

وزارة البحث العلمي والتعليم العالي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



N° d'ordre : M...../GE/2021

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de

MASTER EN : Électrotechnique

Filière : Énergies renouvelables en Électrotechnique

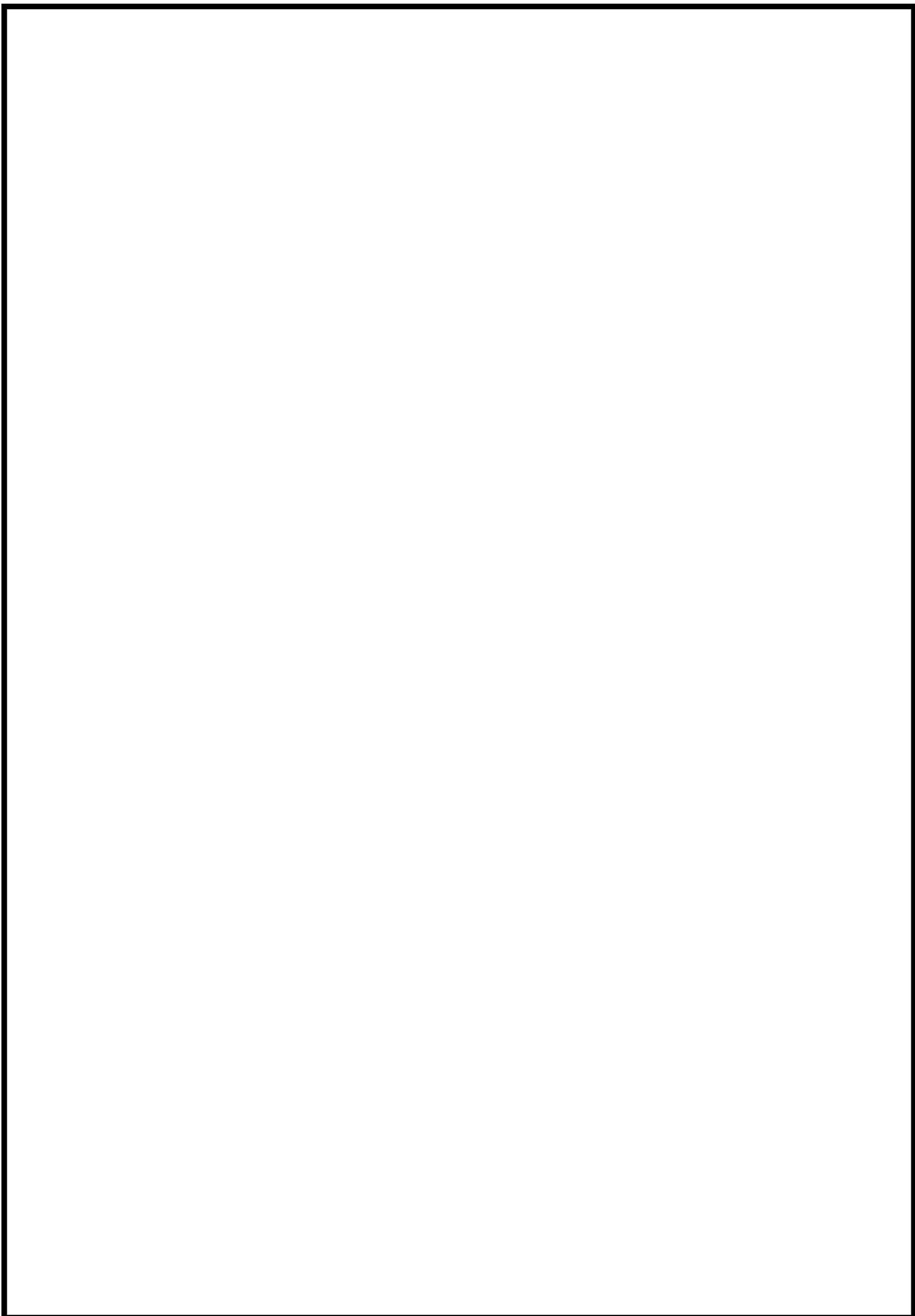
Par :

BOCOUM Oumou

**Stratégie de gestion de la centrale PV de EL Abiodh Sid Cheick
avec un stockage hybride batteries/supercondensateurs**

Soutenu le / / 2021 devant le jury composé de :

Président :	Mr BOUKORTT	Pr	UMAB
Examineur :	Mr MESKINE Said	MCA	UMAB
Encadreur :	Mr BEKKOUCHE Benaissa	Pr	UMAB
Co-encadreur :	DAHMOUN Mouhcn	Doctorant	UMAB



Remerciements

Je remercie Allah de m'avoir donnée la santé, le courage et la motivation pour mener à bien mon projet de fin d'étude.

Un grand merci à mon encadreur le professeur Bekkouche Benaissa de m'avoir pris sous son aile tout au long de ce projet à travers ces innombrables conseils, remarques et encouragements et surtout la patience dont il a fait preuve à mon égard ; merci également à mon Co encadreur Mr Mouhcen Dahmoun.

Je tiens à remercier les membres du jury Professeur BOUKORTT Abdelkader et le Maître de conférences MESKINE Said d'avoir consacré de leur temps pour la correction et l'évaluation de notre travail.

Mes sincères remerciements à tout le corps professoral de la faculté de sciences et technologies de l'université Abdel Hamid IBN BADIS de MOSTAGANEM. Particulièrement aux professeurs et enseignants du département du génie électrique.

Je remercie ma famille pour leurs encouragements et leur confiance tout au long de ce cursus universitaire. Surtout mon cher mari qui m'a permis de continuer mes études, m'a apporté son soutien malgré son incompréhension dans le domaine, et l'encouragement qu'il m'a procuré.

A mes frères, sœurs et amis qui m'ont été d'une grande aide dans la réalisation de ce mémoire : Salimata Bocoum, Hafsatou Dicko, Mahamat Zene Ayoub. A toutes les filles de la résidence universitaire de m'avoir aidée avec mon fils.

Enfin mes remerciements iront à tous mes amis, promotionnaires et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Merci à tous et toutes du fond du cœur.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A la mémoire de mon père bien aimé qui restera gravé dans mon cœur, je ne t'oublierai jamais « repose en paix ».

A ma très chère mère Dicko Haoua, ma profonde gratitude et mon incontestable reconnaissance, pour tous les sacrifices auxquels vous avez consentis, toute la confiance que vous m'accordez et tout l'amour dont vous m'entourez.

A mes frères, et mes sœurs pour leurs soutiens et leurs amours.

A mon mari et mon fils, les hommes de ma vie pour leur soutien inestimable.

Résumé

Ce mémoire présente le travail de recherche effectué pour la conception d'une stratégie de gestion, destinée à la centrale photovoltaïque située à el Abiodh Sid Cheick qui est raccordée au réseau. Le système considéré présente deux types de stockage un banc de batteries lithium-ion et un de supercondensateurs. Face au problème de gestion de l'énergie dans un système raccordé au réseau, et aux enjeux de maximisation de sa puissance produite, nous proposons de développer une stratégie de gestion basée sur les flux d'énergie. Nous avons obtenu comme résultat une pénétration de 30% avec ajout de ce stockage hybride sur notre centrale. La simulation a été effectuée par une programmation sur le logiciel Matlab.

Mots clés : Stratégie de gestion, stockage hybride, pénétration, supercondensateurs, batteries.

Abstract

This thesis presents the research work carried out for the design of a management strategy, for the photovoltaic power plant located in el Abiodh Sid Cheick which is connected to the grid. The system under consideration has two types of storage, a bank of lithium-ion batteries and one of supercapacitors. Faced with the problem of energy management in a system connected to the grid, and the challenges of maximizing its produced power, we propose to develop a management strategy based on energy flows. We have achieved as a result a penetration of 30% with the addition of this hybrid storage on our power plant. The simulation was performed by programming on the MATLAB software.

. **Keywords:** Management strategy, hybrid storage, penetration, supercapacitors, batteries.

ملخص

تقدم هذه الأطروحة الأعمال البحثية التي أجريت لتصميم استراتيجية إدارية لمحطة الطاقة الكهروضوئية الموجودة في الأبايود سيد شيك والمتصلة بالشبكة. ويحتوي النظام قيد النظر على نوعين من التخزين، هما مصرف بطاريات أيونات وفي مواجهة مشكلة إدارة الطاقة في نظام متصل بالشبكة، والتحديات المتمثلة في تعظيم . الليثيوم وأحد المكثفات الفائقة الطاقة المنتجة، نقترح وضع استراتيجية إدارية تقوم على تدفقات الطاقة. وقد حققنا نتيجة اختراق 30% مع إضافة هذا Matlab التخزين الهجين على محطة توليد الطاقة لدينا. تم إجراء المحاكاة من خلال البرمجة على برنامج

.الكلمات الرئيسية: استراتيجية الإدارة، والتخزين الهجين، والاختراق، المكثفات الفائقة، والبطاريات

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	13
INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : Présentation De la centrale photovoltaïque d’El Abiodh Sid Cheikh	3
I : Introduction :.....	3
I.2 : Critères du choix du site	4
I.3 : Situation de la centrale.....	4
I.4 : Les caractéristiques climatiques :.....	6
I.4 .1 : Précipitation :	6
I.4 .2 : Températures :	6
I.5 : les équipements de la centrale	6
I.6 : Description générale de la centrale :.....	7
I.6 .1 : Description de sous champ (2 MW)	7
a) : Raccordement des panneaux :.....	8
b) : Raccordement des chaines :	8
c) : Protection des chaînes :.....	8
d) Caractéristiques technique des câbles utilisé pour le raccordement :.....	10
I.6 .2 : Les différents équipements du SKID :.....	11
I.7 : Poste de livraison :.....	15
I.8 : Poste de commande :.....	16
I.9 : Système d’alimentation sans interruption (ASI) :.....	16
I.10 : Détecteur d’incendie :.....	17
I.11. Protection	17
I.12 Energie auxiliaire	18
I.13 Comportement en cas de perturbation sur le réseau	18

I.15 : Conclusion :	19
Chapitre II : Les différents systèmes De stockage	21
II. Introduction.....	21
II.1. 2. Les différents moyens de stockage de l'énergie électrique	21
II.1. 3. L'énergie hydraulique :	21
II.3.2. Centrales hydroélectriques :	22
II.3.3. Les centrales gravitaires :	22
II.3.4. Centrale hydroélectrique STEP :	23
II.3.6. Les types des installations hydrauliques :	24
II.3.7. Centrale hydroélectrique et stockage d'énergie :	25
II.3.8. Stations de transfert d'énergie par pompage :	25
II.3.9. Complexes hydroélectriques :	25
II.3.10. Les équipements électromécaniques :	26
II.3.11. Les avantages et les inconvénients des centrales hydroélectriques :	26
II.4. Les volants d'inertie.....	27
II.5. Stockage à air comprimé CAES	28
II.6. Le stockage électrochimique	29
II.6.1 Système d'accumulation d'énergie	29
II.6.2. Accumulateurs électrochimiques	30
II.6.3. Batterie lithium-ion	30
II.6.3.1. Format des cellules lithium-ion	31
II.7. Dimensionnement d'une batterie	32
II.9. Condensateurs.....	34
II.10. Supercondensateurs ou condensateurs double couche	35
II.10.1. Origine / historique	35
II.10.2. Principe de fonctionnement.....	35
II.10.3. Technologies.....	36
II.10.4. Grandeurs caractéristiques	37

II.10.5. Propriétés	37
II.10.7. Dimensionnement des supercondensateurs.....	40
II.11. Comparaison des différentes technologies de stockage.....	41
II.12. Hybridation du stockage.....	43
Chapitre Iii : LA STRATEGIE DE GESTION D'ENERGIE DE LA CENTRALE PHOTOVOLTAIQUE	45
III.1 Introduction.....	44
III.2. Structure du système prévu	44
III.3. La production d'énergie	45
III.4. La consommation d'énergie	46
III.5. Dimensionnement manuel.....	48
III.5.1. Les batteries	48
III.5.2. Les supercondensateurs.....	50
III.6. La stratégie de gestion d'énergie	51
III.6.1. Introduction.....	51
III.6.2. Méthodologie	52
III.6.3.. Organigramme general de la gestion d'énergie.....	55
III.6.4. Organigramme de charge du système de stockage	57
III.6.5. Organigramme de décharge ses systèmes de stockage.....	58
Conclusion générale	61
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	61

