 10 + 0.2 \sin(0.1047 t) + 2 \sin(0.2665 t) + \sin(1.2930 t) + 0.2 \sin(3.6645 t)$$

III.2.1.1 Energie cinétique du vent

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air, m , qui se déplace avec la vitesse v (25), l'énergie cinétique de cette masse est :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (15)$$

m : masse du volume d'air (en kg) ;

v : vitesse instantanée du vent (en m/s) ;

E_c : énergie cinétique (en joules). (20)

III.2.1.2 Limite de Betz/Formule de Betz

La puissance récupérable est inférieure, puisque l'air doit conserver une énergie cinétique résiduelle pour qu'il subsiste un écoulement. L'allemand Albert Betz a démontré en 1919 que la puissance maximale récupérable est :

$$P_{\max} = \frac{16}{27} P_{\text{cinétique}} = \frac{8}{27} \rho S V^3 \quad (16)$$

$$P_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad \text{lorsque } V_{\text{aval}} = \frac{1}{3} V_{\text{amont}} \quad (17)$$

$$P = 0,37 \frac{\pi}{4} D^2 V^3 \quad \text{D'ou} \quad P = 0,29 D^2 V^3 \quad (18)$$

Le rendement maximal théorique d'une éolienne est ainsi fixé à $\frac{16}{27}$, soit environ 59,3 %. Ce chiffre ne prend pas en compte les pertes d'énergie occasionnées lors de la conversion de l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. Dans le cas d'une hélice de diamètre D, la limite de Betz est égale à :

La puissance fournie par un aérogénérateur est proportionnelle au **carré** des dimensions du rotor et au **cube** de la vitesse du vent. Nous savons que l'éolienne procure son énergie du vent, par conséquent, il existe une relation entre la vitesse du vent et la vitesse de rotation, le couple et la puissance sur le rotor d'une éolienne. (26)

III.2.1.3 La puissance éolienne incidente du vent

$$P_V = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (19)$$

Où : ρ est la masse volumique de l'air en kg/m^3 (air atmosphérique sec environ $1,23 \text{ kg/m}^3$ à 15°C et à pression atmosphérique $1,0132 \text{ bar}$), S la surface traversée par l'air ($S = \pi R^2$) en m^2 R le rayon du rotor de l'éolienne (rayon de l'hélice) et V la vitesse du vent en m/s . (24)

III.2.2 Coefficient aérodynamique de puissance C_p

Cependant, le dispositif de conversion extrait une puissance $P_{\text{éol}}$ inférieure à la puissance incidente P_V , à cause de la vitesse non nulle des masses d'air derrière l'aéromoteur. On définit alors, le coefficient de puissance de l'aéromoteur par la relation :

$$C_p = \frac{P_{\text{éol}}}{P_V} \quad C_p < 1 \quad (20)$$

La puissance fournie par le rotor de l'éolienne :

$$P_{\text{éol}} = \frac{1}{2} \rho S V^3 C_p = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p \quad (21)$$

C_p : Coefficient qui dépend de la forme du rotor et de la vitesse du vent, On peut estimer la valeur maximale de ce coefficient, donc la puissance maximale qui peut être récupérée avec une turbine éolienne, en s'appuyant sur la théorie Rankine - Froude de l'hélice dans un fluide incompressible. C'est la valeur maximale de ce coefficient qui correspond à la limite dénommée la limite de Betz (théorie de Betz années 1920) du coefficient de puissance. (25)

$$C_{p_{\text{max}}} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (22)$$

III.2.3 La vitesse spécifique (Paramètre de rapidité)

La valeur du coefficient aérodynamique de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ , donc $C_p = C_p(\lambda)$. Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, on utilise la vitesse réduite (spécifique) λ qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ramenée à la vitesse de vent, soit :

$$\lambda = \frac{R \Omega}{V} = \frac{U}{V} \quad (23)$$

III.2.3.1 L'équation analytique de C_p en fonction de λ

$$C_p = 0.043 - 0.108 \lambda + 0.146 \lambda^2 - 0.0602 \lambda^3 + 0.0104 \lambda^4 - 0.0006 \lambda^5 - 2.2 \cdot 10^{-6} \lambda^6 \quad (24)$$

Résultant de l'interpolation, la courbe $C_p(\lambda)$ passe un maximum λ_{max} , compris entre 5 et 16 environ, selon le nombre de pales de la turbine et c'est seulement pour cette valeur que C_p approche la valeur de 16/27.

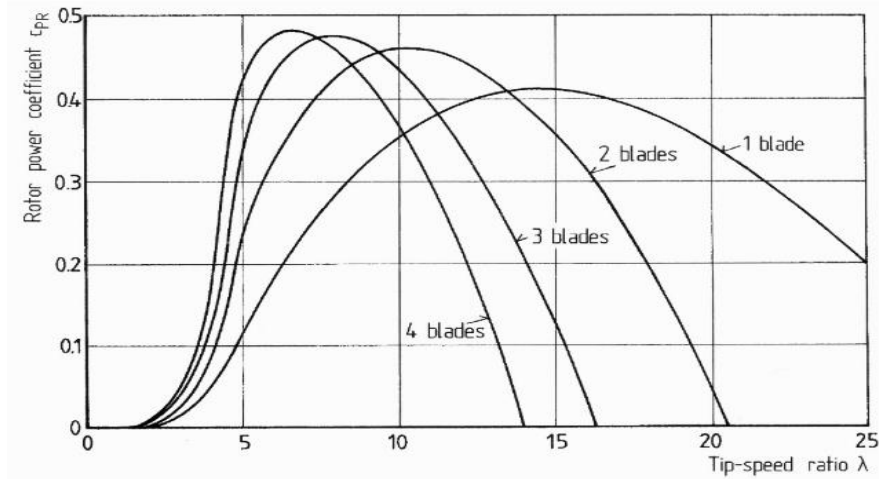


Figure III-37-Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée λ .

III.2.3.2 Le rendement aérodynamique de l'éolienne :

Qui est représentatif de la « qualité aérodynamique » de l'éolienne

$$\eta_a = \frac{C_p}{C_{p_{\max}}} = \frac{C_p}{0.593} \quad (25)$$

III.2.3.3 Le couple développé sur le rotor de l'éolienne

$$T = C_p \frac{\rho S V^3}{2 \omega} = C_p \frac{R \rho S V^3}{2 k} \quad (26)$$

Avec :

$K = \omega \frac{R}{V}$ (ω est la vitesse angulaire du rotor de l'éolienne)

III.2.4 Fonction de probabilité de densité de Weibull :

On rappelle que la fonction de répartition $F(v)$ est la probabilité que la vitesse du vent soit inférieure à une certaine valeur v et que la densité de probabilité $f(v)$ est la dérivée de $F(v)$:

$$F(v) = \frac{dF(v)}{dv} \quad (27)$$

Parmi les distributions utilisées dans les modèles statistiques, la distribution de Weibull s'est avérée appropriée pour la description des propriétés statistiques du vent, La fonction de répartition Weibull à deux paramètres c et k s'écrit :

$$F(v) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (28)$$

En utilisant la relation (27), il résulte la fonction de la densité de probabilité $f(v)$:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp - \left(\frac{v}{c} \right)^k \quad (29)$$

Avec :

k : paramètre de forme caractérise la répartition du vent ;

c : paramètre d'échelle caractérise la vitesse du vent (plus c est élevé plus l'énergie se trouve dans les hautes vitesses ;

v : vitesse du vent « instantanée » (moyennée sur 10 mn).

III.2.5 La distribution de Rayleigh :

La plupart des sites éoliens ayant une vitesse de vent qui respecte la distribution de Weibull avec un paramètre de forme $k=2$, on définit la distribution de Rayleigh qui est plus simple à manipuler [4], en remplaçant $k=2$ dans l'équation (29) on obtient :

$$f(v) = 2 \left(\frac{v}{c^2} \right) \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right] \quad (30)$$

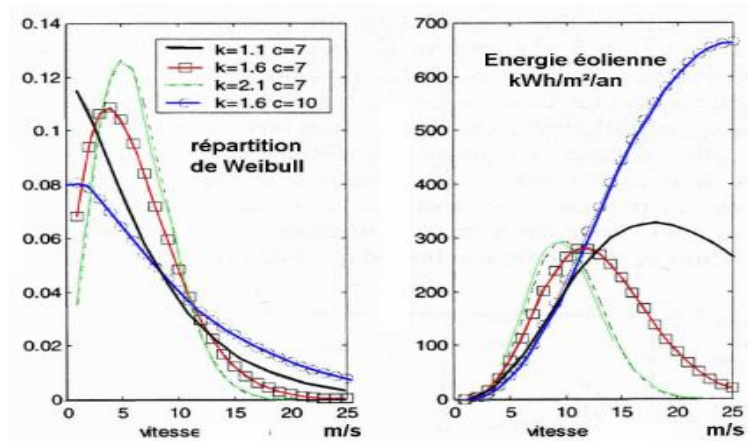


Figure III-38-Distribution de la vitesse du vent et de l'énergie correspondante pour différents couples de paramètres de la distribution.