Table de figures

Chapitre I

Figure I. 1 : Position de la centrale par rapport la ville d'El Abiodh Sidi Cheikh [24]	5
Figure I. 2 : Illustration de raccordement de deux chaînes de module.....	8
Figure I. 3 : Schéma unifilaire de raccordement des chaînes PV.....	9
Figure I. 4 : Câble Électrique collecteur d'une section 95 mm ²	9
Figure I. 5 : Câble DC Principal d'une section de 150 mm ²	10
Figure I. 6 : Ensemble et l'emplacement des équipements de SKID	11
Figure I. 7 : Le transformateur de puissance SGB	13
Figure I. 8 : Le transformateur auxiliaire SBA.....	14
Figure I. 9 : L'armoire du RMU	14
Figure I. 10 : Schéma uni filaire de la connexion RMU entre deux Skids	15
Figure I. 11 : schéma unifilaire des cheminements des câbles	19

Chapitre II

Figure II. 1 : chaîne énergétique de la centrale hydraulique [9]	22
Figure II. 2 : système de transfert d'énergie par pompage STEP [9]	23
Figure II. 3 : Principe de fonctionnement des phases de pompage pour stocker l'énergie [10]	24
Figure II. 4 : Principe de fonctionnement des phases de turbinage pour produire de l'électricité [9]	Error! Bookmark not defined.
Figure II. 5 : Système du volant d'inertie.....	28
Figure II. 6 : Système de stockage par air comprimé	29
Figure II. 7 : a. Anatomie d'une cellule au Lithium ion et b. Mode de distribution des ions.....	31
Figure II. 8 : Modélisation d'un élément de batterie Li-ion.....	33
Figure II. 9 : Modélisation d'un banc de nB batteries au Li-ion.....	Error! Bookmark not defined.
Figure II. 10 : Comparaison des densités de puissance et énergétique de différentes technologies de stockage électrochimiques.....	34
Figure II. 11 : Structure d'un condensateur plan.....	34
Figure II. 12 : Diagramme de Ragone des systèmes électrochimiques de stockage d'énergie.....	38
Figure II. 13 : Modélisation d'un supercondensateur à partir des circuits RC.	41

Figure II. 13 : Comparatif des applications des principales technologies de stockage (ENEA)	44
---	----

Chapitre III

Figure III. 1 : Schéma de raccordement des différents éléments.....	44
Figure III. 2 : Courbe de la représentation en 3D de la production énergétique	45
Figure III. 3 : Courbe de production journalière en été.....	46
Figure III. 4 : Courbe en 3D de la consommation.	46
Figure III. 5 : Courbe de la consommation journalière durant l'été.....	47
Figure III. 6 : Schéma du branchement série parallèle des batteries.....	49
Figure III. 7 : Schéma du branchement des batteries avec le système PV	49
Figure III. 8 : schéma global du système.....	50
Figure III. 9 : Raccordement des systèmes de stockage	51
Figure III. 10 : Organigramme général de la stratégie de gestion	55
Figure III. 11 : Organigramme du processus de charge des systèmes de stockage	57
Figure III. 12 : Organigramme du processus de décharge des systèmes de stockage	58
Figure III. 13 : Courbe de la gestion d'énergie.....	59

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I. 1 : Coordonnées UTM des bornes de la structure de l'entreprise [24].....	5
Tableau I. 2 : caractéristiques de module CS6P – 255P	7
Tableau I. 3 : Caractéristiques techniques des câbles NFA2X - NA2XY	10
Tableau I. 4 : Caractéristiques technique de l'onduleur	12
Tableau I. 5 : Spécification technique du central box	13
Tableau I. 6 : les différentes cellules du poste	15

Chapitre II

Tableau II. 1 : comparaison des différentes technologies de stockage	42
--	----

Liste des abréviations

SCs : supercondensateurs

RMU : Ring main unit

ESE : élément de stockage électrochimique

C_{batt} : Capacité totale des batteries

V_{batt} : tension aux bornes de chaque batterie

E_{elec} : énergie électrique produite

E_{dm/j} : énergie produite par jour

J_a : nombre de jours d'autonomie

SAE : systèmes d'accumulation d'énergie

Q_{sc} : charge du supercondensateur

C_{sc} : capacité du supercondensateur

W_{sc} : énergie stockée dans le supercondensateur

ESR : résistance interne du supercondensateur

P_{scmax} : puissance maximale dans le supercondensateur

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Face au réchauffement climatique et au tarissement des énergies fossiles, mais également face à la croissance mondiale de la demande énergétique, le développement de sources d'énergies propres semble indispensable. Dans le cas de l'énergie électrique, les solutions alternatives peuvent être les sources photovoltaïques, éoliennes, ou encore hydroélectriques. En particulier, les énergies renouvelables sont une alternative intéressante pour l'électrification des sites isolés ou difficiles d'accès ne permettant pas le raccordement à un réseau électrique. Cependant, le caractère intermittent de ces sources d'énergie pose des problèmes en termes de stabilité, de qualité ou encore de sûreté de fonctionnement des réseaux électriques auxquels elles sont connectées.

Pour pallier au problème de disponibilité de l'énergie, on a recours à des systèmes de stockage qui emmagasine l'énergie produite par ces sources dites « à faible émission de gaz à effet de serre » et la restituent lorsque les utilisateurs en expriment la demande. Les moyens de stockage permettent de découpler temporellement l'instant où l'énergie est générée de l'instant où elle est consommée, ils assurent alors une fonction de tampon d'énergie. De plus, les problématiques de qualité et stabilité d'un réseau peuvent être traitées par la connexion de systèmes de stockage qui fournissent ou absorbent une puissance pour compenser ses variations, exerçant ainsi une fonction de lissage.

Dans ce contexte est inscrit notre travail qui se résume dans une étude d'un système de stockage pour la centrale photovoltaïque située à el Abiodh Sid cheikh de capacité de 23.9MW, connectée au réseau. D'une part pour renforcer la pénétration des énergies renouvelables en allongeant la durée de production de la centrale et d'autre part pour améliorer sa qualité avec la compensation de la variation de la production.

Cependant pour bien faire, notre étude sera répartie en trois parties principales comme suit :

- La première partie présentera une description générale de la centrale en donnant ces différents schémas de raccordement des équipements qui la compose. La configuration et la répartition de ses sous-systèmes ainsi que le raccordement général au réseau seront décrits.
- Dans la deuxième partie on exposera les différents modes de stockage d'énergie électrique tels que le stockage hydraulique, le stockage par volant inertiel, celui par système de compression d'air ainsi que le stockage électrochimique. Des exemples explicatifs de chaque type de stockage et schémas illustratifs seront cités.

- La troisième partie sera consacrée au calcul du nombre des batteries et des super condensateurs nécessaires pour la centrale. Un organigramme général de la stratégie de gestion d'énergie globale de la centrale avec stockage sera établi. Les variations de la charge ainsi que de décharge des systèmes de stockage seront analysées.

En fin notre travail sera clôturé par une conclusion générale qui résumera les impacts du système de stockage sur le fonctionnement de ces centrales réalisées dans le cadre du programme algérien des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique 2012-2030.

CHAPITRE I :

PRÉSENTATION DE LA CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE D'EL ABIODH SID CHEIKH

I : Introduction :

Le gouvernement algérien a lancé la mise en place d'une intégration plus importante des énergies renouvelables en février 2011. Dans le cadre de la mise en œuvre du programme national des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, le gouvernement algérien a pour objectif d'installer sur toute l'étendue du territoire algérien une puissance d'origine renouvelable de près de 22 000 MW entre 2011 et 2030 avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique si les conditions du marché le permettent. Le programme de l'efficacité énergétique permettra de réduire les émissions de CO₂ de 193 millions de tonnes.

Dans le cadre de ce programme une centrale photovoltaïque d'une puissance crête de 23.9MWc a été mise en service à El-Abiodh Sid Cheikh en 2017.

Dans ce chapitre nous allons faire une présentation générale de cette centrale. Les critères du choix du site, la Situation du projet et les caractéristiques climatiques seront dévoilées. Un exposé très précis sera élaboré sur les équipements de la centrale et l'architecture de l'installation. La fonction de protection, le sectionnement ou isolement des tançons en cas des interventions et la fonction commande seront analysées. Nous reprendrons le point du raccordement de cette structure énergétique avec le réseau électrique national.

Bien que cette centrale ait contribué à améliorer la qualité du service de réseau électrique de manière significative, en augmentant la puissance électrique demandée dans cette région. Mais, le principal défaut des énergies renouvelables est qu'elles dépendent entièrement des conditions climatiques, qui sont souvent irrégulières, et très peu prévisibles. Cependant, depuis son exploitation, elle n'a pas été complétée par un système de stockage d'énergie électrique, ce qui a limité sa production uniquement à la présence du soleil. C'est dans cette optique que notre travail sera orienté afin d'allonger le temps d'alimentation des consommateurs par une énergie électrique d'origine renouvelable.

Donc, l'objectif principal dans cette étude est le dimensionnement d'un stockage hybride pour prolonger la production du système d'énergie renouvelable suivant les besoins de la charge, sans faire appel au réseau électrique, tout en restant économiquement et écologiquement viable. Le choix du système de stockage hybride, parce que trois types de problèmes apparaissent.

Premièrement, le coût de fabrication des éléments de stockage est important, il y a donc tout intérêt à maximiser leur production pour les rentabiliser au mieux. Deuxièmement, la batterie s'avère être le composant le plus critique du système : possédant une durée de vie en nombre de cycles de charge-décharge très limitée, et étant dans ce type d'application à changer tous

les deux ans, elle entraîne des coûts économiques et écologiques importants. Quelles sont les sources de stockage disponibles et facile à associées ?

I.2 : Critères du choix du site

Le site d'installation de cette centrale photovoltaïque a été choisi sur la base des critères économiques, Technologiques et environnementaux suivants :

- La Préservation de la biodiversité par l'absence de sites protégés proches ;
- Ensoleillement favorable au développement d'un parc photovoltaïque : El-Bayadh Bénéficie d'un ensoleillement de 1886 kWh/kWc/an. La moyenne annuelle de l'irradiation Globale inclinée à la latitude du lieu, mesurée, est de 6807 Wh/m² ;
- Facilité de raccordement au réseau électrique par la présence d'un poste source situé à proximité du site ;
- Disponibilité du foncier : le terrain affecté au projet n'est pas une propriété privée ;
- Accessibilité, le site bénéficie d'un accès direct sur la route nationale n^o59 reliant El Abiodh Sidi Cheikh à Arbaouet et rejoignant au Nord la route nationale n^o47 reliant El-Bayad à Ain-Sefra. La RN59 est large et bien entretenue facilitant l'aménagement et l'entretien du parc solaire ;
- Protection contre les risques naturels grâce à l'absence d'aléa sur le site ;
- Création d'emplois locaux liés au développement des filières énergies renouvelables et à l'exploitation des ressources locales.

I.3 : Situation de la centrale

Elle est située en dehors des tissus urbains à 4 km au Nord D'El Abiodh Sid Cheikh agglomération chef-lieu de la commune d'El Abiodh Sidi Cheikh, Daïra d'El Abiodh Sid Cheikh. Wilaya d'El Bayadh, en bordure de la RN 59 reliant El Abiodh Sidi Cheikh à Arbaouet, agglomération chef-lieu de la commune d'Arbaouat, située à 19 km.

Le Site contient une superficie de 39,2 ha, et il est délimité [20] :

- Au **Nord**, par un terrain vague marque par le passage, à 110 mètres des limites du site, d'un gazoduc haute pression de 20 pouces ;
- Au **Nord-Est**, par un terrain vague traversé par un lit d'oued à sec qui passe à 35 m environ des limites du site. On y relève également la présence d'une aire de dépôt de véhicules lourds hors d'usage à près de 60 mètres des limites du site ;
- A l'**Est**, par un terrain vague sur lequel s'étendent au loin des exploitations agricoles ;
- Au **Sud**, par des terrains réservés à l'usage agricole ;

- A l'Ouest par un terrain vague séparant le site de la RN59 qui située à près de 90 mètres [4].



Figure I. 1 : Position de la centrale par rapport la ville d'El Abiodh Sidi Cheikh [24]

La projection **Transverse universelle de Mercator** (en anglais Universal Transverse Mercator ou UTM) des bornes du site sont précisées dans le tableau ci-dessous :

Tableau I. 1 : Coordonnées UTM des bornes de la structure de l'entreprise [24]

Borne	X	Y
A1	271085,88	3648204,27
B1	271466,96	3648204,27
C1	271605,92	3647971 ,20
D1	271744 ,88	3647738,14
E1	271744 ,88	3647511,03
F1	271415,38	3647711,13
G1	271085,88	3647511,22
H1	271085,88	3647857,75

I.4 : Les caractéristiques climatiques :

Les études climatiques de la zone sont basées sur des données de la station D'el Abiodh Sid Cheikh dans les caractéristiques majeures sont comme suit :

- Attitude 945 m
- Latitude 32
- Longitude 00 30 Est

Le climat au niveau D'el Abiodh Sid Cheikh est un climat de type semi-continentale Hyper aride ses caractéristiques sont synthétiser comme suit :

I.4 .1 : Précipitation :

En général la pluviométrie est faible et irrégulière elle est hétérogène dans le temps et dans l'espace à travers le tableau ci-dessus nous pouvons constater que le minimum pluviométrique pour la station d'El Abiodh Sidi Cheikh apparaît en juillet avec un 2mm alors que le maximum apparaît en octobre avec 20 mm

I.4 .2 : Températures :

Les températures moyennes mensuelles les plus basses se situent au mois de Janvier avec 7.3°C, tandis que les moyennes les plus élevées se situent au mois Juillet. Avec 29.9 °C d'après la classification thermique des climats, le climat au niveau d'El Abiodh Sidi Cheikh est de type semi-continentale.