La vitesse moyenne annuelle divisée par le nombre d'heures total annuel (8760h/an) peut être définie de la façon suivante :

$$V_{\text{moy}} = \frac{1}{8760} \int_0^{\infty} f(V) dV \quad (31)$$

III.2.6 Loi de Davenport et Harris :

La vitesse du vent est également fonction de l'altitude la loi (empirique) de Davenport et Harris exprime cette dépendance :

$$\frac{V}{V_0} = \left[\frac{z}{z_0} \right]^{\alpha} \quad (32)$$

Avec α compris entre 0,1 et 0,4 (0,1 correspond à la mer, 0,16 à une plaine, 0,28 à une forêt et 0,4 à une zone urbaine), la modélisation est valable s'il n'y a pas de changement de rugosité en amont (α constant) . Alors la puissance dépend de l'altitude Z :

$$\frac{P}{P_0} = \left[\frac{z}{z_0} \right]^{3\alpha} \quad (33)$$

III.3 Modélisation d'un système de stockage (Batteries)

III.3.1 Caractéristiques de la batterie

c. L'état de charge :

Une donnée très importante est l'état de charge EDC (SOC pour State Of Charge), cette valeur est exprimée en pourcent. Il s'agit tout simplement de la capacité actuelle (Q) de la batterie exprimée en fonction de sa capacité nominale (Q_{max}), c'est-à-dire lorsqu'elle est chargée à 100% de EDC. (27)

$$\text{EDC} = \frac{Q(\text{Ah})}{Q_{\text{max}}} \quad (34)$$

A l'inverse, nous pouvons parler de la profondeur de décharge PDD (DOD, pour Depth Of Discharge). Il s'agit également d'un pourcentage représentant l'inverse du EDC. Ainsi, une batterie ayant un EDC de 100% présentera un PDD de 0% alors qu'un EDC de 0% correspondra à un PDD de 100%. Lorsque le PDD dépasse les 80%, nous pouvons parler de décharge profonde de la batterie. (27)

$$\text{PDD} = 1 - \text{EDC} \quad (35)$$

III.3.1.1 La tension à vide :

Une autre tension importante est la tension à circuit ouvert, ou voltage à circuit ouvert, que nous appellerons ici « OCV » (pour « Open Circuit Voltage »). Il s'agit donc du voltage de la batterie lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge, c'est-à-dire lorsque le circuit électrique n'est pas fermé, est ouvert. L'OCV augmente également avec le SOC. Ce voltage à circuit ouvert est généralement 5 à 7% plus élevé que le voltage lorsque la batterie est connectée à une charge. (27)

III.3.1.2 Cycles de charge

Il s'agit du nombre de cycles de charge-décharge complets que la batterie peut endurer avant de ne plus pouvoir satisfaire les exigences de performance. Ce nombre de cycles peut varier en fonction de l'utilisation de la batterie. Précisons qu'un cycle est généralement défini comme la décharge complète d'une batterie initialement chargée à 100%, suivie d'un rechargement complet. Ce n'est cependant pas toujours le cas. En effet, les fabricants se limitent souvent à 80% de PDD afin d'évaluer la batterie, 80% de l'énergie stockée est donc délivrée et 20% ne sont pas utilisés. Cela permet d'augmenter la durée de vie de la batterie. (27)

III.3.2 Modèle électrique de CIEMAT

Le premier modèle utilisé pour la simulation a été développé par le CIEMAT en Espagne (Centro de Investigaciones Energéticas, Mediambientales y Tecnológicas) qui définit la tension aux bornes de l'accumulateur en fonction de quelques paramètres, tels que le courant imposé, son état de charge et sa température. Ce modèle tient compte du rendement faradique en charge pour calculer l'évolution de son état de charge. (28)

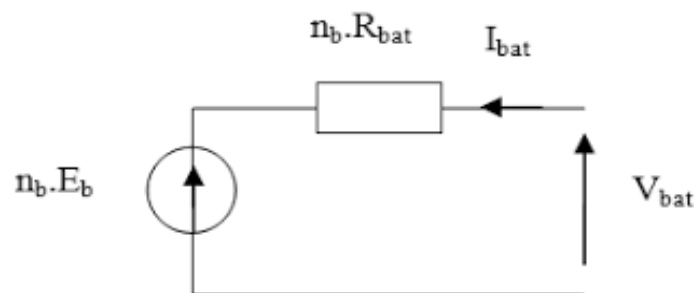


Figure III-39-Schéma équivalent électrique de la batterie dans le modèle CIEMAT

Dans ce modèle, pour n_b cellules en série, la tension aux bornes de la batterie est donnée par la relation suivante, Où U_{bat} et I_{bat} sont la tension et le courant de la batterie, E_b est la f.é.m. (force électromotrice) d'une cellule de la batterie et R_{bat} sa résistance interne. (28)

$$U_{bat} = n_b E_b \pm n_b R_{bat} I_{bat} \quad (36)$$

La description du comportement de la batterie selon le modèle CIEMAT, nécessite trois équations correspondantes aux trois régimes de fonctionnements : le régime de décharge, le régime de charge et le régime de surcharge de la batterie. L'ensemble de ces équations tient compte de l'expression normalisée de la capacité C_{bat} de la batterie. L'état de charge EDC de la batterie est fonction de la charge résiduelle et du régime de charge ou de décharge. (28)

III.3.3 Modélisation de la capacité C_{bat} :

Le modèle de la capacité C_{bat} donne la quantité d'énergie que peut restituer la batterie en fonction du courant moyen de décharge $I_{bat, moy, déch}$. Cette capacité est donnée par :

$$C_{bat} = \frac{1,67 C_{10}}{1 + 0,67 \left(\frac{I_{bat}}{I_{10}}\right)^{0,9}} (1 + 0,005 \Delta T) \quad (37)$$

I_{10} : Courant nominal de la batterie (en A) donné par le constructeur ;

C_{10} : Capacité nominale de la batterie (en Ah) en régime de décharge à courant constant durant 10 heures. Elle est donnée par le constructeur et elle est telle que :

$$C_{10} = 10 I_{10} \quad (38)$$

ΔT : L'échauffement de la batterie par rapport à la température ambiante de 25°C. Il est supposé identique pour tous les éléments de la batterie. L'état de charge de la batterie EDC est fonction de la capacité C_{bat} et de la quantité de charge manquante à la batterie Q_m (28). L'évolution temporelle de cette dernière, dépend du mode de fonctionnement de la batterie, elle est définie par :

$$Q_m = I_{bat} t \quad (39)$$

Où t est la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant I_{bat} . L'expression de l'état de charge de la batterie EDC est donnée par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_m}{C_{bat}} \quad (40)$$

III.3.3.1 Tension de batterie en régime de décharge :

$$U_{\text{bat-déché}} = n_b E_{\text{b-déché}} - n_b R_{\text{b-déché}} |I_{\text{bat}}| \quad (41)$$

$$E_{\text{b-déché}} = 1.965 + 0,12 \text{ EDC} \quad (42)$$

$$R_{\text{b-déché}} = R_{\text{bat}} = \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + |I_{\text{bat}}|^{0.3}} + \frac{0.27}{\text{EDC}^{1.5}} + 0,02 \right) (1 - 0.007\Delta T) \quad (43)$$

III.3.3.2 Tension de batterie en régime de charge

En régime de charge et avant l'apparition du phénomène de "Gassing" (dégagement gazeux d'hydrogène et d'oxygène), la f.é.m. et la résistance interne sont déterminées par :

$$E_{\text{b-charge}} = 2 + 0,16 \text{ EDC} \quad (44)$$

$$R_{\text{b-charge}} = R_{\text{char}} = \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{6}{1 + |I_{\text{bat}}|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - \text{EDC})^{1.2}} + 0,036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (45)$$

D'où l'expression de la tension de la batterie avant la charge :

$$U_{\text{bat-charge}} = n_b E_{\text{b-charge}} + n_b R_{\text{b-charge}} I_{\text{bat}} \quad (46)$$

III.3.3.3 Tension de batterie en régime de surcharge :

En régime de surcharge, l'expression de la tension de la batterie tient compte de deux phénomènes physiques qui sont, le "Gassing" dont la tension est V_g et la saturation qui exprime le repos de la batterie, lorsque son état de charge ne varie plus entraînant la tension de batterie appelée tension de fin de charge V_{ec} (28). Pour ce régime de surcharge, l'expression de la tension de batterie est alors donnée par :

$$U_{\text{bat-surcharge}} = n_b V_g + n_b (V_{ec} - V_g) \left[1 - \exp \frac{t - t_g}{\tau_g} \right] \quad (47)$$

Avec :

t_g : l'instant au bout duquel $U_{\text{bat-charge}} = V_g$;

V_g : Tension de "Gassing" ;

V_{ec} : Tension de fin de charge ;

τ_g : Constante de temps.

$$V_g = \left[2,24 + 1,97 \ln \left(1 + \frac{I_{bat}}{C_{10}} \right) \right] (1 - 0,002\Delta T) \quad (48)$$

$$V_{ec} = \left[2,45 + 2,011 \ln \left(1 + \frac{I_{bat}}{C_{10}} \right) \right] (1 - 0,002\Delta T) \quad (49)$$

$$\tau_g = \frac{1,73}{1 + 852 \left(\frac{I_{bat}}{C_{10}} \right)^{1.67}} \quad (50)$$

III.3.4 Modélisation du rendement faradique :

Les rendements Faradiques, ou Coulombiens, sont des rendements qui concernent la capacité de la batterie à emmagasiner de l'énergie. Ils ne font pas intervenir les pertes par effet Joule dans la résistance interne. Pour le modèle CIEMAT, le rendement Faradique est pris en compte dans le cas de la charge et il est supposé égal à 1 ($\eta_{décharge} = 1$) en régime de décharge. Le rendement Faradique en charge dépend du taux de charge, il a une valeur voisine de 100 % pour de faibles courants de charge et un faible état de charge. Puis, il se dégrade lorsque nous approchons de la pleine charge (28). η_{charge} est donné par la relation suivante :

$$\eta_{charge} = 1 - \exp \left[\frac{20,73}{\frac{I_{bat}}{I_{10}} + 0,55} (EDC - 1) \right] \quad (51)$$

III.4 Modélisation du système hybride (photovoltaïque-éolien)

L'énergie délivrée par un module photovoltaïque est décrite par la caractéristique (I–V) qui varie de manière à ce que le courant suivie une relation de la forme : $I = f(V, E_s, T_j)$. On voudrait toujours déterminer la puissance maximale que peut fournir un groupe de modules photovoltaïques pour un ensoleillement et une température donnée. La puissance produite par un aérogénérateur éolien est estimée par la relation suivante :

$$P = \int_{V_i}^V P(V)f(V) dV \quad (52)$$

Ainsi, connaissant les caractéristiques de l'aérogénérateur choisi, de la moyenne mensuelle par jour de la vitesse du vent et de la densité de probabilité de Weibull correspondante, nous pouvons déduire rapidement la puissance produite par le système hybride.

$$E_{p_v} S_{p_v} + E_e S_e = E_d \quad (53)$$

III.4.1 Capacité du système de stockage

La taille de la batterie de stockage est déterminée à partir de la charge demandée maximale E_{dmax} (charge mensuelle maximale) (29). La capacité de la batterie de stockage (en Ah) pour une période de temps Δt par jour est donnée par l'équation suivante :

$$C_{bat} = \frac{E_{dmax} \cdot 1000 \Delta t}{V_{sys} N_m} \quad (54)$$

V_{sys} : Tension nominale du système ;

N_m : Nombre de jours du moins le plus défavorable ;

Δt : Durée relative en jours à l'autonomie demandée, qui est définie par le concepteur. La capacité réelle de la batterie est déterminée à partir de la capacité d'une unité de batterie $C_{bat,u}$ comme pour le cas des surfaces des générateurs photovoltaïque et éolien.