I.5 : les équipements de la centrale

- Panneaux solaires photovoltaïque, y compris les supports
- Onduleurs
- Boîtes de raccordement
- Dispositifs de protection
- Dispositifs de sectionnement
- Système protection incendie et détection incendie
- Équipement pour l'évacuation sur le réseau 60KV- (émergence et accessoires)
- Câble MT, BT, Information, de commandes et fibre optique
- Transformation de puissance et transformateur des auxiliaires
- Système de contrôle commande et monitoring y compris instrumentation et Système d'alimentation sans interruption
- Système de comptage
- Réseau de terre

- Système intranet et réseau internet
- Groupe électrogène avec inverseur de source et réservoir fuel
- Les kits autonomes pour l'éclairage extérieur de la centrale
- Système anti-intrusion
- Système de nettoyage des panneaux [2].

I.6 : Description générale de la centrale :

Pour faciliter l'entretien de la centrale photovoltaïque, assurer un fonctionnement permanent en cas d'un défaut, la puissance totale crête installer(23.92MWc) a été scindée à plusieurs blocs interconnectés de puissance crête de 2 MWc regroupés par un relais appelé SKID. Chaque SKID contient deux onduleurs.

I.6 .1 : Description de sous champ (2 MW)

❖ Champs PV

Le champ photovoltaïque se repartie sur une envergure de 2.5 hectares ; composé de 3984 panneaux poly cristalline pour chaque 1 MWc, monté sur des structures porteuses espacés de 6m, cette distance est déterminée d'une façon qu'il n'y ait pas un effet d'ombrage inter rangée.

❖ Panneaux PV :

Les panneaux photovoltaïques utilisés dans la réalisation de la centrale sont des panneaux polycristalinCS6P 255-P. d'une Puissance crête de 255 Wc. Ces caractéristiques essentielles sont montrées sur (*Tableau I.2*).

Tableau I. 2 : caractéristiques de module CS6P – 255P

Model	Canadian SolarCS6P - 255P
Puissance nominal maximal (Pmax)	255 W
Tension en fonctionnement optimal (Vmp)	30.2
Courant en fonctionnement optimal (Imp)	8,43A
Tension en circuit ouvert (Voc)	37,4V
Intensité de court-circuit (Isc)	9A
Temperature de fonctionnement	40°C-+85°C
Tension maximale du système	1000V(IEC)/600V(UL)
Calibre maximal des fusibles en série	15 A
Tolérance de puissance: 0-+5W	0-+5W

a) : Raccordement des panneaux :

Afin d'augmenter la tension, les modules polycristallins CS6P–255P sont interconnectés en série. L'interconnexion de 24 modules en série forme une chaîne. Chaque onduleur contient 166 chaînes en parallèles.

b) : Raccordement des chaînes :

Deux chaînes sont connectées en parallèle via un câble-T avec une section de 4 mm² comme le montre la figure I.2. La deuxième étape chaque 8 paires de chaînes sont raccordées ensemble avec un câble de 95 mm².

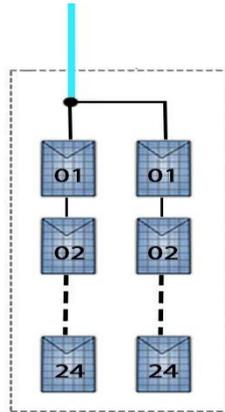


Figure I. 2 : Illustration de raccordement de deux chaînes de module

En fin l'ensemble est relié avec un câble principal DC en aluminium, d'une section 150 mm². Ce dernier transporte la puissance DC jusqu'au SKID comme il est schématisé sur la (figure I.3).

c) : Protection des chaînes :

La protection de chaque chaîne est assurée par des fusibles intégrés sur le câble d'un calibre de 15A. Cette combinaison de deux chaînes est assemblée par un connecteur de perçage sur un câble de collecte en aluminium d'une section de 95 mm² que l'on pourrait considérer comme un boîtier de collecte conventionnel.

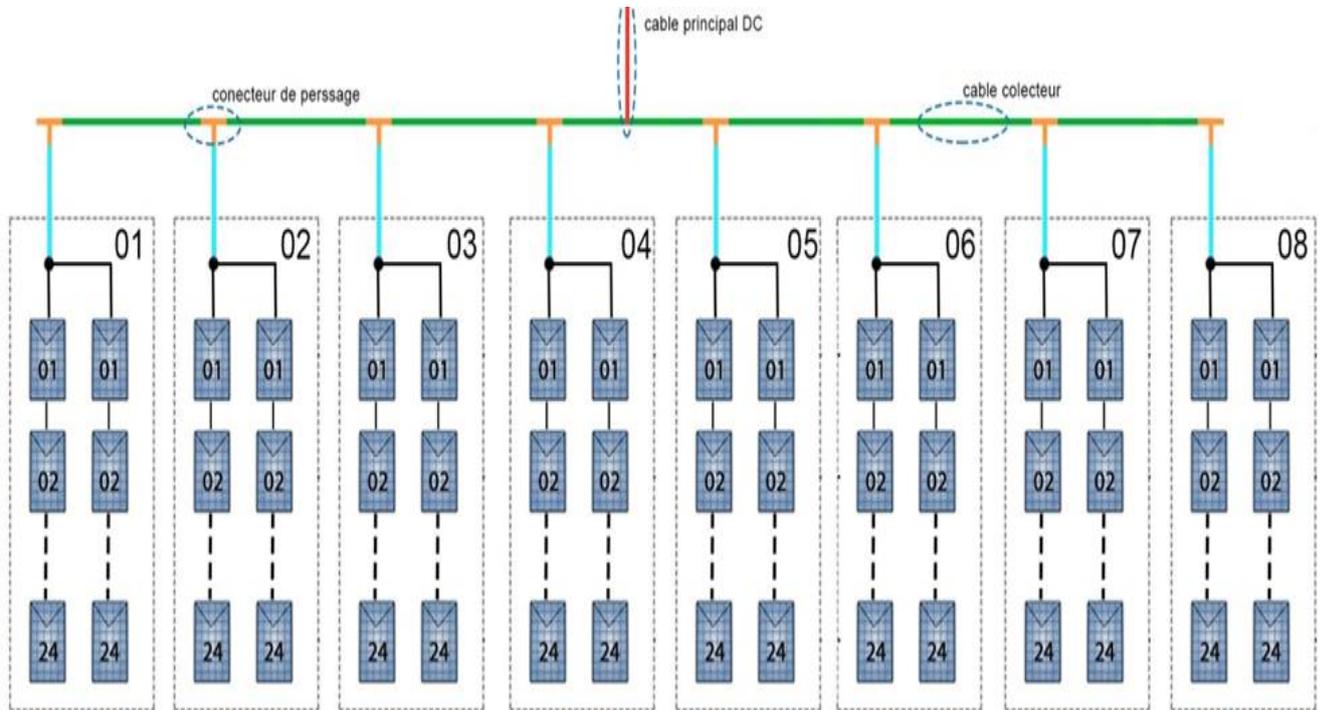


Figure I. 3 : Schéma unifilaire de raccordement des chaînes de PV

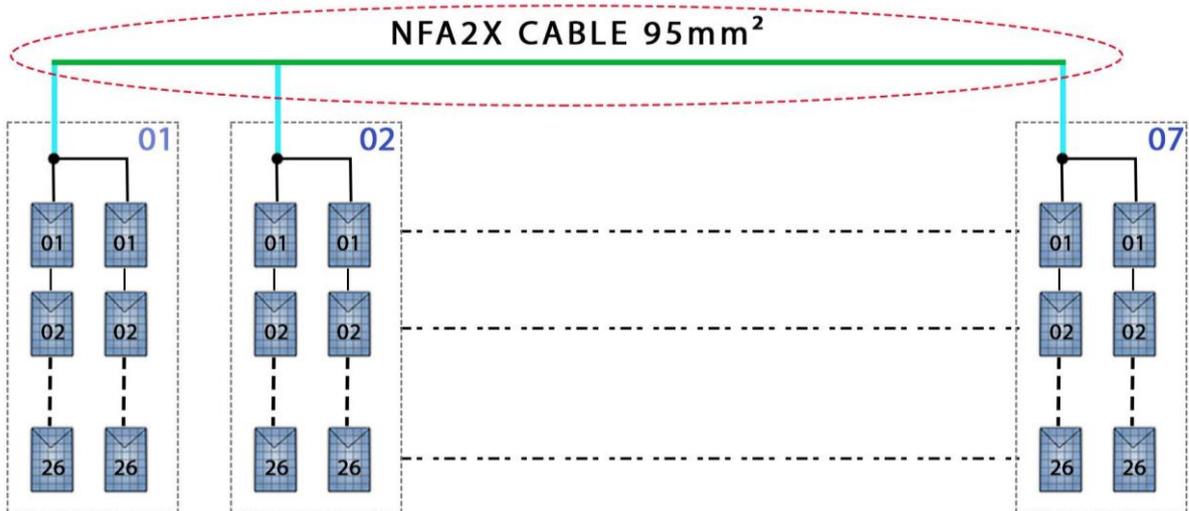


Figure I. 4 : Câble Électrique collecteur d'une section 95 mm²

❖ **Câble DC Principal :**

La puissance des générateurs photovoltaïque est transmise vert une boite de raccordement appelé le central box grâce à 11 câbles (DC principale) qui seront ensuite regroupés avec un jeu de bar.

Vue que le même courant circule dans la section précédente 95mm², va circuler dans ce nouveau câble qui relie les câbles collecteurs avec le central box parce que nous avons la

même puissance produite. Mais suite à des contraintes ce câble a un autre mode de pose, puisqu'il est enterré. Donc en doit augmenter la section de ce dernier et on a pris un câble de 150mm² en Aluminium figure I.5 avec un courant admissible de 261A.

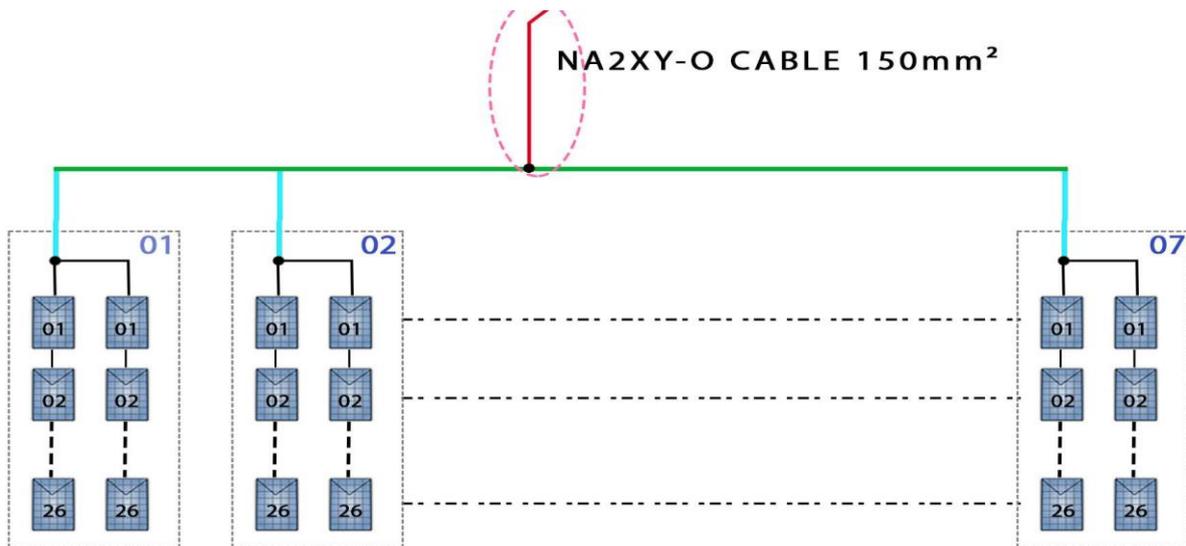


Figure I. 5 : Câble DC Principal d'une section de 150 mm²

d) Caractéristiques technique des câbles utilisé pour le raccordement :

Tableau I. 3 : Caractéristiques techniques des câbles NFA2X - NA2XY

Caractéristique technique	Cables NFA2X	CâblesNA2XY
Section	1 x95 mm ²	1x150mm ²
Types	aluminium	Aluminium
Tension nominale	0.6/1Kv	0,6/1Kv
Tension de test	4000Veff	4000Veff
Temperature de fonctionnement	-30° C / +80°C	-50°C à +90°C
Temperature du conducteur	+80° C max	+90oC
Température du coup de circuit max	+130 /5 °C/s	+250/5°C/s

❖ SKID :

Les SKID : Station onduleur est l'ensemble des équipements permettant de regrouper l'énergie produit des champs photovoltaïques d'une zone et la convertir du courant continu en courant alternatif moyenne tension (30kv), la centrale disposera de 12 SKID, répartis sur le site. Enfin pour injecter l'électricité produite sur le réseau le tout est relié un poste de livraison.