Elle est donnée par l'équation suivante :

$$C_{bat,u} = C^{te} C_{bat,u} \quad (55)$$

C^{te} qui est une constante donnée par la partie entière du rapport $\left(\frac{C_{bat}}{C_{bat,u}} \right)$

III.4.2 Coefficient d'autonomie R :

Le coefficient d'autonomie R du système est calculé à partir du rapport du nombre total des jours où on a le déficit au nombre total des jours de l'opération. (29)

$$R = 1 - \frac{N_{jd}}{N_{tot}} \quad (56)$$

N_{jd} : Nombre total des jours de l'année où on a le déficit d'énergie ;

N_{tot} : Nombre total des jours de l'année de fonctionnement.

Pour une opération annuelle, le nombre total est égal à 365 jours. Dans le système de mesure et d'optimisation, le critère d'autonomie est : $R \geq R_{min}$ avec R_{min} la fraction minimale du temps alloué pour lequel le système doit couvrir la demande. (29)

III.4.3 Surfaces retenues des composantes renouvelables

La composante retenue de la surface $S_{i,a}$ ($i = 1$ pour le PV et $i = 2$ pour l'éolien) est particulièrement essentielle pour les systèmes de petite échelle économique. Ceci est pris en

compte en introduisant la surface de l'unité de composante $S_{i,u}$ ($S_{Pv,u} = 0,3mm^2$ et $S_{éol,u} = 0,65mm^2$) (29). La surface retenue est calculée à partir de l'équation suivante :

$$S_{i,u}^s = C^{te} S_{i,u} \quad (57)$$

Avec : C^{te} est un nombre entier voisin à degré élevé du rapport, S Représente le scénario

$$\frac{S_i^s}{S_{i,s}} \quad (58)$$

Conclusion

Ce chapitre traite en termes généraux des lois qui peuvent être utilisées pour obtenir une modélisation du système hybride photovoltaïque - éolienne, également dans l'étude du modèle de système de stockage.

Chapitre IV

Simulation et interprétation des résultats

Introduction

Un système d'alimentation hybride est composé de divers composants. Lors de la conception d'un système électrique hybride, des facteurs tels que la taille des composants, les configurations du système, l'adéquation des diverses ressources d'énergie renouvelable dans cette région, les aspects économiques du projet avec l'évolution des charges et des coûts des composants, le cycle de vie du système, le coût actuel net du système, le coût de l'énergie pour l'utilisateur final, les coûts de maintenance et les coûts de fonctionnement annuels du système hybride aideront le décideur à déterminer les solutions les plus rentables du système hybride pour répondre aux charges électriques pour lesquelles il est en cours de conception. Ce chapitre présente une étude de cas conçue où l'Algérie est choisie.

IV.1 Présentation de logiciel HOMER PRO

HOMER (HybridOptimization of Multiple Energy Resources) est un logiciel développé pour des systèmes de production d'énergie de petites puissances. Il permet de faire des simulations de systèmes avec des énergies renouvelables et avec des énergies fossiles. Un de ses grands atouts est la possibilité de pouvoir simuler des systèmes hybrides combinant différentes sources d'énergie qu'elle soit renouvelable ou fossile.

Tout d'abord, ce logiciel permet de faire des simulations pour ensuite optimiser les systèmes et pour finalement terminer avec des analyses de sensibilité sur ces systèmes optimisés. La solution obtenue par HOMER est la solution la moins coûteuse parmi différentes combinaisons de systèmes d'énergies renouvelables, d'énergies fossiles ou de systèmes hybrides comprenant deux sources d'énergie ou plus. Figure IV -1 représente le modèle conceptuel du logiciel HOMER.

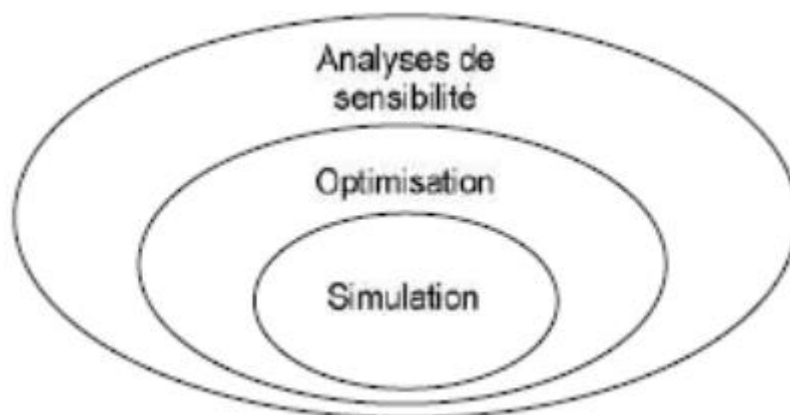


Figure IV-40-Modèle conceptuel du logiciel HOMER.

Le logiciel permet de faire la simulation d'un système selon des données de gisement (solaire, éolien, diesel, etc.) en fonction d'une demande énergétique (besoins en énergie). Par la suite, il est possible d'analyser plusieurs configurations différentes pour ce même système afin d'en obtenir un système optimisé au niveau du coût. Le logiciel simule toutes les configurations demandées et donne la meilleure solution, la solution la moins chère, parmi celles-ci. Ensuite, il est finalement possible de faire des analyses de sensibilité afin de savoir si la solution trouvée reste la meilleure même s'il y a certains changements dans les différents paramètres entrés (variation du coût de la technologie, variation dans les données de gisement, etc.). Il est donc possible de faire bon nombre d'analyses avec de nombreuses configurations différentes en moins de quelques minutes de simulation. (30)

IV.2 Les étapes du fonctionnement du logiciel HOMER

Pour le fonctionnement de Homer, les utilisateurs doivent suivre les étapes suivantes :

IV.2.1 Définir le projet

(Onglet Home) À la première ouverture du logiciel, un environnement pour définir le projet s'offre à nous. Il sert à entrer le nom du projet, l'auteur, une description sommaire du projet et la localisation du projet. Cette dernière servira à télécharger les données des ressources (vent et rayonnement solaire).

Le cas d'étude de cette mémoire est une zone de la wilaya d'Adrar (Reggane).

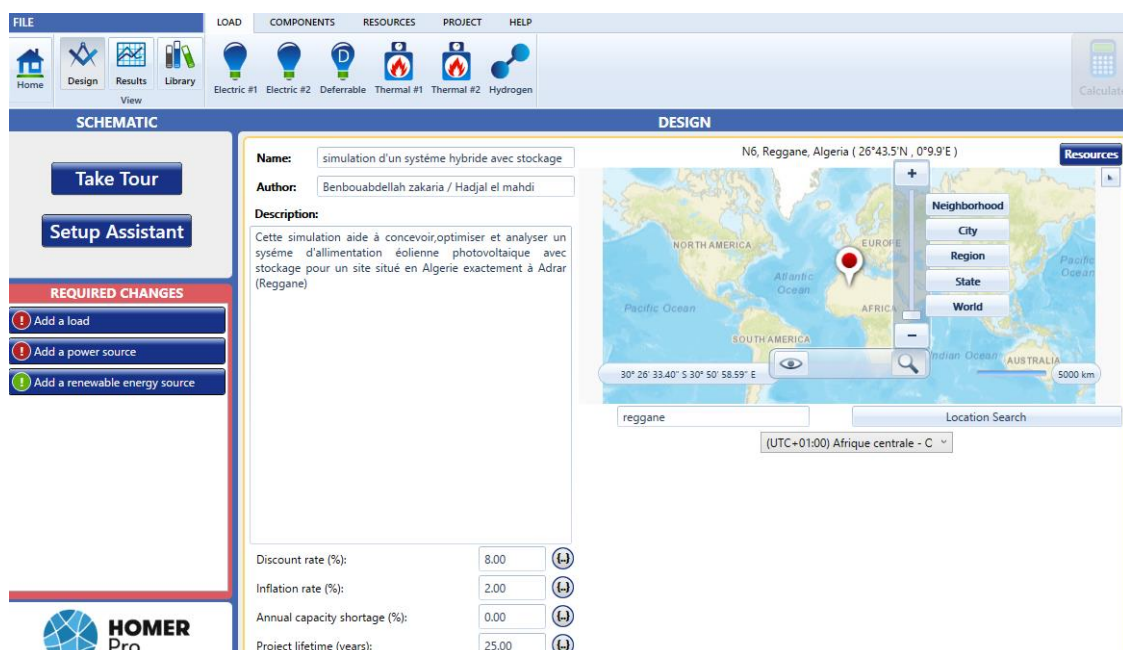


Figure IV-41-Écran d'accueil HOMER.

IV.2.2 Conception du système (Onglet Design)

IV.2.2.1 Entrer la charge

Sous le menu Load nous pouvons définir les charges à supporter par le système. Nous devons ajouter le profil de la charge au modèle, modifier les spécifications de chargement après l'ajout de la charge au modèle et spécifier le type de la charge (primaire, thermique, secondaire ou d'hydrogène)

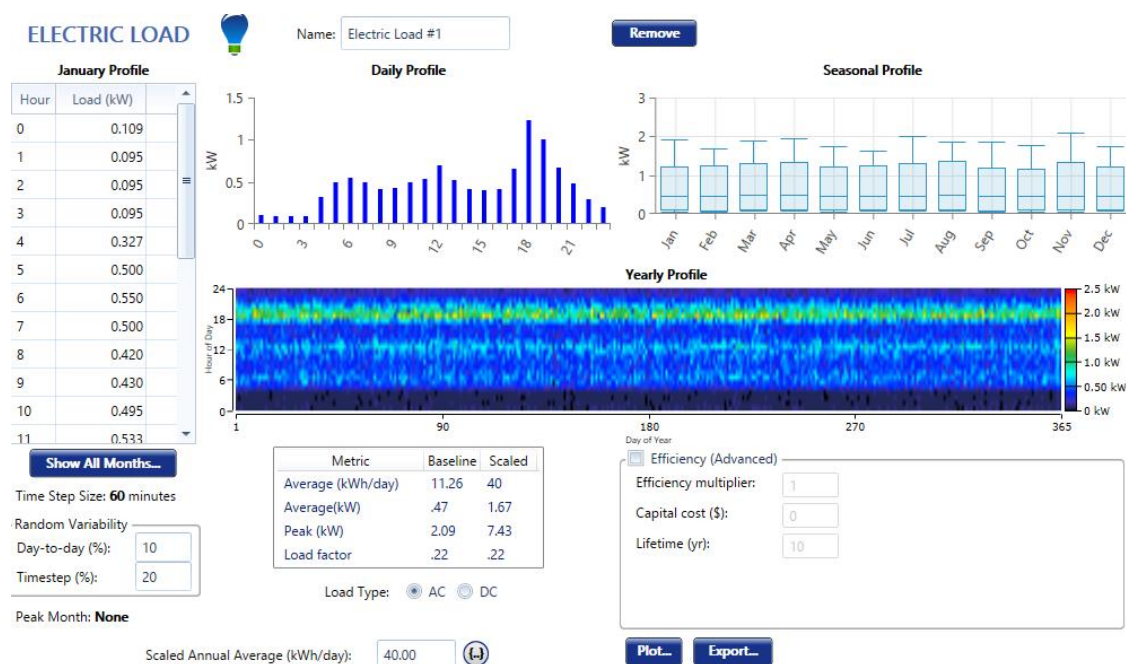


Figure IV-42-Charge primaire importée dans HOMER (avec spécifications de variabilité aléatoire).