Chaque SKID présenté par les figures ci-dessous (Figures I.5) pilot 2 MW. Et elle est Composés de :

- Quatre Central Box (2 positive / 2 négatives)
- Deux onduleurs solaires
- Un transformateur de puissance SGB
- Un transformateur Auxiliaire SBA
- Une boîte Auxiliaire
- SensorBox
- Cellule MT « RMU »



Figure I. 6 : Ensemble et l'emplacement des équipements de SKID

I.6 .2 : Les différents équipements du SKID :

❖ Onduleur :

Les onduleurs assurent la conversion de la puissance continue vers l'alternatif. Chaque SKID comporte deux onduleurs solaire SUNNY-CENTRAL800CPXT du fabricant SMA d'une Puissance DC max = 898kW et avec les avantages suivants :

- Jusqu'à 1 mégawatt de puissance.
- Forte réduction du prix spécifique grâce à la puissance accrue
- Rendement maximum pour un investissement système minimum
- Pleine puissance nominale en fonctionnement continu jusqu'à une température de 50 °C
- Adapté aux conditions climatiques extrêmes de -40 °C à +62 °C
- Gestion intelligente de l'énergie avec Opticool™

- Plage de tension d'entrée DC étendue pour un dimensionnement flexible quelle que soit la configuration de modules
- Adéquation parfaite au comportement variable des générateurs photovoltaïques en fonction de la température
- Surveillance et commande optimales des onduleurs grâce à une plate-forme informatique sur mesure [2].

➤ **Caractéristiques techniques de l'onduleur :**

Le tableau I.4 résume l'essentielle des caractéristiques de l'onduleur Sunny central 800CP-XT.

Tableau I. 4 : Caractéristiques technique de l'onduleur

Tension d'entrée min	500 V
Tension d'entrée max :	1000 V
UMPP min pour $IMPP < IDC$ max.	530 V
Plage de tension MPP (à 25 à 50Hz)	641 V
Tension d'entrée assignée	641 V 681 V
Courant d'entrée max	1400 A.
Nombre d'entrées MPP indépendantes	1
Nombre d'entrées DC	9/32 (Sortie (AC)).
Puissance nominale AC (à 50C°)	880 KVA
Tension nominal AC / Plage de tension nominale	AC : 360 V /324-414 V.
Fréquence du réseau AC / Plage	50 Hz, 60 Hz/ 47 ... 63 Hz.
Fréquence / tension de réseau :	50 Hz / 360 v.
Courant de sortie max	1411 A
Facteur de déphasage réglable :	1/0,9 inductif
Phases d'injection / Phases de raccordement	3 / 3.
Rendement max	98,6 %
Poids en kg	1900 kg / 4200 lb.
Plage de température de fonctionnement	-25 ... 62 °C
Tension d'alimentation auxiliaire externe	230 /400 V (3 / N / PE)

❖ **Centrale Box :**

Les câbles principaux DC d'une section de 150 mm² sont regroupés dans des boîtes centrales de connexion appelés centrales box selon leur polarité. Un SKID contient deux centrales box négatifs regroupant les câbles DC négatives et les deux autres positives regroupant les câbles DC positif. Avec des Spécification technique montrée dans le (tableau I.5).

Tableau I. 5 : Spécification technique du central box

Entrées	Sorties
<ul style="list-style-type: none"> • Tension CC autorisée (UDC max) : 1000 V • Courant CC par entrée : 140A max. • Nombre entrées CC:18 max. 	<ul style="list-style-type: none"> • Borne principale : Cosse de câble MOI • Nombre de sorties CC: 2 • Courant de sortie : 2x 700A max.

❖ **Sensor Box**

Le rôle du sensor boxe est de centraliser et traité toutes les données parvenues du SKID et par la suite les envoyer à l'unité principale de contrôle de donnée et d'acquisition (scada) qui assure les suivantes fonctions :



Figure I. 7 : Le transformateur de puissance SGB

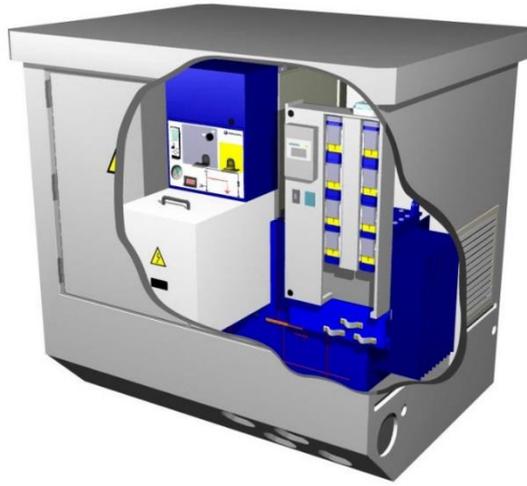


Figure I. 8 : Le transformateur auxiliaire SBA

❖ **Ring main unit (RMU) :**

L'ensemble des SKID sont mis en boucle via les cellules moyenne tension appelé unité principale de bouclage en anglais 'ring main unit « RMU »' comme elle est présentée par la Figure (I.9) pour assurer la continuité de service par la technique coupure d'artère. P

Le RMU se compose de trois cellules MT nommées :

- Cellule arrivée
- Cellule départ
- Cellule protection transformateur

Cellule arrivée et départ :

Cellule modulaire avec fonction d'arrivée ou départ, équipée d'un interrupteur sectionneur à trois positions (ouvert, fermé ou mise à la terre). Permettant la communication avec le jeu de barres et l'ensemble de cellule.



Figure I. 9 : L'armoire du RMU

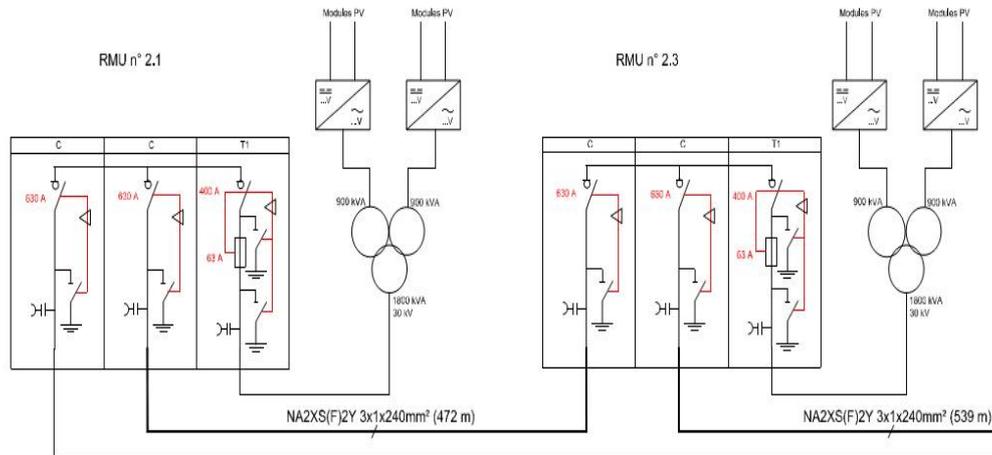


Figure I. 10 : Schéma unifilaire de la connexion RMU entre deux Skids

I.7 : Poste de livraison :

La centrale comprend des onduleurs SMA Sunny central 800CP-XT, connectés par paires à douze transformateurs 180KVA. Les RMU sont connectés pour former une ou deux boucles fermées, raccordées aux cellules de protection moyenne tension 36KV. Les quatre cellules de boucle sont protégées par des disjoncteurs dits coté boucle, commandés par des relais de protection. Le disjoncteur des cellules MT coté ligne protégé le jeu de barres 30KV des cellules MT.

Le poste de livraison reçoit l'énergie produite par la centrale et l'évacue vers le réseau 60KV, il assure la liaison entre la centrale photovoltaïque et le réseau. Il se compose de 9cellules MT à savoir :

Tableau I. 6 : les différentes cellules du poste

1	Cellule d'évacuation type disjoncteur CB
2	Cellule réserve type disjoncteur CB
3	CelluledemesuretypeM4
4	Celluleboucle1typedisjoncteur CB
5	Celluleboucle2type disjoncteur CB
6	Cellule réserve type disjoncteur CB
7	Celluleboucle2typedisjoncteur CB
8	Celluleboucle1type disjoncteur CB
9	CelluleprotectiontransformateurTSAtypecombinéinterrupteurfusibles sectionneur

I.8 : Poste de commande :

La centrale photovoltaïque sera équipée d'un système de contrôle commande, réalisé par Padcon. Dans le cas de basse tension sur le réseau, la centrale se détachera automatique, à travers l'ouverture du disjoncteur général MT. Au retour de la tension, la centrale se reconnectera automatiquement au réseau.

Le poste de commande est contenu au poste de livraison, il est constitué de deux parties séparées par une cloison :

- Une salle de commande dotée d'un bureau avec un ordinateur centralisant toutes les Informations sur la centrale photovoltaïque. De ce poste est établit la nécessité d'une maintenance préventive et/ou curative. Toutes les données de production de la centrale sont répertoriées grâce a un logiciel de commande
- Une salle de stockage et maintenance permettant d'emmagasiner le matériel et outils de petite et moyenne taille nécessaire à la maintenance de l'installation photovoltaïque.

I.9 : Système d'alimentation sans interruption (ASI) :

Un système d'alimentation sans interruption (ASI) est mis en place et relié aux batteries pour permettre d'alimenter le poste de livraison en cas de coupure. Les batteries assurant l'alimentation du poste de livraison pendant 16h, et pendant 30 minutes les auxiliaires communs. Elles sont de marque Victron, avec une durée de vie de 20 ans à 20 C°. Des redresseurs sont installés pour le poste de livraison dans une armoire individuelle ventilée. Le redresseur proposé est de type Sanny Island 5048 de SMA qui permet de réguler la charge des batteries et de fournir du courant alternatif à la sortie.

La centrale est dotée un groupe générateur de secours, d'une puissance de 130 KVA. Pour assurer l'alimentation des auxiliaires, le groupe est alimenté grâce à un réservoir de stockage de gasoil pour une autonomie de 8 heures [4]

Voici les caractéristiques principales du groupe :

- Puissance en régime permanent 130 KVA.
- Température -10/55°C et 100% d'humidité.
- Facteur de puissance de 0,8
- Actionnement par moteur Diesel à gasoil.
- Batterie et démarreur préparés pour 6 démarrages successifs au moins.
- Tension nominale : 230/400 V (couplage en étoile, point neutre sorti).
- Fréquence nominale : 50 Hz.

- Étendue du réglage de tension : $\pm 5\%$ de la tension nominale.
- Écart maximal de tension en cas de variation de la charge de 100%, le facteur de puissance restant entre 0,4 et 0,9 : 2% de la consigne.

I.10 : Détecteur d'incendie :

Le site est doté d'un système de détection d'incendie (SDI) qui aura comme rôle la détection et la protection des personnes et des biens du bâtiment contre les risques d'incendie. Le SDI sera installé au niveau de la salle de contrôle.

Les détecteurs et déclencheurs manuels assureront la détection incendie dans les différents espaces du site et transmettront l'information à la centrale de détection située dans la salle de contrôle. La centrale va répondre au signal reçu des détecteurs et activera les sirènes et modules déportés.

Il y'aura plusieurs types de détecteurs : des détecteurs de fumé optiques pour la surveillance de la plupart des surfaces du site ainsi que des détecteurs thermiques.

Les détecteurs optiques de fumée fonctionnent selon le principe de la diffusion de la lumière sur les particules et sont composés d'une source de lumière (LED I.R.) modulée en impulsion et d'une cellule réceptrice placée à 125° qui reçoit les réflexions de lumière produites par les aérosols. A une hauteur de 3m, la surface de détection est égale à 45m^2 . Les détecteurs de fumée décèlent généralement un incendie plus rapidement que les détecteurs de chaleur.