IV.2.2.2 Entrer le détail des ressources

HOMER définit une ressource comme étant tout ce qui provient de l'extérieur du système. Chaque ressource est liée à un composant (exemple les données de vent pour l'éolienne). Le menu Ressources permet d'introduire les données de la ressource. Ces dernières peuvent être importées à partir des bases de données de HOMER suivant la localisation du projet. Ils peuvent être téléchargés à partir d'un fichier ou entrer directement.

a. Données sur les ressources solaires

La connaissance de l'éclairement énergétique à la surface d'un capteur est essentielle pour l'évaluation des ressources solaires. La plupart des stations météorologiques enregistrent

l'irradiation totale sur une surface horizontale également connue sous le nom d'irradiation globale horizontale (GHI). GHI, quant à lui, représente la somme du rayonnement solaire incident directement à la surface de la terre et de l'irradiance horizontale diffuse (DHI). C'est un paramètre important pour la conception des systèmes photovoltaïques à panneaux. L'irradiance horizontale diffuse est le rayonnement du soleil qui ne frappe pas directement la surface de la terre, mais a plutôt été dispersé par des molécules, des nuages, de la poussière ou d'autres particules dans l'atmosphère terrestre et vient également de toutes les directions. La zone d'étude de cas étant située à Adrar, le district de ressources solaires obtenu à partir de la base de données de prévision des ressources énergétiques mondiales (POWER) de la NASA.

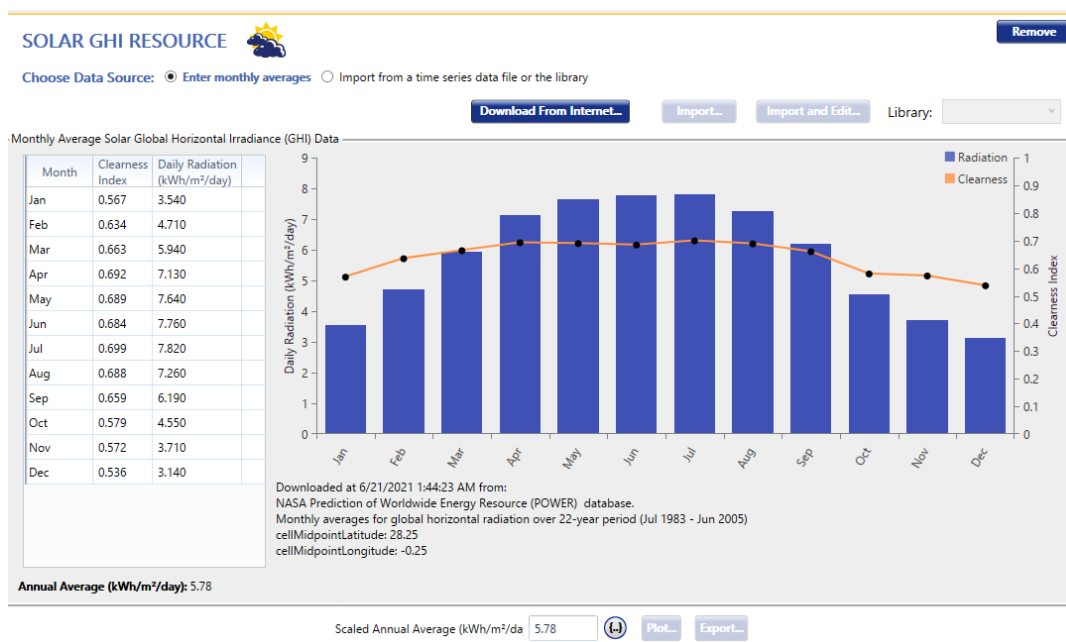


Figure IV-43-Rayonnement quotidien de Adrar région de Reggane.

b. Données sur les ressources éoliennes

Tout comme le solaire, pour quantifier le potentiel éolien dans une zone, des vitesses de vent à certaines hauteurs de moyeu sont nécessaires. La mesure des données de vent dans les stations météorologiques est généralement effectuée à une hauteur de moyeu de 10 m et est principalement utilisée à des fins de prévision météorologique. Pour notre site la vitesse du vent moyenne annuelle de 6.35 m/s hauteur de 10 m selon l'enregistrement de la base de données de prévision des ressources énergétiques mondiales (POWER) de la NASA, comme le montre la figure L'énergie électrique peut être générée à partir de l'énergie éolienne lorsque le vent souffle à travers une éolienne. L'énergie cinétique du vent à la vitesse nominale du vent est convertie en puissance mécanique en faisant tourner la pale de turbine, produisant ainsi de l'électricité à travers l'arbre relié à l'alternateur.

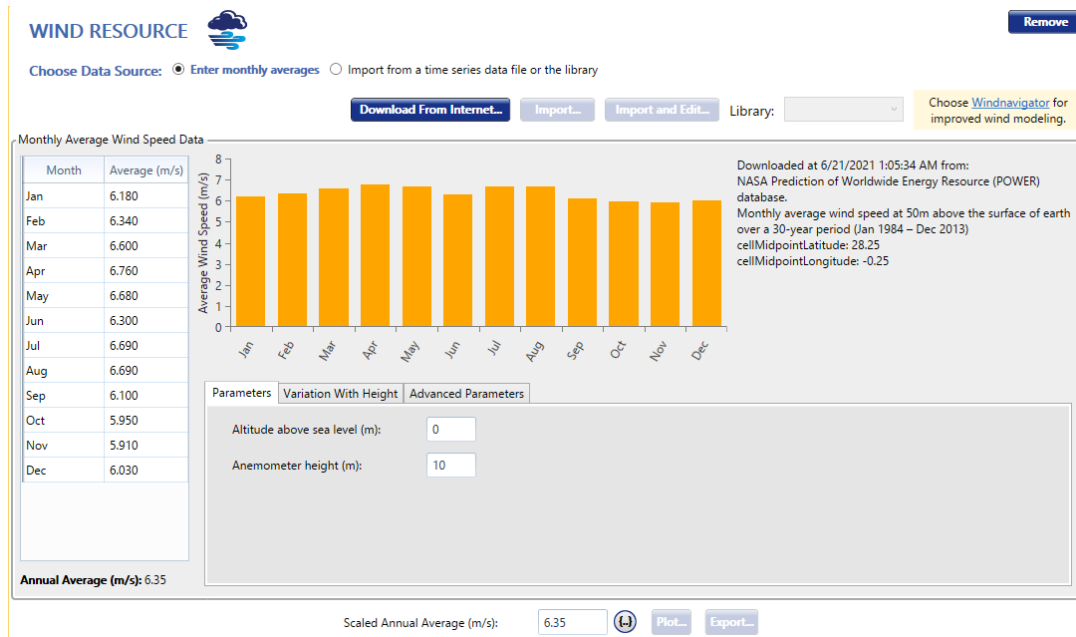


Figure IV-44-Vitesse moyenne mensuelle du vent reçu.

c. Température ambiante

La température ambiante Figure III-6 sur le site sélectionné (Reganne) est également d'une grande importance, car les performances solaires photovoltaïques ont une corrélation négative avec la température ambiante, comme le montre la revue de la littérature. La température quotidienne moyenne annuelle dans ce cas est de 24.78 °C. La température quotidienne la plus élevée enregistrée au cours de la saison est de 37.30 °C pour juillet. Cependant, la température quotidienne la plus basse est de 11.59 °C en janvier.

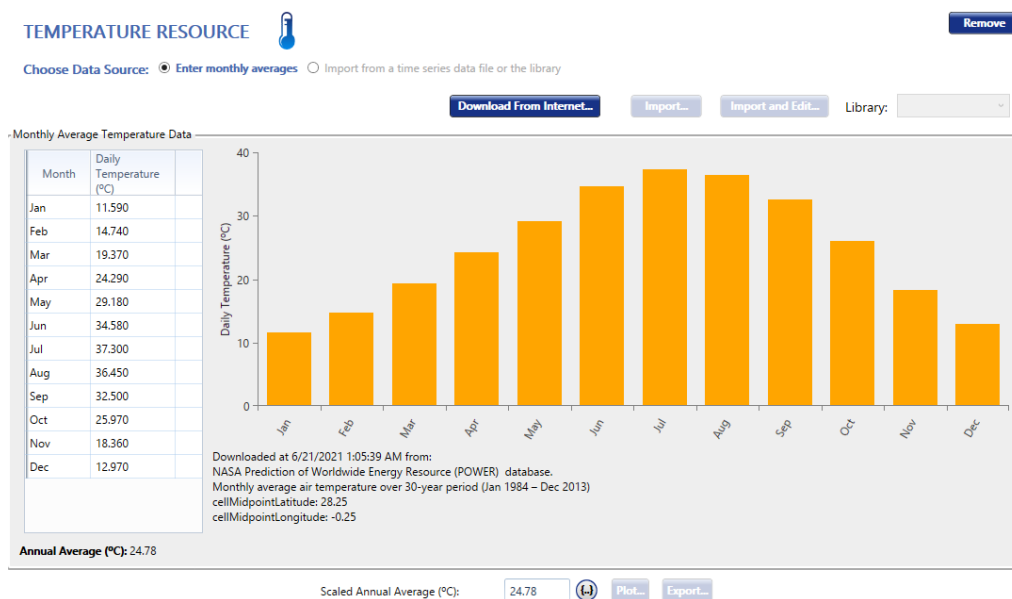


Figure IV-45-Température de l'air ambiant moyenne mensuelle reçue.