Ce détecteur thermique est capable de détecter une élévation de température due à la chaleur dégagée par le foyer par comparaison entre la température ambiante et la température dans le boîtier. Il est réservé à de petits locaux, pour la détection de feux ouverts ou de feux avec élévation de température rapide.

I.11. Protection

La protection revêt une importance considérable pour une exploitation sûre et fiable. Il en va de la responsabilité de l'exploitant de s'assurer que sa propre protection est garantie. Le cas échéant, les fonctions de protection décrites dans le présent document doivent être complétées par le bénéficiaire du raccordement de l'installation de production. Sa propre protection ne peut toutefois être inférieure aux exigences décrites dans cette recommandation.

Les dispositifs de protection doivent identifier et mettre hors circuit les défauts (p. ex. courts-circuits et défauts à la terre) du côté de l'IPE. Ceux survenant sur le réseau proche (p. ex. sur le même niveau de tension) doivent également pouvoir être détectés, afin que l'IPE se déconnecte du réseau au terme d'un délai prédéfini. L'exploitant doit installer à cet effet

suffisamment de dispositifs de protection. Ces mesures de protection doivent également être garanties dans le cadre de l'exploitation en îlotage (pour les installations concernées).

Le concept et les réglages de protection de l'interface entre le réseau et l'exploitant doivent être définis par les deux partenaires pour chaque projet lors de la phase de planification. Au point de raccordement, des dispositifs adéquats doivent être prévus pour la protection du réseau et pour celle de l'installation de l'exploitant. Les valeurs de réglage de la protection ayant un impact sur le réseau sont indiquées.

Si le disjoncteur de la sous-station est également celui de l'alternateur, une protection contre les défaillances de disjoncteur (PDD) doit être mise en place. Les partenaires doivent décider quels signaux activent cette protection et sur quels éléments sont envoyés les ordres de déclenchement.

I.12 Energie auxiliaire

Le dispositif de raccordement doit disposer d'une alimentation auxiliaire propre. Lorsque le fonctionnement des dispositifs de protection ou le déclenchement des disjoncteurs nécessite une tension auxiliaire, une alimentation des services auxiliaires indépendante de la tension du réseau doit être présente (p. ex. batterie, condensateur, courant du transformateur). L'alimentation auxiliaire propre de l'installation de raccordement (énergie auxiliaire comprise) est de la responsabilité du gestionnaire. En cas de commande à distance, celle-ci doit également être assurée via une énergie de secours indépendante du réseau. Si une alimentation de secours est nécessaire sur une longue durée, sa capacité doit être dimensionnée de manière à ce que le dispositif de raccordement puisse être exploité au moins pendant huit heures avec tous les dispositifs de protection, dispositifs secondaires et dispositifs de secours en cas de défaillance de la tension du réseau.

I.13 Comportement en cas de perturbation sur le réseau

- Généralités

En cas de danger et de dérangement, il est autorisé de déconnecter immédiatement l'installation du réseau, et ce, notamment en situation d'urgence et sans en informer préalablement l'exploitant de l'installation. Les réglages de protection doivent impérativement être coordonnés avec les réseaux de distribution, les temporisations finales typiques se situent entre 1 et 3s.

I.14 : Le point de raccordement de la centrale au réseau

Ce schéma représente les cheminements généraux des câbles du panneau au réseau électrique, il faut noter que l'installation constituée de 12 onduleurs, chaque deux onduleurs sont reliés à

un transformateur donc 6 transformateurs, chacun est connecté à un RMU et l'ensemble des RMU est connecté sous forme d'une boucle au transformateur de réseau.

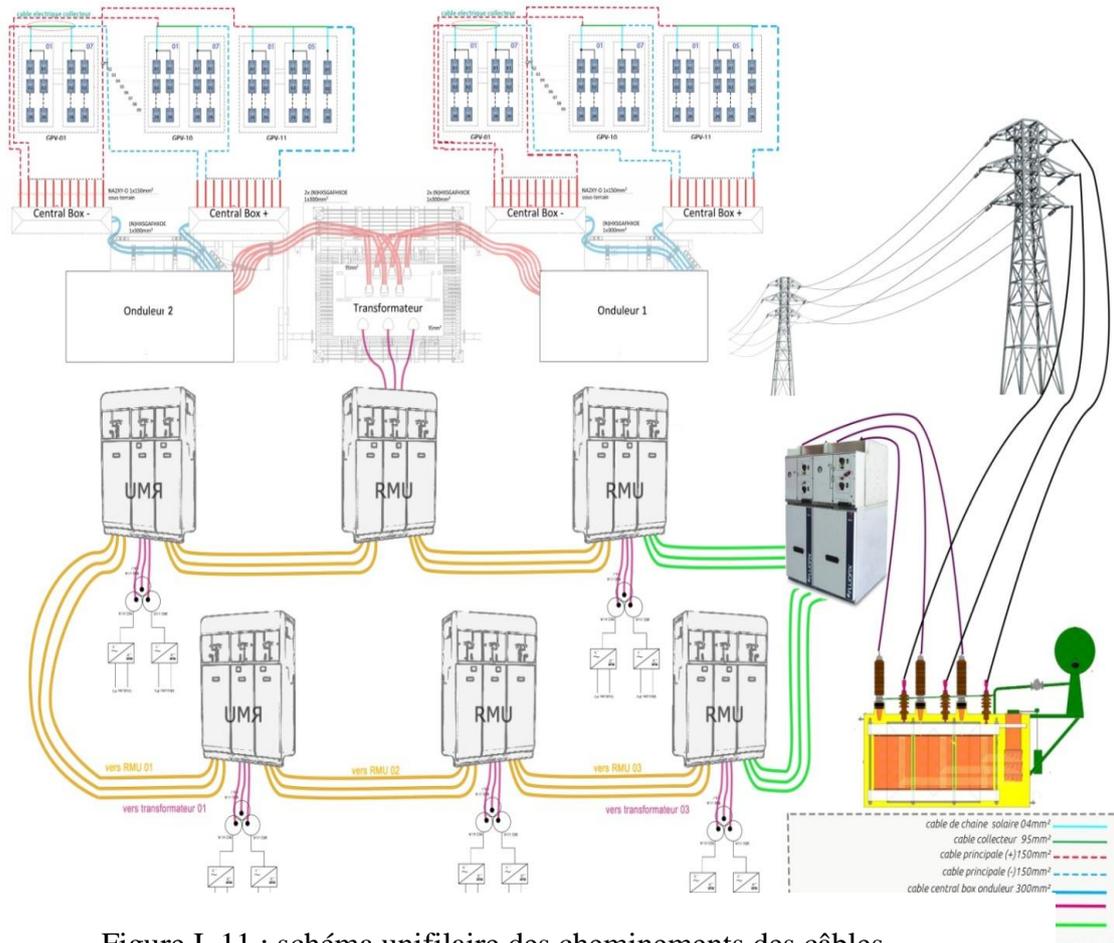


Figure I. 11 : schéma unifilaire des cheminements des câbles

I.15 : Conclusion :

Ce chapitre résume la description générale de la centrale photovoltaïque D'El Abiodh Sid Cheikh. Un inventaire de tous les équipements et leurs poses a été établie à travers les documents techniques de l'entreprise. Nous avons étudié tout ce qui concerne le fonctionnement de la centrale et ses différents étages. La plus importante que nous avons retenue de cette présentation se récapitule dans l'architecture et la répartition de l'installation complète de la centrale photovoltaïque. La division et l'aménagement en plusieurs sous-systèmes permet d'atteindre la puissance crête demandée avec un équipement moyen, léger et facilite le protocole de maintenance. Cette méthodologie facilite la réalisation et évite la coupure totale de l'énergie en cas de défaillance d'un onduleur. Cependant, l'analyse des

Chapitre I

courbes de la consommation montre que la réalisation d'un système de stockage est obligatoire pour éviter les heures de pointes de la consommation d'énergie.

CHAPITRE II :

LES DIFFÉRENTS

SYSTÈMES DE STOCKAGE

II. Introduction

Les énergies renouvelables telles que le solaire photovoltaïque (PV) et l'éolien présentent une production intermittente difficilement prévisible. Le stockage d'énergie permet, en amont, d'assurer à tout moment un équilibre entre production et demande, condition nécessaire au bon fonctionnement de tout réseau électrique. De plus, les réseaux de distribution ne sont pas suffisants pour fournir de l'électricité à tous les consommateurs industriels et résidentiels. Ainsi, les sources d'énergie renouvelables sont prêtes à produire de l'électricité complémentaire sans nuire à l'environnement dans des endroits isolés, en micro-réseaux ou connectés au réseau central pour améliorer son service. De ce fait, elles sont souvent associées à des dispositifs, qui assurent le stockage d'énergie en cas de surproduction. Afin de compenser la pénurie momentanée d'énergie pendant les périodes de consommation de pointe, ou de reproduire l'électricité en cas de manque d'énergie renouvelable primitive.

Cependant, bien que les éléments de stockage électrochimique (ESE) soient adaptés pour remplir ce rôle, leur coût étant important, il est nécessaire de trouver un compromis entre conditions d'utilisation, performances et capacité de stockage d'énergie. Ce travail présente une méthodologie d'association d'un système de stockage par des batteries avec des supercondensateurs (SCs).

II.1. 2. Les différents moyens de stockage de l'énergie électrique

Ils existent plusieurs moyens de stockage de l'énergie électrique, leurs utilisations dépendent de plusieurs critères : l'efficacité, l'économie et la disponibilité. Parmi ces systèmes nous citons les plus utilisés.

II.1. 3. L'énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique est très utilisée comme moyen de stockage en particulier dans les ou le potentiel hydraulique est très important. Cette énergie est basée sur les cours d'eau, des chutes, voire des marées, pour transformer la force motrice en électricité.

- L'énergie potentielle de pesanteur d'une chute d'eau est transformée en énergie mécanique grâce à une turbine,

L'énergie mécanique est ensuite transformée en énergie électrique grâce à un générateur [9].

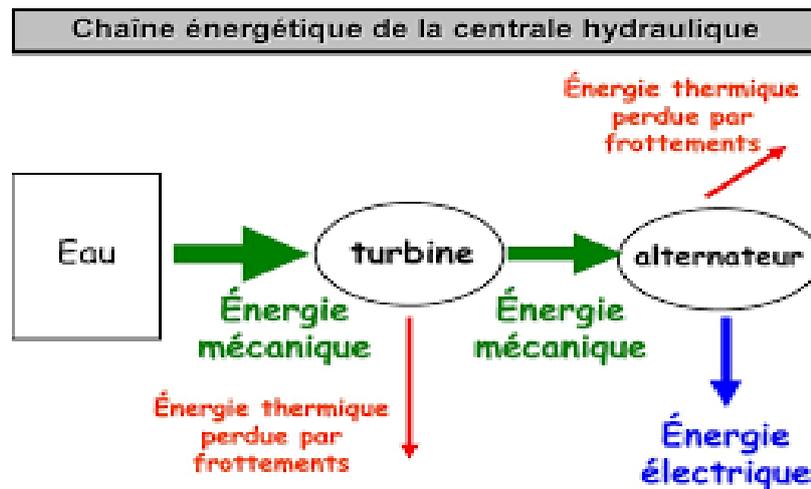


Figure II. 1 : chaîne énergétique de la centrale hydraulique [9]

II.3.2. Centrales hydroélectriques :

Il existe trois formes principales de production d'énergie hydroélectrique :

- **Les centrales dites gravitaires** pour lesquelles les apports d'eau dans la réserve sont essentiellement issus de cours d'eau (par gravitation [9])
- **Les stations de transfert d'énergie par pompage (S-T-E-P)** aussi connues sous l'appellation centrales hydrauliques à réserve pompée ou centrale de pompage-turbinage [9]
- **Les usines marémotrices** au sens large qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées (marémotrice au sens strict), des courants marins permanents (hydroliennes au sens strict) ou du mouvement des vagues. [9]

II.3.3. Les centrales gravitaires :

Les centrales gravitaires utilisent le flot d'eau amené par la gravité et le cycle de l'eau. L'eau est utilisée directement dans le cas des centrales au fil de l'eau, ou après l'avoir stockée derrière un barrage dans le cas des centrales-écluses et des centrales-lacs.

Les centrales au fil de l'eau sont situées en plaine et exploitent des cours d'eau dont le débit est relativement constant. Sans barrage réserve d'eau, ces centrales impactent moins

l'environnement mais sont plus dépendantes des précipitations. Elles produisent de l'électricité à bas coût pour la consommation de base. [9]

II.3.4. Centrale hydroélectrique STEP :

Une centrale hydroélectrique est utilisée pour transférer l'eau entre deux bassins situés à des altitudes différentes.

Lorsque le système photovoltaïque fournit un surplus d'électricité (heures creuses ou pic de production) l'eau du bassin inférieur est pompée dans le bassin supérieur.

Lorsque le système photovoltaïque connaît un déficit de production électrique, la circulation de l'eau est inversée.

La pompe devient alors une turbine et restitue l'énergie accumulée précédemment.

L'opération permet de stocker de l'énergie inutilisée.

Le rendement entre l'énergie produite et l'énergie consommée est de l'ordre de 70% à 80%.

Le fonctionnement de l'installation n'est donc nécessaire et rentable que dans des conditions bien déterminées. Une STEP peut être très utile si elle fonctionne avec des productions d'électricité irrégulières comme les photovoltaïque, en particulier Le stockage de l'énergie électrique par pompage - turbinage permet d'assurer d'avoir de l'électricité disponible, sans qu'il soit nécessaire d'avoir des capacités de production aussi élevées que les pics de consommation [9].

. Principe des STEP [9]



Figure II. 2 : système de transfert d'énergie par pompage STEP [9]

- **Phase pompage stockage énergie :**

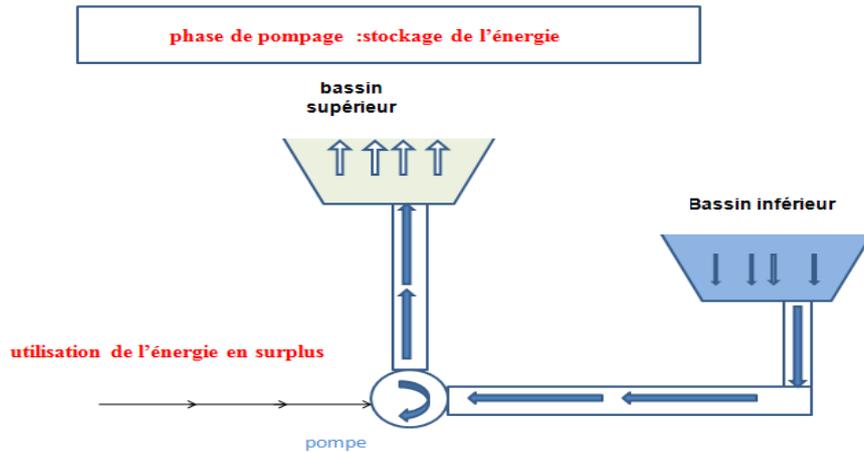


Figure II. 3 : Principe de fonctionnement des phases de pompage pour stocker l'énergie [10]

➤ **Phase turbinage : restitution énergie**

II.3.6. Les types des installations hydrauliques :

Deux types d'installations existent :

Les installations qui fonctionnent par éclusées c'est-à-dire de grands barrages dotés de réservoirs permettant de répondre aux pointes de consommation, le cas de ZIAMA à Jijel.

Les centrales installées au fil de l'eau, ce qui est le cas de la majorité des petites centrales hydroélectriques (PCH). Le cas d'ERRAGUENE à Jijel (les autres sont toutes à l'arrêt).

La petite hydroélectricité (PHE) se caractérise par des installations de production capables de développer une puissance électrique de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts (10 MW au maximum), à partir de chutes d'eau de quelques mètres de haut à plusieurs centaines de mètres de haut.

Trois types de turbines sont utilisés :

- Kaplan pour les basses chutes (5-10m),
- Francis pour les chutes moyennes (10-100m)
- Et Francis et Pelton pour les hautes chutes (50 à 400m).
- Les centrales de basse chute consistent en un seuil qui dérive l'eau dans un canal d'amenée qui la conduit à la centrale. La restitution de l'eau se fait en

aval dans le canal de fuite qui rejoint le cours d'eau dérivé.

- Les centrales de haute chute sont dotées d'une prise d'eau en montagne et d'une conduite forcée qui amène l'eau à la centrale puis la restitue.

Fondamentalement, une centrale hydroélectrique est constituée de trois éléments :

- Un barrage (sauf pour les installations au fil de l'eau) ;
- Un canal de dérivation ;
- Les dispositifs de conversion en électricité. [9]

II.3.7. Centrale hydroélectrique et stockage d'énergie :

Les systèmes de stockage **hydroélectrique**, permettront de stocker l'énergie électrique à des coûts acceptables. Ils interviennent pendant les pics de consommation pour compenser et équilibrer la demande du client sous les commandes simples venant du gestionnaire du système photovoltaïque. En générale la production et la consommation d'électricité propre ne vont pas toujours de pair parce il y a quotidiennement des fluctuations dans l'énergie solaire photovoltaïque. Par conséquent les centrales hydroélectriques conviennent parfaitement pour aider à équilibrer ces fluctuations. [9] En plus Alors de ces systèmes de stockage présentent un avantage caractérisé dans la conservation du caractère renouvelable de l'énergie produite.

II.3.8. Stations de transfert d'énergie par pompage :

Le pompage-turbinage est une technique de stockage de l'énergie électrique. Elle repose sur le principe de pomper de l'eau pour la stocker dans des bassins d'accumulation lorsque la demande d'énergie est faible —c'est le pompage — afin de turbiner cette eau plus tard pour produire de l'électricité lorsque la demande est forte — c'est le turbinage.

Elle a été utilisée pour la première fois en Suisse et en Italie dans les années 1890. Dans les années 2000, la Puissance mondiale installée dépasse 90 GW. [9]

II.3.9. Complexes hydroélectriques :

Un complexe hydroélectrique est un ensemble d'ouvrages de génie civil et d'installations Mécaniques et électriques dédiés à la production d'énergie électrique. Généralement, un Complexe hydroélectrique comprend les ouvrages suivants :

- Un barrage (bassin) pour stocker les surplus d'eau et augmenter la hauteur de chute.
- Des évacuateurs de crue pour écouler les surplus d'eau au besoin.

- Des conduites forcées pour amener l'eau à la centrale. Elles doivent supporter les

Surpressions et les dépressions causées par les coups de bélier et les fermetures brusques

Des turbines. Les surfaces intérieures doivent être suffisamment lisses de façon à minimiser les pertes de charge.

- Des salles de machine abritant les groupes turboalternateurs, les appareillages électriques et les équipements de commande et d'exploitation.
- Un canal de fuite pour permettre la restitution de l'eau dans le lit de la rivière.

[9]

II.3.10. Les équipements électromécaniques :

Il existe plusieurs types des pompes et turbines nous avons s'intéressons sur le type pompage – turbine :

- **Pompe :**

Les pompes hydrauliques sont des générateurs de débit, elles transforment l'énergie Mécanique en énergie hydraulique, vers des récepteurs.

Le rendement des pompes se situe généralement entre 70% (pour les pompes centrifuges) et 90% (pour les pompes volumétrique) [9]

- **Turbine :**

Une turbine hydraulique est une machine tournante, constituée principalement d'une roue à aubes, qui reçoit l'énergie d'un fluide, sous forme d'énergie de pression ou d'énergie cinétique et qui la transforme en énergie mécanique directement utilisable sur un arbre en rotation. Le rendement des turbines se situe généralement entre 60et80% ; il croit avec la taille des roues. [9]

II.3.11. Les avantages et les inconvénients des centrales hydroélectriques :

Les avantages :

- **Verte**

La production de l'électricité avec l'énergie hydraulique n'est pas en elle-même polluante. La seule pollution se produit au cours de la construction de ces énormes centrales.

➤ **Fiable**

L'hydroélectricité est effectivement une énergie très fiable. Il y a très peu de perturbations en termes de puissance électrique qui soient dues à ce type de centrales. Les pays qui disposent de grandes ressources hydrauliques utilisent cette énergie comme source fournissant la charge de base.

➤ **Sure**

Par comparaison à d'autres formes d'énergie, telles que les combustibles fossiles ou l'énergie nucléaire, l'hydroélectricité est beaucoup plus sûre. Il n'y a pas de carburant qui entre en jeu. [9]

• **Les inconvénients :**

- La construction de ces centrales hydrauliques est souvent très coûteuse
- En cas de sécheresse, toute la centrale hydraulique sera dysfonctionnelle et donc aucune électricité ne sera produite [9]

II.4. Les volants d'inertie

Les volants d'inertie sont des éléments de stockage mécanique, indirect, considérés comme des sources de puissance élevée. L'énergie électrique peut, après transformation, être stockée sous forme d'énergie mécanique : potentielle (pesanteur) ou inertielle (cinétique).

L'énergie potentielle étant principalement liée à la génération centralisée de l'énergie électrique, le paragraphe suivant portera sur le stockage par énergie cinétique et particulièrement sur le volant d'inertie.

Le type de stockage considéré est le volant d'inertie, dont le principe existe depuis plusieurs milliers d'années. Un volant d'inertie est un cylindre massif monté à l'extrémité d'une machine tournant. Lorsque de l'énergie provenant du circuit électrique doit être stockée, la machine en mode moteur fait tourner le volant, l'emmagasinant ainsi sous forme d'énergie cinétique. Si de l'énergie doit être restituée, la machine se met en mode génératrice pour produire un courant générateur en freinant le volant. Ce dernier peut être de différents rayons et épaisseurs, selon l'inertie J_{vi} , et donc l'énergie et la puissance maximales souhaitées.

Propre, d'une bonne puissance spécifique et d'un rendement de l'ordre de 80%, cette solution possède une énergie spécifique de seulement quelques dizaines de Wh/kg pour une puissance spécifique de plusieurs kW/kg, ce qui les rend adaptés aux mêmes usages que les supercondensateurs. L'inconvénient de cette technologie réside dans la dangerosité

d'un volant tournant à pleine vitesse. Bien que réclamant peu d'entretien, il nécessite une conception adaptée à la protection des personnes et est encombrant, ce qui n'est pas forcément viable dans le cas un système de puissance destiné à un particulier.

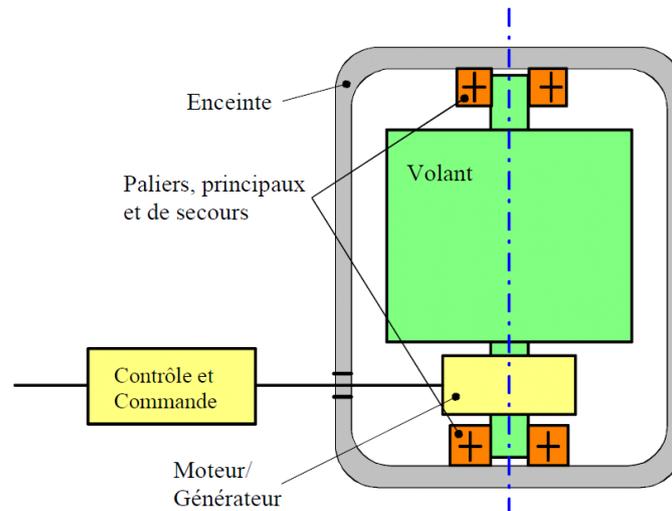


Figure II. 4 : Système du volant d'inertie.

II.5. Stockage à air comprimé CAES

Les CAES utilise de l'électricité pour comprimer l'air via un système de compresseur. L'air, fortement comprimé et dont la température augmente de plusieurs centaines de degrés, est ensuite stocké dans un réservoir (ancienne mine de sel, ancienne caverne de stockage). Quand la demande d'électricité est importante, l'air comprimé est réinjecté dans une chambre de combustion. Il est utilisé pour faire tourner une turbine couplée à un alternateur pour produire de l'électricité. Le rendement des CAES est malheureusement réduit car la compression de l'air s'accompagne d'un échauffement.