Tableau I-Rayonnement solaire et vitesse du vent incluant la température moyenne.

Mois	Indice de clarté	Vitesse du vent [m/s]	Rayonnement solaire [KWh/m ² /jour]	Température moyenne[°C]
Janvier	0.567	6.180	3.540	11.590
Février	0.634	6.340	4.710	14.740
Mars	0.663	6.600	5.940	19.370
Avril	0.692	6.760	7.130	24.290
May	0.689	6.680	7.640	29.180
Juin	0.684	6.300	7.760	34.580
Juillet	0.699	6.690	7.820	37.300
Août	0.688	6.690	6.260	39.450
Septembre	0.659	6.100	6.190	32.500
Octobre	0.579	5.950	4.550	25.970
Novembre	0.572	5.910	3.710	18.360
Décembre	0.536	6.030	3.140	12.970

IV.2.2.3 Choisir les composants

En utilisant le menu component, nous pouvons choisir tous les composants que nous voulons considérer dans notre système d'alimentation. HOMER offre un nombre considérable de composants à savoir générateur, PV, éolienne, différents dispositifs de stockages, convertisseur, hydro, reformer, électrolyseur, réservoir d'hydrogène, hydro cinétique, réseau et contrôleur de charge thermique. D'autres modules concernant l'énergie biomasse sont aussi disponibles via l'ajout d'un module supplémentaire du logiciel. Lors du choix des composants, il est un important de sélectionner tous les composants des différents systèmes que nous voulons considérer et d'entrer les spécifications techniques et les différents coûts pour chaque composant.

a. Spécifications panneaux solaires photovoltaïques

Les panneaux solaires sont un groupe de cellules connectées en parallèle et en série pour générer la puissance électrique requise en fonction de facteurs météorologiques tels que le rayonnement solaire et la température. Un panneau en silicium multi-cristallin modèle **Froniussymo 4.5-3-S withGeneric PV**, a été utilisé dans l'étude en raison de son efficacité relative élevée 17.30% de sa robustesse, de ses performances exceptionnelles à faible éclairage. Le composant a été choisi pour être le principal générateur d'électricité en raison

de l'ensoleillement abondant. Avec le bon angle d'inclinaison, les modules bénéficient d'un ensoleillement tout au long de la journée.

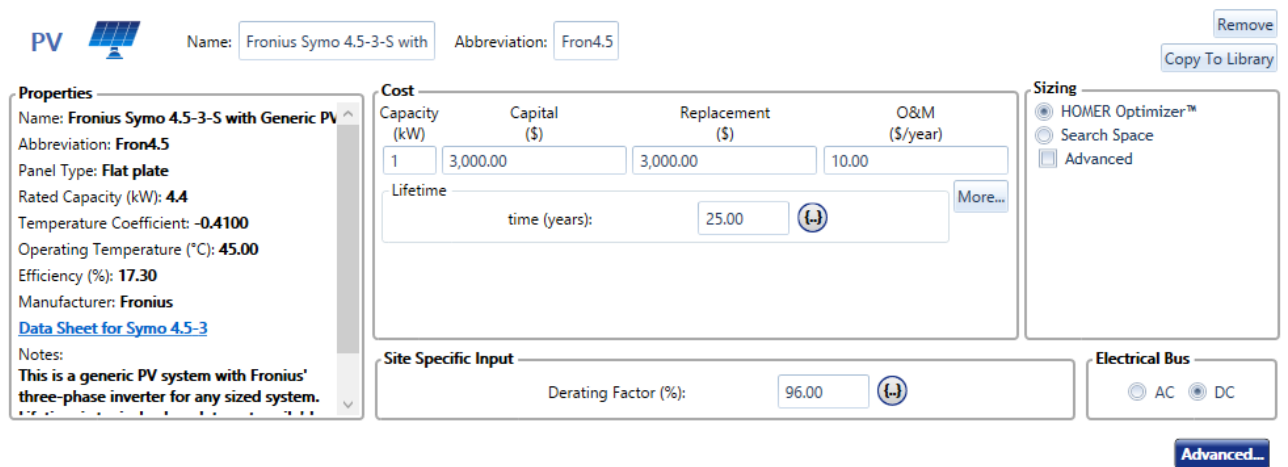


Figure IV-46-Spécifications des modules solaires photovoltaïques.

Tableau II-Paramètres de conception des modules solaires photovoltaïques.

Paramètres	Unité	Valeur
Coût de remplacement	\$	3,000.00
Coût d'exploitation et d'entretien	\$/ans	10.00
Température de fonctionnement	°C	45
Coefficient de température	°C	-0.460
Capacité nominale	KW	4.4
Facteur de déclassement	%	96
Efficacité	%	17.3

b. Spécifications d'éoliennes

Le vent est caractérisé par sa vitesse et sa direction et influencé par des facteurs tels que la position géographique, les facteurs météorologiques et la hauteur au-dessus du niveau du sol.

L'éolienne en tournant intercepte le vent et capte ainsi une partie de son énergie cinétique et la transforme en énergie utilisable. Une éolienne **Generic** à axe vertical de 3 kW a été utilisée dans cette étude car il s'agit d'une éolienne à faible vitesse de démarrage (puisque le site est une zone venteuse Petite brise), silencieuse, sûre et fiable. Il a également une grande fiabilité dans les applications hors réseau. La courbe de puissance de cette turbine est représentée sur

la figure. Pour permettre au logiciel de trouver une solution optimale, des dispositions pour utiliser 0 (pas de turbine), 1, 2, 4, 6 et 10 unités ont été utilisées dans l'espace de recherche. La courbe de puissance est un graphique représentant la puissance de sortie d'une éolienne à des vitesses de vent différentes et les paramètres de conception.

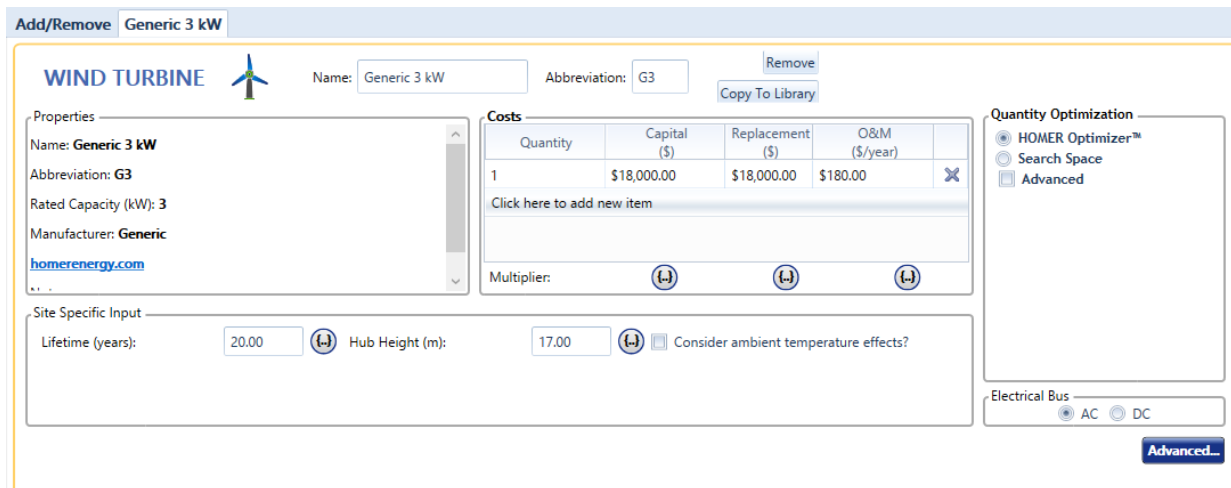


Figure IV-47-Spécifications HOMER pour éolienne

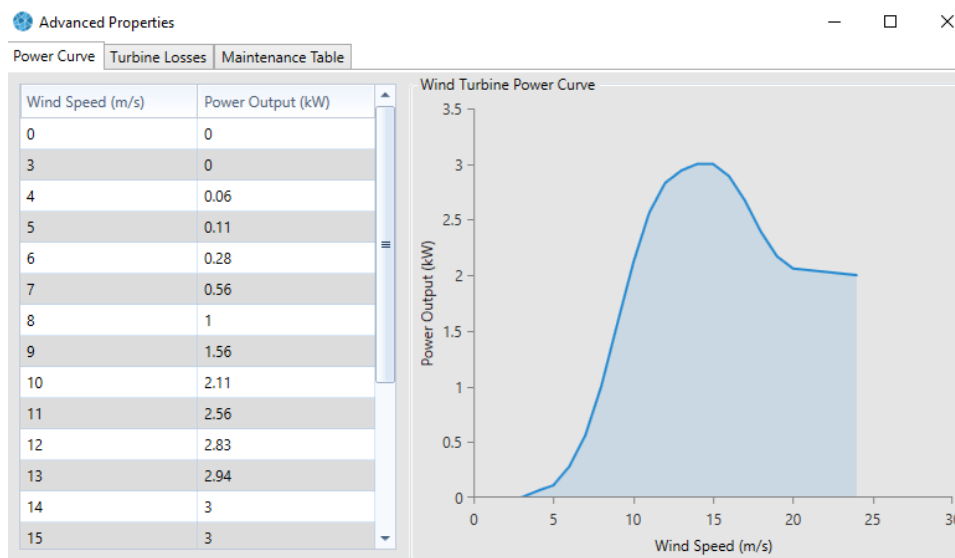



Figure IV-48-Courbe de puissance d'éolienne.

Tableau III- Paramètres de conception de l'éolienne.

Paramètres	Unité	Valeur
Coût en capital et de remplacement	\$	18,000.00
Coût d'exploitation et d'entretien	\$/ans	180.00
Diamètre du rotor	M	2.18
Puissance nominale	Watts	3000
Vitesse du vent de coupure	m/s	3
Vitesse nominale du vent	m/s	10

c. Spécifications de la batterie

Lorsque la puissance générée par l'éolienne et le PV dans un système hybride est supérieure à la demande de charge, l'énergie excédentaire sera stockée dans les batteries et fournira de l'électricité pendant le temps. Le modèle de batterie EnerSys PowerSafe SBS 680 a été choisi pour la modélisation du système et les détails sont répertoriés dans le tableau. Le nombre de batteries considéré dans l'étude d'optimisation a été déterminé par l'optimiseur HOMER Pro qui a décidé du nombre total nécessaire. En cas de défaillance de la production d'électricité, l'énergie stockée sera utilisée pour alimenter la charge, ce qui améliore la fiabilité du système.