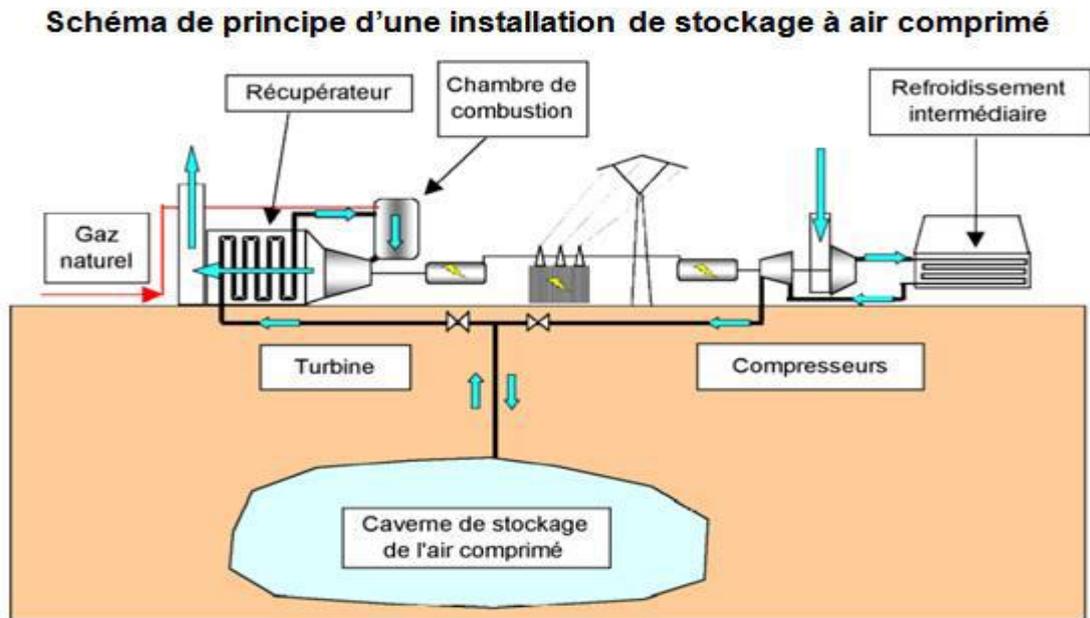


Figure II. 5 : Système de stockage par air comprimé

II.6. Le stockage électrochimique

Malgré les avancées des dernières années, cette technologie (batterie) n'est pas capable de rivaliser avec son compétiteur, le pétrole. Plusieurs laboratoires tentent de perfectionner la chimie des cellules pour en améliorer la puissance, l'énergie et la sécurité. D'autres se concentrent plus à l'intégration de ces cellules dans des batteries pour la création de systèmes d'accumulation d'énergie (SAE). Il s'agit d'un combat sur plusieurs fronts pour amener cette technologie un niveau pouvant dépasser les énergies fossiles.

La conception d'un SAE est un processus d'ingénierie complexe, onéreux et qui requiert énormément de temps. En alliant génie mécanique, électrique, chimique et informatique, il s'agit d'un effort multidisciplinaire pour pouvoir tenir compte de tous les phénomènes concurrents se produisant dans la batterie. De plus, une multitude de paramètres doivent faire partie de l'étude de faisabilité pour obtenir un produit répondant aux besoins du client. Le chemin pour arriver à une batterie optimale est donc très difficile et comporte plusieurs défis. Pour ce genre de problème, les ingénieurs ont de plus en plus recours à l'ingénierie assistée par ordinateur (CAE).

II.6.1 Système d'accumulation d'énergie

On définit un système d'accumulation d'énergie (SAE) comme étant le processus de conversion de l'énergie électrique provenant d'un réseau électrique dans une forme où elle

peut être stockée pour être reconvertie lorsque nécessaire [7]. Ces systèmes possèdent plusieurs applications tant dans les appareils portables, dans le transport ainsi que pour les ressources d'énergies renouvelables. Ces dernières sont en forte croissance et les SAE se démarquent comme solution idéale pouvant stocker l'énergie étant donnée la nature imprévisible de production d'électricité provenant de celles-ci. On peut classer les SAE dans quatre catégories, soit électriques, mécaniques, chimiques ou thermiques.

II.6.2. Accumulateurs électrochimiques

Un accumulateur est destiné à stocker l'énergie électrique et à la restituer ultérieurement. Les batteries sont des accumulateurs électrochimiques, constituées par :

- ✓ Une électrode positive composée d'un corps oxydant, capable d'attirer des électrons
- ✓ Une électrode négative composée d'un corps réducteur, capable de céder des électrons.

Les deux électrodes baignent dans une réaction « oxydant-réducteur ». C'est la réaction dans une solution électrolytique.

La conversion d'énergie est basée solution et les électrodes qui est à l'origine du déplacement des électrons.

II.6.3. Batterie lithium-ion

Un bloc-batterie est l'assemblage d'un ensemble d'accumulateurs connectés entre eux pour former une source de tension et de capacité qui répond aux besoins d'une application. La cellule représente la plus petite unité de la batterie, il s'agit d'un accumulateur électrochimique possédant la plus basse tension selon sa chimie [40]. Les cellules sont ensuite interconnectées en série et en parallèle pour produire la configuration répondant aux besoins de l'application. Chaque module possède son propre système de gestion. Les contraintes matérielles vont engendrer une limitation du nombre de cellules en séries. Les modules sont ensuite interconnectés en série et en parallèle pour former la batterie. Généralement, la batterie sera protégée par une structure de plastique ou de métal comprenant un système de gestion de la batterie complète ainsi qu'un système de refroidissement.

La modélisation d'accumulateurs au lithium, telle que la cellule, permet d'étendre le modèle vers une batterie virtuelle. Pour que ce modèle soit fidèle à la réalité et pour être en mesure de l'étendre vers un bloc-batterie virtuel, plusieurs facteurs sont à considérer.

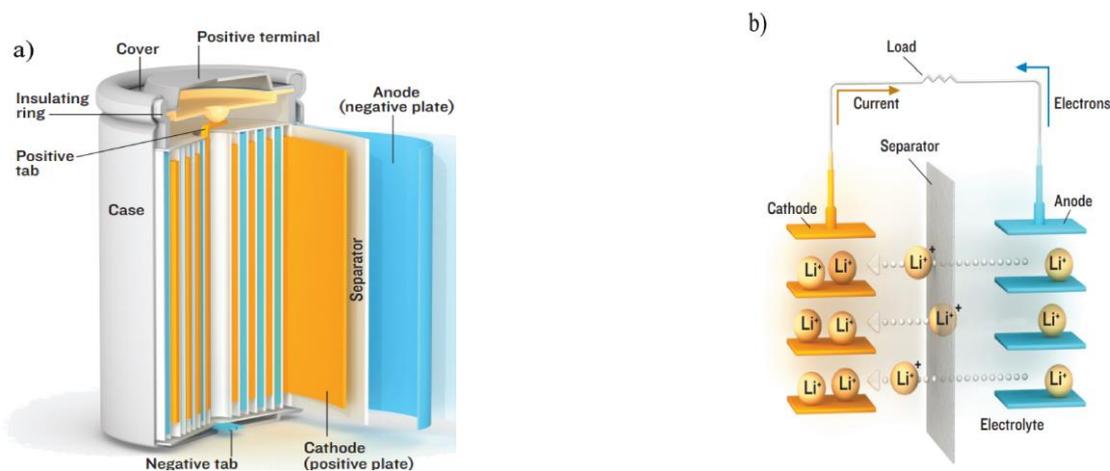


Figure II. 6 : a. Anatomie d'une cellule au Lithium ion et mode de distribution des ions

II.6.3.1. Format des cellules lithium-ion

Il existe plusieurs formats de cellules pour répondre aux besoins des différents marchés. Trois formats se distinguent de ce lot : les cellules en pochettes, les cellules prismatiques et les cellules cylindriques. Les cellules en pochettes sont fabriquées en empilant des plaques de matériaux actifs à l'intérieur d'un emballage non rigide et flexible. Celles-ci requièrent une attention particulière lors de manutention et ont besoin d'une enveloppe mécanique rigide supplémentaire. Quant aux cellules prismatiques et cylindriques, elles sont constituées d'un boîtier robuste qui protège les matériaux actifs et qui empêche l'expansion de la cellule tout au long de sa durée de vie. La cellule étant l'unité de base d'une batterie, elle dictera la direction de la conception de la batterie. Il est primordial de bien étudier les besoins pour choisir le format adéquat.

Typiquement, un accumulateur lithium-ion se compose d'une anode de carbone, d'une cathode d'oxyde métallique, d'un électrolyte et du séparateur (**fig. II.6.b**). Les matériaux actifs de l'anode et de la cathode forment une couche mince à la surface de feuillets métalliques qui agissent comme collecteurs de courant dans la cellule. Le séparateur empêche le contact entre les électrodes, tout en demeurant perméable aux échanges ioniques. Une défaillance du séparateur peut entraîner la destruction de la cellule de manière catastrophique. Le transfert des ions serait dans l'électrolyte, un sel de lithium en solution dans un solvant organique.

Lors de la décharge, les électrons sont libérés de l'électrode négative à l'électrode positive par le circuit électrique, fournissant la « force électromotrice ». Afin de maintenir la

neutralité électrique du système, les ions de lithium migrent de l'anode à la cathode à travers l'électrolyte.

Ce phénomène engendre une réaction électrochimique qui se produit simultanément à l'anode, les ions quittant la cathode pour former des oxydes stables à l'anode. Un potentiel électrique se développe alors entre les bornes. Ce processus s'inverse en fournissant de l'énergie à l'accumulateur, processus que l'on nomme recharge, car les charges seront stockées sous forme d'ions intercalés.

II.7. Dimensionnement d'une batterie

Étude de dimensionnement :

Le choix de la technologie permet de fixer les caractéristiques des accumulateurs utilisés ; il faut ensuite les assembler en une batterie, en choisissant le nombre d'élément à mettre en série, et éventuellement en parallèle, selon les besoins du système.

Le module de stockage d'un système de puissance raccordé au réseau a pour objectif de prolonger la production d'assurer un certain nombre de jours j_a d'autonomie, dans notre cas 1.

Ainsi, connaissant l'énergie moyenne nécessaire par jour $E_{dem/j}$ en Wh pour couvrir la consommation, le rendement des accumulateurs η_{batt} , et la tension de batterie V_{batt} engendrée par la connexion des accumulateurs, la capacité de stockage C_{batt} en Ah peut être déduite par :

$$C_{batt} = (E_{dem/j} * j_a) / (\eta_{batt} * V_{batt} * P_b) \quad \text{II.1}$$

En outre, un système de contrôle interne à la batterie est à prévoir. En effet, les accumulateurs ne peuvent se comporter de façon parfaitement identique, ce qui engendre au fil du temps des différences d'état de charge, et des cycles non homogènes, d'un accumulateur à l'autre. En l'absence de gestion de l'état de charge, la mesure globale de celui-ci risque de ne pas détecter la surcharge ou la décharge profonde d'un des accumulateurs, ce qui peut engendrer une détérioration dangereuse de la batterie, en particulier dans le cas des Lithium-Ion.

L'ajout d'un circuit de contrôle, nommé circuit d'équilibrage, permet de pallier ce problème.

II.8. Modélisation des batteries

Un modèle est une représentation mathématique simplifiée d'un phénomène physique. Les modèles permettent de prédire le comportement d'un système et d'observer des phénomènes parfois impossibles à mesurer dans la réalité.

Ainsi, des modèles ont été développés pour représenter le comportement macroscopique d'une batterie, qui se décline en trois types : l'électrique, le thermique et le vieillissement.

Les deux propriétés principales d'une batterie sont sa tension V_{nom} et sa capacité Q_{cell} en Ah. Le produit de ces deux valeurs est une mesure de la quantité d'énergie contenue dans la batterie. Dans une source de tension idéale, la tension devrait demeurer constante en tout temps, jusqu'à ce que la batterie soit complètement déchargée, et ce peu importe la demande de courant.

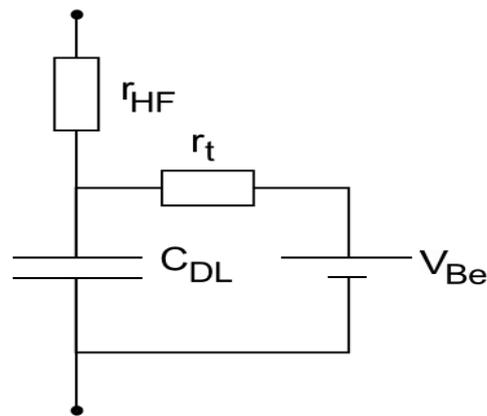


Figure II. 7 : Modélisation d'un élément de batterie Li-ion

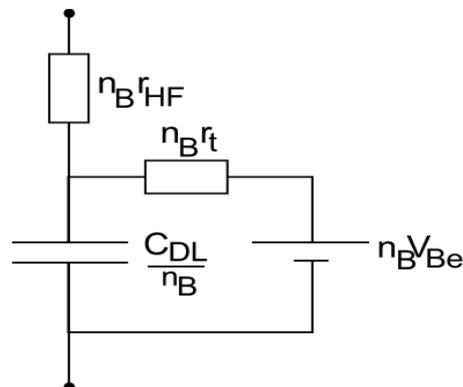


Figure II. 8 : Modélisation de nB batteries

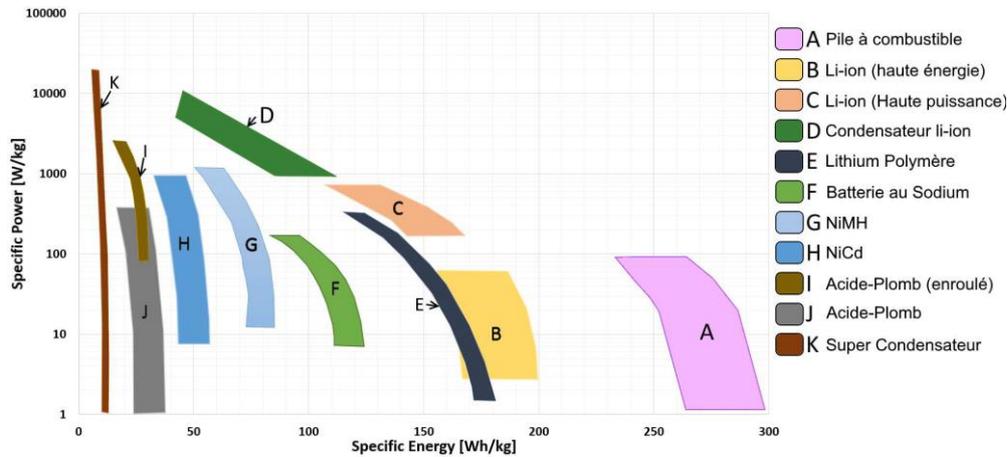


Figure II. 9 : Comparaison des densités de puissance et énergétique de différentes technologies de stockage électrochimiques

II.9. Condensateurs

Les condensateurs sont des composants de stockage électrostatique, direct, considérés comme une source de puissance dans une certaine mesure, compte tenu de leur grande puissance spécifique et leur densité d'énergie relativement faible.