STORAGE  Name: Abbreviation: Remove Copy To Library

Properties

Kinetic Battery Model

- Nominal Voltage (V): 12
- Nominal Capacity (kWh): 9.16
- Maximum Capacity (Ah): 763
- Capacity Ratio: 0.156
- Rate Constant (1/hr): 4.67
- Roundtrip efficiency (%): 97
- Maximum Charge Current (A): 680
- Maximum Discharge Current (A): 720
- Maximum Charge Rate (A/Ah): 1

www.enersys.com

PowerSafe SBS EON Technology retain the benefits typically associated with EnerSys' Thin Plate Pure Lead Technology (long life, high energy density, superior shelf life, etc.), they also deliver exceptional cyclic performance in both float and fast charge applications, even in the hottest and harshest operating environments

EnerSys
www.enersys.com
 Mark Coughlin
mark.coughlin@uk.enersys.com
 +44 (0) 1633 590327 Connect with Vendor

Cost

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="530.00"/>	<input type="text" value="530.00"/>	<input type="text" value="0.00"/>

Lifetime

- throughput (kWh): [-] [+]
- time (years): [-] [+]

More...

Sizing

- HOMER Optimizer™
- Search Space
- Advanced

Site Specific Input

- String Size: Voltage: 12 V
- Initial State of Charge (%): [-] [+]
- Minimum State of Charge (%): [-] [+]
- Minimum storage life (yrs): [-] [+] Maintenance Schedule...

Figure IV-49-Spécifications HOMER pour le système de stockage (batterie).

Tableau IV-Paramètres de conception des batteries.

Paramètres	Unité	Valeur
Tension nominale	Volt	12
Capacité nominale	KWh	9.16
Efficacité aller-retour	%	97
Capacité maximale	Ah	763
Courant de charge max	A	680
Courant de décharge max	A	720

d. Spécifications du convertisseur

Le modèle conçu dans Homer Pro se compose à la fois de générateurs CC et CA connectés à une charge CA uniquement. Un convertisseur est donc nécessaire pour maintenir le flux d'énergie entre les composants AC et CC. Un convertisseur bidirectionnel triphasé Leonics MTP-413F 25 kW a été choisi pour le système. Le logiciel HOMER Pro est utilisé pour l'optimisation de la taille. La taille peut alors être réduite ou augmentée en fonction du résultat de la simulation.

The screenshot displays the configuration interface for a Leonics MTP-413F 25kW inverter in HOMER Pro. The interface is organized into several functional areas:

- Header:** Includes the 'CONVERTER' dropdown menu, a 'Complete Catalog' button, and a 'Remove' button.
- Properties Panel:**
 - Name: Leonics MTP-413F 25kW
 - Abbreviation: Leon25
 - Data Sheet for MTP-413F 25kW
 - Notes: Grid-forming & grid-following. "Hybrid-inverter," designed for hybrid power systems combining solar with diesel and other renewable energy sources. 25kW 240Vdc
- Costs Table:**

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$600.00	\$600.00	\$0.0
- Capacity Optimization:**
 - HOMER Optimizer™
 - Search Space
 - Advanced
- Inverter Input:**
 - Lifetime (years): 10.00
 - Efficiency (%): 96.00
 - Parallel with AC generator?
- Rectifier Input:**
 - Relative Capacity (%): 80.00
 - Efficiency (%): 94.00

Figure IV-50-Spécifications HOMER pour le convertisseur.

IV.2.2.4 Modèle des composants du système hybride

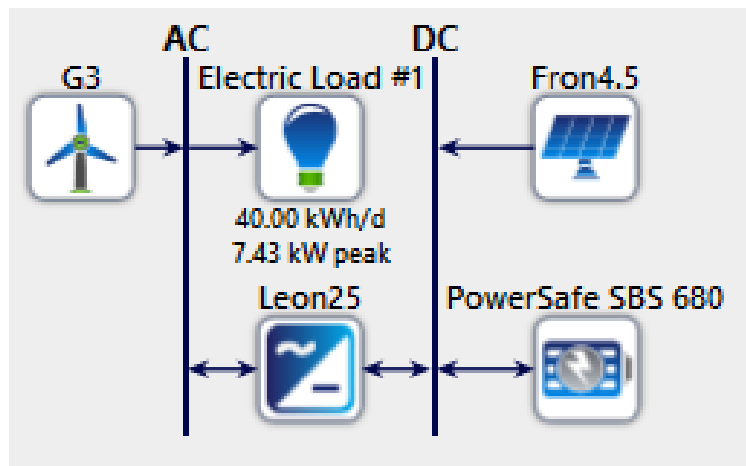


Figure IV-51-Schéma du système hybride simulé (Source : HOMER Pro).

IV.3 L'analyse des résultats de la simulation (Onglet ResultView)

Il s'agit de faire une analyse des coûts, du flux de trésorerie, de la consommation et la production de l'électricité du système, des émissions, des détails d'opération pour chaque composant, du carburant, du stockage et du réseau de chaque système simulé. Les différentes analyses se font en se basant sur les différents rapports, tables et graphes que Homer met à la disposition de l'utilisateur.

Dans cette étude, « une conception et une application de système hybride solaire-éolien de type domestique » est mise en œuvre. Les informations d'entrée qui doivent être fournies à HOMER comprennent : les charges électriques (un an de données de charge), les ressources renouvelables (telles qu'un an de données de rayonnement solaire), les détails/coûts techniques des composants, les contraintes, les contrôles, le type de stratégie de répartition, etc.

La figure III-13 ci-dessous indique à la fois la charge primaire CA (en bleu foncé) et la charge primaire CA desservie (en bleu) tout au long de l'année. La différence avec ces deux charges est représentée par la courbe en rouge. Cette courbe (rouge) est appelée charge électrique non satisfaite qui pourrait se produire parce que la puissance générée par le système n'était pas suffisante pour alimenter la charge.

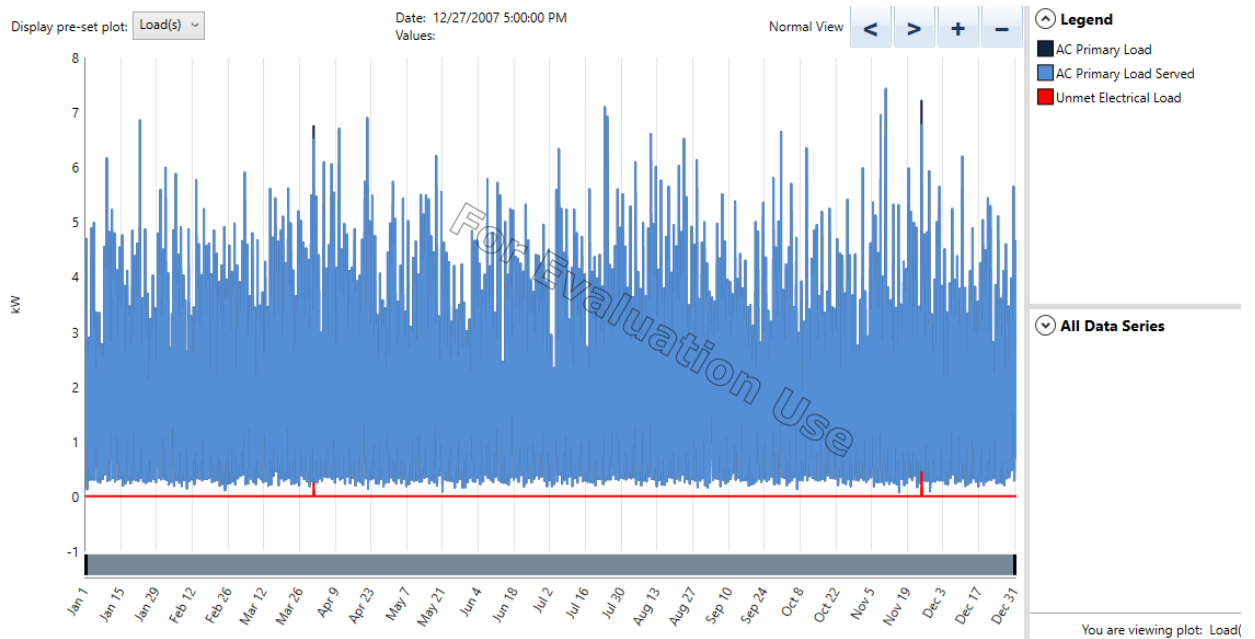


Figure IV-52-La charge primaire AC (bleu foncé), la charge primaire AC desservie (bleu) et la charge électrique non satisfaite (rouge).

On peut observer à partir du tableau que le PV fonctionnerait avec un facteur de capacité de 21.3%. Avec une capacité installée de 5.97 kW, le générateur photovoltaïque pourrait atteindre une puissance maximale de 4.40 kW. Le LCOE de 0,130 par kWh indiqué ci-dessus est basé sur le coût total des composants. Il s'agit du LCOE pour les coûts d'installation des panneaux photovoltaïques seuls.

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	5.97	kW
Mean Output	1.27	kW
Mean Output	30.5	kWh/d
Capacity Factor	21.3	%
Total Production	11,144	kWh/yr
Dedicated converter	4.40	kW

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	4.40	kW
PV Penetration	76.3	%
Hours of Operation	4,382	hrs/yr
Levelized Cost	0.130	\$/kWh

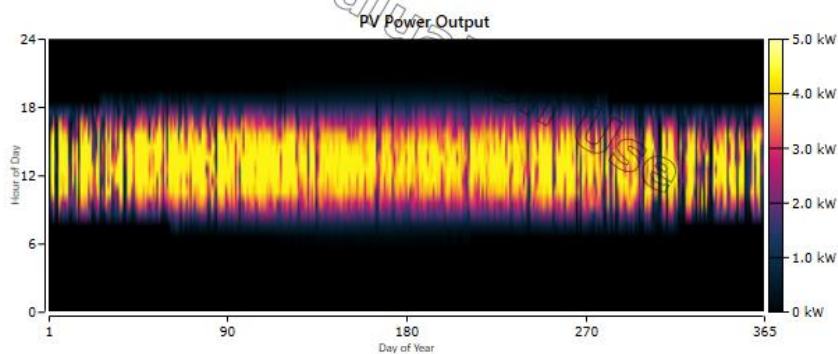


Figure IV-53-1 Puissance de sortie photovoltaïque.

L'éolienne procède un facteur de capacité de 28.6% illustré dans la Figure III-15 Avec une capacité installée de 3.00 kW, le générateur de l'éolien pourrait atteindre une puissance maximale de 3.04 kW. Le LCOE de 0,235 par kWh.

Quantity	Value	Units
Total Rated Capacity	3.00	kW
Mean Output	0.858	kW
Capacity Factor	28.6	%
Total Production	7,518	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	3.04	kW
Wind Penetration	51.5	%
Hours of Operation	7,529	hrs/yr
Levelized Cost	0,235	\$/kWh

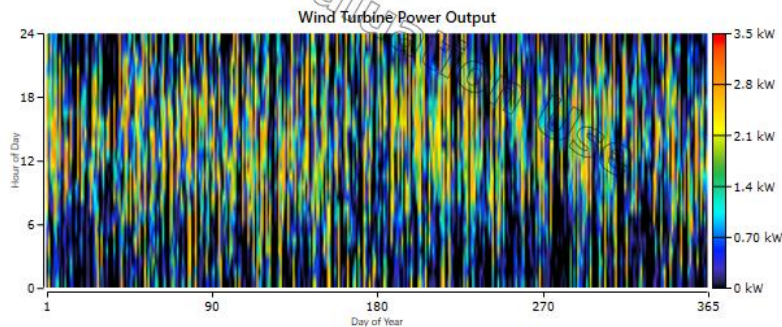


Figure IV-54-Puissance de sortie de l'éolienne.

- Performances du banc de batteries

L'architecture du système contient 24 batteries, avec une taille de chaîne de 1,00 par batterie, et 24 chaînes en parallèle et une tension de bus de 12 V. La taille de la batterie a une autonomie de 92,3 heures avec une capacité nominale de 220 kWh et un débit à vie de 89,229 kWh et durée de vie prévue de 15 ans. On peut voir sur la figure que l'état de charge du groupe de batteries varierait entre 30 et 100 %. Dans la figure III-17, on peut montrer que l'efficacité du groupe de batteries est de 97 %, c'est-à-dire qu'elle a 3 % de pertes. Cependant, le paramètre important est la durée de vie prévue de la batterie. Les résultats montrent que le parc de batteries aurait besoin d'être changé tous les 15 ans environ.

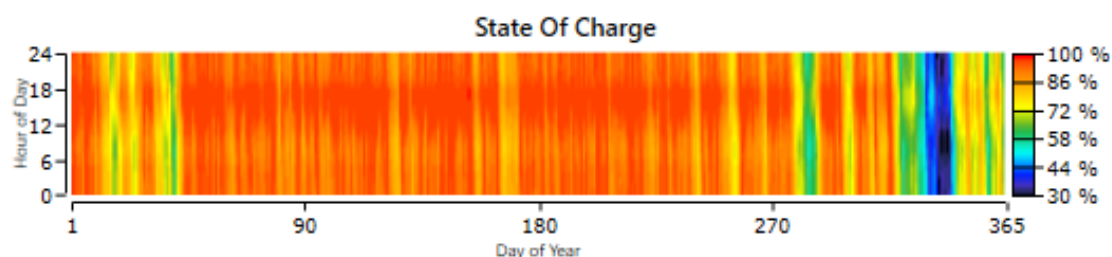


Figure IV-55-État de charge du stockage de la batterie pendant un an.

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Batteries	24.0	qty.	Autonomy	92.3	hr	Average Energy Cost	0	\$/kWh
String Size	1.00	batteries	Storage Wear Cost	0.0551	\$/kWh	Energy In	5,958	kWh/yr
Strings in Parallel	24.0	strings	Nominal Capacity	220	kWh	Energy Out	5,859	kWh/yr
Bus Voltage	12.0	V	Usable Nominal Capacity	154	kWh	Storage Depletion	80.9	kWh/yr
			Lifetime Throughput	89,229	kWh	Losses	180	kWh/yr
			Expected Life	15.0	yr	Annual Throughput	5,949	kWh/yr

Figure IV-56-Indicateurs de performance simulés pour le banc de batteries.

IV.4 L'analyse des résultats d'optimisation du système hybride PV-éolien (Onglet ResultView)

Le profil de charge et les données météorologiques du fonctionnement du système hybride PV-éolien sont utilisés dans cette étude. Les mesures horaires du rayonnement solaire et de la vitesse du vent sur une période d'un an ont été importées dans les outils HOMER pour calculer les valeurs moyennes mensuelles de l'indice de clarté et du rayonnement quotidien. Le rayonnement global moyen annuel est de 5.699 kWh/m²/jour avec un indice de clarté moyen annuel de 0,638 et le vent moyen annuel est de 6.435 m/s. Les résultats sont affichés sous une forme globale dans laquelle les configurations de système les mieux classées sont répertoriées en fonction de leur coût actuel net (CNP) pour le type de système possible. La figure III-16 montre une liste des combinaisons possibles de composants du système dans la forme globale.

Optimization Results												
Left Double Click on a particular system to see its detailed Simulation Results.												
Architecture										Cost		System
	Fron4.5 (kW)	Fron4.5-MPPT (kW)	G3	PowerSafe SBS 680	Leon25 (kW)	Dispatch	NPC (\$)	COE (\$)	Operating cost (\$/yr)	Initial capital (\$)	Ren Frac (%)	
	5.97	4.40	1	24	6.48	LF	\$65,462	\$0.347	\$1,002	\$52,510	100	
	5.97	4.40	1	24	6.48	CC	\$65,462	\$0.347	\$1,002	\$52,510	100	
	5.97	4.40	1	24	6.50	LF	\$65,483	\$0.347	\$1,003	\$52,519	100	
	5.97	4.40	1	24	6.50	CC	\$65,483	\$0.347	\$1,003	\$52,519	100	
	5.96	4.40	1	24	6.55	LF	\$65,522	\$0.347	\$1,004	\$52,539	100	
	5.96	4.40	1	24	6.55	CC	\$65,522	\$0.347	\$1,004	\$52,539	100	
	6.00	4.40	1	24	6.46	LF	\$65,536	\$0.347	\$1,001	\$52,589	100	
	6.00	4.40	1	24	6.46	CC	\$65,536	\$0.347	\$1,001	\$52,589	100	
	6.00	4.40	1	24	6.45	LF	\$65,545	\$0.347	\$1,001	\$52,599	100	
	6.00	4.40	1	24	6.45	CC	\$65,545	\$0.347	\$1,001	\$52,599	100	
	6.01	4.40	1	24	6.42	LF	\$65,547	\$0.347	\$1,000	\$52,614	100	
	6.01	4.40	1	24	6.42	CC	\$65,547	\$0.347	\$1,000	\$52,614	100	
	6.09	4.40	1	24	6.22	LF	\$65,579	\$0.347	\$993.93	\$52,730	100	
	6.09	4.40	1	24	6.22	CC	\$65,579	\$0.347	\$993.93	\$52,730	100	
	5.98	4.40	1	24	6.56	LF	\$65,594	\$0.348	\$1,005	\$52,601	100	

Figure IV-57-Résultat final du processus de simulation et d'optimisation.

Le système a été simulé pour évaluer ses caractéristiques opérationnelles, la production annuelle d'énergie électrique ; charges électriques annuelles desservies, excès d'électricité, fraction RE, pénurie de capacité, charge non satisfaite, etc. Une stratégie de contrôle de suivi de charge a été suivie dans la simulation. Dans le cadre de cette stratégie, chaque fois qu'un générateur d'électricité est nécessaire, il ne produit que suffisamment d'électricité pour répondre à la demande. La (figure IV-19) montre la production et la demande d'électricité pour le système d'énergie PV-éolien. Les résultats de la simulation montrent que ce système a une production annuelle totale d'énergie électrique de 18661 kWh/an, dans laquelle l'énergie totale produite à partir d'un générateur photovoltaïque est supérieure à l'énergie générée à partir d'une éolienne.

Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%
Fronius Symo 4.5-3-S with Generic PV	11,144	59.7	AC Primary Load	14,599	100
Generic 3 kW	7,518	40.3	DC Primary Load	0	0
Total	18,661	100	Deferrable Load	0	0
			Total	14,599	100

Figure IV-58-Production et demande d'électricité pour le système photovoltaïque-éolien.

De plus, la part du générateur photovoltaïque et de l'éolienne pour la production électrique de chaque mois de l'année est illustrée dans la (Figure IV -20) Comme on peut le voir, la quantité d'électricité produite par le vent varie de 0,8 MW en janvier à près de 1.8 MW en août.

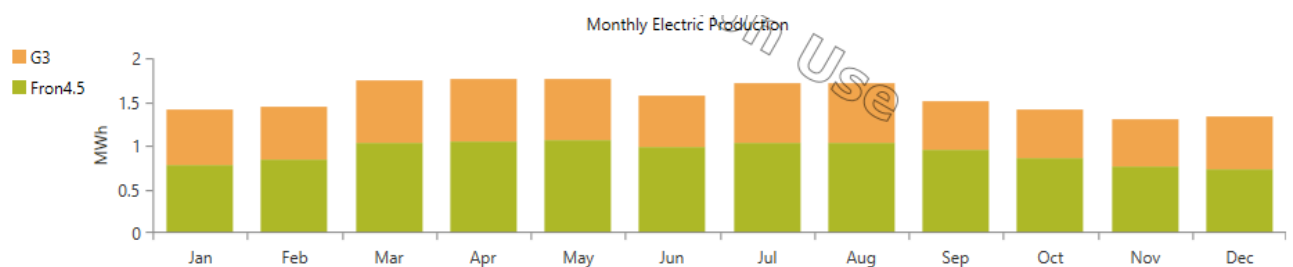


Figure IV-59-Contribution des unités de puissance pour une utilisation à 100 % des énergies renouvelables.

Conclusion

L'optimisation des ressources est un facteur majeur dans l'évaluation de l'efficacité des systèmes d'énergie renouvelable. Diverses méthodes sont utilisées par différents chercheurs dans la planification et le dimensionnement des systèmes hybrides photovoltaïques/éoliens connectés au réseau ou hors réseau. Dans cette étude, en utilisant le modèle informatique du logiciel HOMER, nous avons déterminé une énergie hybride efficace et économique qui utilise des sources éoliennes et solaires. Sur la base des résultats du processus d'optimisation, le système énergétique optimal comprend des modules PV de 4.4 kW, une éolienne (3 kW), un convertisseur de 25 kW et un nombre de 24 batteries.

Les résultats de la simulation montrent que ce système a une production annuelle totale d'énergie électrique de 18666 kWh/an, dans laquelle l'énergie totale produite à partir d'un générateur photovoltaïque est supérieure à l'énergie générée à partir d'une éolienne.

Conclusion générale

Le stockage est le maillon le plus faible du domaine énergétique, mais constitue un élément clé de la croissance des énergies renouvelables. Lorsque la source d'énergie est intermittente et située dans une zone isolée qui ne peut pas être connectée au réseau de distribution, le stockage devient crucial.

Il nous a été donné comme tâche, « la modélisation et la simulation d'un système de stockage dans une alimentation hybride (solaire-éolien) ». Le système étudié met en lumière différents équipements nécessaires dans une structure de cogénération alimentant une charge isolée ou éloignée du réseau local. Afin de mieux comprendre l'interaction entre les différents sous-systèmes, une étude détaillée mettant en avant leurs performances a été adoptée. Pour atteindre l'objectif de l'étude, nous avons considéré plusieurs aspects :

Tout d'abord une généralité sur les différents systèmes d'énergie renouvelable, ainsi les différents systèmes de stockage et les différentes combinaisons hybrides.

Ensuite, la modélisation des générateurs d'énergie solaire et éolienne ainsi que la modélisation des batteries nécessaires à la conversion d'énergie électrique solaire et éolienne respectivement est évoquée.

Afin de concevoir un système de production d'énergie hybride efficace, des sous-composants principaux (générateur PV, éolien et batterie) du système hybride ont aussi été élaborés.

Finalement dans le dernier chapitre, une simulation des différents composants (PV, éolien, batterie, convertisseur) du système hybride et la simulation du système complet monté sur une charge AC variable sont présentées. Toutes les simulations sont effectuées par HOMER PRO. Les résultats de simulations prouvent non seulement que l'intégration d'un système de stockage dans un jumelage solaire/éolien est possible.

Bibliographie

1. Adib, R., et al., *Renewables 2015 global status report*. Paris: REN21 Secretariat, 2015.
2. Al Anfaf, Mohamed Mladjao Mouhammad. *Contribution à la modélisation et à l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges*. Diss. Université de Lorraine, 2016.
3. HABI, HAFIDHA, and YAMINA BIBI. *Simulation et Optimisation des performances d'un système hybride intégrant des Energies renouvelables pour la génération d'Electricité*. Diss. Université Akli MouhandOulhadj-Bouira, 2016.
4. observatoire des énergies renouvelables. [En ligne] <http://www.energies-renouvelables.org/biogaz.asp>.
5. Gergaud, Olivier. *Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur*. Diss. École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2002.
6. *Qu'est-ce que l'énergie hydraulique*. edf. [En ligne] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-hydraulique>.
7. *Qu'est-ce que l'énergie solaire photovoltaïque ?* futura-sciences. [En ligne] <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-quest-ce-energie-solaire-photovoltaïque-14/>.
8. Énergie éolienne. wikipedia. [En ligne] https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_%C3%A9olienne.
9. *Quels sont les avantages et inconvénients des énergies renouvelables ?* vattenfall. [En ligne] <https://www.vattenfall.fr/le-mag-energie/avantages-inconvenients-des-energies-renouvelables>.
10. L. Stoyanov, « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables, » Ludmil Stoyanov.
11. H. Ibrahim, A. Ilinca and I. Perron, *Investigations des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés*, Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne LREE-03-Septembre 2008.
12. “ « La Biomasse : Composante de la Transition Énergétique », au centre d'un Workshopen marge du SIAM – Fédération de l'Énergie.” <https://www.fedenerg.ma/2018/04/29/la-biomasse-composante-de-la-transition-energetique-au-centre-dun-workshop-en-marge-du-siam/> (accessed Apr. 08, 2021).
13. “L'énergie houlomotrice : principe de fonctionnement | Hydrolienne, Haute tension, Énergie.” <https://www.pinterest.fr/pin/180495897546361110/> (accessed Apr. 08, 2021).

14. Aneke, M. and M. Wang, *Energy storage technologies and real/ife Applications-A*.
15. TaïkiVaïtchemé, Martin. *Modélisation et simulation d'un système de stockage intégré dans un micro-réseau autonome solaire-éolien*. Diss. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2019.
16. Korsaga, E., et al., *Comparaison et détermination des dispositifs de stockage appropriés pour un système photovoltaïque autonome en zone sahélienne*. 2018.
17. M. Gérard, "L ' énergie solaire photovoltaïque (PV) : une filière compétitive en site isolé," pp. 1–10, 2016.
18. Swisher, Randall, C. Real De Azua, and J. U. L. I. E. Clendenin. "Strong winds on the horizon: wind power comes of age." *Proceedings of the IEEE* 89.12 (2001): 1757-1764.
19. E. Muljadi, C.P. Butterfield, Yih-Huei Wan, «Axial flux, modular, permanent-magnet generator with a toroidal winding for wind turbine applications », *IEEE industry applications conference, St Louis, november 5-8, 1998*.
20. Huff, G., *DOE Global Energy Storage Data base*. 2015, Sandia National Lab. (SNL-NM),.
21. Eddahech, A., *Modélisation du vieillissement et détermination de l'état de santé de*.
22. Yahya, A. Ould Mohamed, A. Ould Mahmoud, and I. Youm. "Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque." *Revue des Energies Renouvelables* 11.3 (2008) : 473-483.
23. P. Stockage et al., "Modélisation Des Composants D ' un Système Hybride Panneaux Photovoltaïque – Stockage D ' énergie Via L ' hydrogène – Batteries," no. February, 2018, doi: 10.19044/esj.2018.v14n3p545.
24. El Aimani, Salma. *Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension*. Diss. Ecole Centrale de Lille, 2004.
25. B. Multon et al., "Etat de l ' art des aérogénérateurs To cite this version : HAL Id : hal-00674088," 2012.
26. M. BELATEL, F. BENCHIKH, Z. SIMOHAMED, F. FERHAT, and F. Z. AISSOUS, "Technologie du couplage d'un système hybride de type photovoltaïque-éolien avec la pile à combustible pour la production de l'électricité verte," *Rev. Des Energies Renouvelables*, vol. 1.
27. A. Baiwir and P. Andre, "Modélisation de systèmes de stockage électrique et leur intégration dans un réseau électrique intelligent Master en Sciences et Gestion de l ' Environnement – finalité Energies Renouvelables (ULg) Master en Développement Durable.
28. S. Hakim, M. Elyaqouti, L. Bouhouch, and A. Moudden, "Comparaison de deux modèles de batterie utilisés dans les systèmes photovoltaïques [Comparisonbetweentwomodels of the batterystorageused in the photovoltaic system]," vol. 20, no. 4, pp. 1033–10.
29. F. Boumediene, "Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité. Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah," *Mémoire de Magister*, p. 152, 2012.
30. KARA, Abdelfattah. *Dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de production d'énergie renouvelable pour des sites isolés en Algérie*. Diss. 2016.

Résumé

L'exploitation des énergies renouvelables connaît un grand essor dans les pays industrialisés et même dans quelques pays sous-développés. Le système hybride de production d'électricité (éolien - photovoltaïque) totalement autonome est la solution idéale pour ce genre de problème.

Nous présentons dans ce papier, une méthode de dimensionnement optimal du générateur photovoltaïque et du banc de batteries dans un système hybride de production d'électricité (éolien - photovoltaïque) totalement autonome.

Dans ce travail nous allons mettre en évidence que la gestion de ce système dépend essentiellement de la consommation demandée ce qui nous permettrait de prévoir des systèmes de stockage appropriés pour assurer une meilleure autonomie

Des stratégies pour développer un système de stockage efficace sont également présentées, ainsi qu'un bref aperçu des développements des techniques d'optimisation, de l'indice de fiabilité et des techniques d'analyse des coûts des systèmes hybrides d'énergie renouvelable à l'aide d'une simulation avec le logiciel Homer pro.

Abstract

The exploitation of renewable energies is booming in industrialized countries and even in some underdeveloped countries. The completely autonomous hybrid power generation system (wind - photovoltaic) is the ideal solution for this kind of problem. In this paper, we present a method for optimal sizing of the photovoltaic generator and the battery bank in a completely autonomous hybrid electricity production system (wind - photovoltaic).

In this work we will demonstrate that the management of this system depends essentially on the demanded consumption which would allow us to provide appropriate storage systems to ensure better autonomy. Strategies for developing and efficient storage system are also presented, along with a brief overview of developments in optimization techniques, reliability index and cost analysis techniques of hybrid renewable energy systems at the same time. using a simulation with Homer pro software.

ملخص

يزدهر استغلال الطاقات المتجددة في البلدان الصناعية وحتى في بعض البلدان المتخلفة. نظام توليد الطاقة الهجين المستقل تمامًا (الرياح - الكهروضوئية) هو الحل الأمثل لهذا النوع من المشاكل. في هذا البحث، نقدم طريقة للتجسيم الأمثل للمولد الكهروضوئي وبنك البطارية في نظام إنتاج الكهرباء الهجين المستقل تمامًا (الرياح - الكهروضوئية).

سنثبت في هذا العمل أن إدارة هذا النظام تعتمد بشكل أساسي على الاستهلاك المطلوب مما يسمح لنا بتوفير أنظمة تخزين مناسبة لضمان استقلالية أفضل. كما يتم تقديم استراتيجيات لتطوير نظام تخزين فعال، إلى جانب لمحة موجزة عن التطورات في تقنيات التحسين، ومؤشر الموثوقية وتقنيات تحليل التكلفة لأنظمة الطاقة المتجددة الهجينة في نفس الوقت. باستخدام محاكاة مع برنامج Homer pro.

Mots clés

Energie renouvelable, système hybride, éolien, panneau solaire, diesel, Homer PRO, batterie, stockage d'énergie,