Un condensateur se compose de deux électrodes, d'un isolant diélectrique entre les deux électrodes et de deux éléments de connexion pour permettre la liaison électrique du composant. Un condensateur permet d'emmagasiner transitoirement une charge électrique entre les deux électrodes séparées par un isolant diélectrique [12].

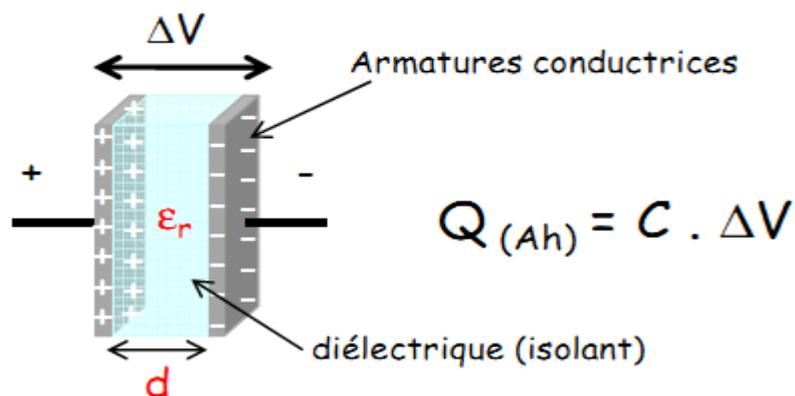


Figure II. 10 : Structure d'un condensateur plan.

On distingue plusieurs familles de condensateurs suivant la nature de l'isolant et des électrodes :

- condensateur céramique
- condensateur électrochimique ou électrolytique
- condensateur à film plastique

II.10. Supercondensateurs ou condensateurs double couche

Les supercondensateurs sont des moyens de stockage direct, électrostatique (et électrochimique), considérés comme des sources de puissance de par leur grande densité de puissance.

II.10.1. Origine / historique

D'après [8], le premier brevet relatif aux supercondensateurs est attribué à Becker (pour la société General Electric) en 1957. L'invention concernait un mode de stockage d'énergie électrostatique reposant sur la double couche électrique développée à l'interface entre un matériau carboné poreux et un électrolyte aqueux (acide sulfurique) dont il était imprégné. En 1969, la société Sohio a déposé un autre brevet concernant un supercondensateur à électrolyte non aqueux permettant des tensions plus élevées. Leur commercialisation n'intervient que dans les années 1970, par les sociétés NEC et Matsushita. Ces composants à électrode en charbon actif et à électrolyte aqueux ou organique sont de faible capacité (quelques Farad) et de faible puissance. Les composants à plus forte puissance et forte énergie spécifique n'apparaissent que dans les années 1990.

II.10.2. Principe de fonctionnement

Un super condensateur se compose de deux collecteurs métalliques (généralement en aluminium), deux électrodes carbonées poreuses imprégnées d'électrolyte et d'une membrane poreuse isolante (pour assurer la conduction ionique et séparer électriquement les électrodes).

Le stockage d'énergie dans un supercondensateur est fait sous forme de champ électrostatique entre deux électrodes [15], [8]. Il ne s'agit donc pas d'un stockage électrochimique comme pour un accumulateur, mais bien d'un stockage électrostatique, comme pour un condensateur, à ceci près que l'isolant diélectrique est remplacé par un électrolyte conducteur d'ions. Un supercondensateur n'est pas basé sur le principe de la polarisation diélectrique (condensateur) pour le stockage de l'énergie, mais sur le principe

de la double couche électrique [12] : lorsque l'on applique une tension entre deux électrodes immergées dans une solution électrolytique (l'électrolyte étant conducteur ionique et isolant électronique), une double couche électrique se forme à l'interface séparant les deux corps. La dissymétrie moléculaire de l'électrolyte et de l'électrode conduit à l'apparition de charges à l'interface électrolyte / électrode (effet de Helmholtz). Ainsi les charges accumulées à la surface de l'électrode sont équilibrées par celles, de nature ionique, qui s'accumulent dans l'électrolyte. On a alors des charges opposées, séparées par une distance infinitésimale, que l'on appelle double couche électrique. Les deux couches électriques ainsi formées se comportent comme un condensateur dont la capacité dépend de la surface effective de contact.

II.10.3. Technologies

On distingue plusieurs technologies de supercondensateurs [10], dont certaines sont proches des technologies d'accumulateurs.

Il existe différentes technologies d'électrodes, elles peuvent être :

- en matériaux à base de charbon actif
- en matériaux inorganiques : à base d'oxyde de métaux de transition (MnO_2 , V_2O_5 , ...)
- ou d'oxyde de métaux nobles (ex : RuO_2 , ...)
- en matériaux organiques : polymères à conduction électronique

Les supercondensateurs les plus répandus sont à électrodes en charbon actif. Leurs performances sont variables en fonction du type d'électrolyte :

- électrolyte aqueux
 - Avantage : faible résistance car conductivité ionique de l'ordre de $800\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ [10]
 - Inconvénient : faible tension (environ 1V)
- électrolyte organique
 - Avantage : tension plus élevée (environ 3V)
 - Inconvénients : résistance élevée car conductivité ionique de l'ordre de $10\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ [10] et utilisation, pour l'électrolyte, d'acétonitrile (cyanure de méthyle), composé inflammable et nocif pour la santé

Les supercondensateurs à électrodes en métaux nobles sont encore peu utilisés car très chers mais ils présentent l'avantage d'avoir une très faible résistance interne en solution acide H_2SO_4 . Enfin, des supercondensateurs à base de polymères à conduction

électronique sont en cours de développement. Les principaux inconvénients de cette technologie récente sont un coût très élevé et un problème de cyclabilité [10].

II.10.4. Grandeurs caractéristiques

Les caractéristiques d'un supercondensateur définies ci-après sont relatives à leurs performances électriques. La charge d'un supercondensateur est donnée par la relation suivante :

$$Q_{sc} = \int I. dt \quad \text{II.2}$$

Avec : Q_{sc} : charge du supercondensateur [C]

I : intensité dans le supercondensateur [A]

t : temps [s]

La capacité d'un supercondensateur est donnée par la relation suivante :

$$C_{sc} = Q_{sc}/U \quad \text{II.3}$$

Avec : C_{sc} : capacité du supercondensateur [F]

Q_{sc} : charge du supercondensateur [C].

U : tension aux bornes du supercondensateur [V]

L'énergie stockée dans un supercondensateur est proportionnelle à sa capacité, suivant la relation :

$$W_{sc} = \frac{1}{2} C_{sc}. U^2 \quad \text{II.4}$$

Avec : W_{sc} : énergie stockée dans le supercondensateur [J]

C_{sc} : capacité du supercondensateur [F]

U : tension aux bornes du supercondensateur [V]

La puissance maximale restituée par un supercondensateur est donnée par la relation suivante :

$$P_{scmax} = U^2/4.ESR \quad \text{II.5}$$

Avec : P_{scmax} : puissance maximale dans le supercondensateur [W]

ESR : résistance interne du supercondensateur [Ω]

U : tension aux bornes du supercondensateur [V]

II.10.5. Propriétés

Les propriétés d'un supercondensateur sont :

- ✓ Une capacité élevée (de quelques Farad jusqu'à plusieurs milliers de Farad)

- ✓ Une tenue en tension faible limitée par la présence d'un électrolyte (entre 1V en milieu aqueux jusqu'à 3,5V en milieu organique)
- ✓ Une puissance spécifique comprise entre 800 et 2000W.kg-1 .
- ✓ Une densité énergétique massique supérieure à celle des condensateurs et de l'ordre de 5 à 15Wh.kg-1[1] : 15Wh.kg-1 pour les matériaux nobles et autour de 5Wh.kg-1 pour les matériaux carbonés.
- ✓ Une densité énergétique volumique comprise entre 1 et 10Wh.L-1.
- ✓ Une constante de temps pour la décharge faible compte tenu du faible déplacement des ions dans l'électrolyte [1]. La décharge d'un supercondensateur s'effectue en quelques secondes, voire quelques dizaines de secondes.

Les supercondensateurs, tout comme les systèmes « directs » de stockage de l'énergie électrique, sont considérés comme des moyens de stockage à haute puissance spécifique et à faible énergie spécifique.

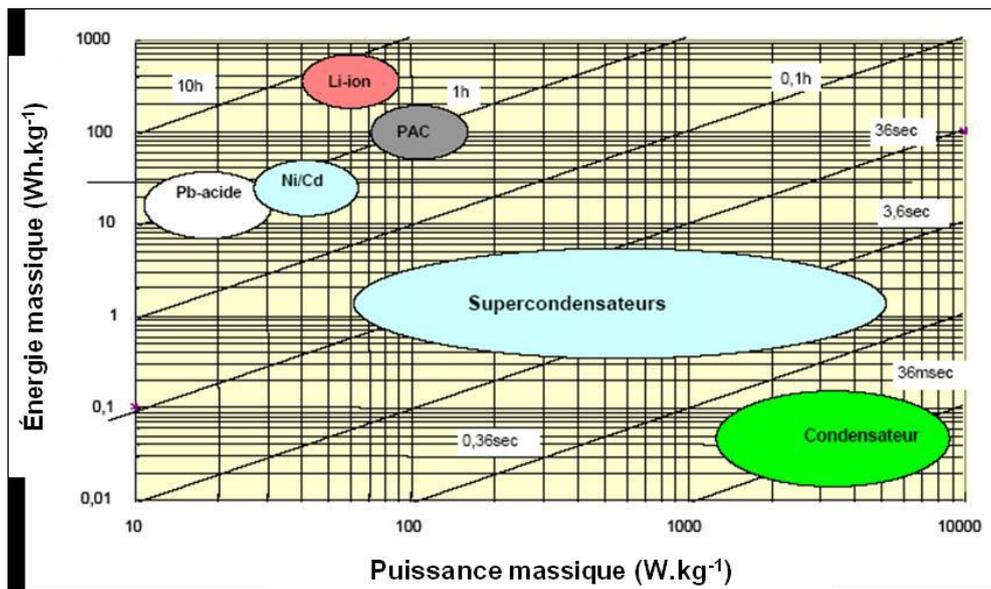


Figure II. 11 : Diagramme de Ragone des systèmes électrochimiques de stockage d'énergie

Alors que les condensateurs électrolytiques conviennent pour des durées de décharge inférieures à quelques centaines de millisecondes, les supercondensateurs permettent des décharges d'une durée comprise entre 1 et 10 secondes (figure II.11) pour des temps de charge de quelques dizaines de secondes. De leurs côtés, les batteries offrent des décharges supérieures à la dizaine de minutes, mais nécessitent en compensation des temps de charge

relativement longs, compris entre 1 et 5 heures. Mais l'énergie massique des batteries est dix fois supérieure à celle des supercondensateurs.

Ainsi, suivant la puissance et l'autonomie exigées par les applications, les supercondensateurs peuvent être utilisés seuls, comme éléments de stockage de l'énergie électrique, ou en association avec les batteries d'accumulateurs électrochimiques afin de réduire la masse de ces dernières.

De plus, les supercondensateurs restituent la charge accumulée avec une excellente efficacité et pendant un très grand nombre de cycles. Ils peuvent supporter un nombre de cycles de charge/décharge environ 1 000 fois plus élevé que les batteries. La durée de vie espérée d'un supercondensateur est de 10 ans, soit trois fois celle des batteries électrochimiques actuelles avec un nombre de cycles élevé ($> 10\,000$).

De plus, ils peuvent fournir ou absorber un courant très élevé (dizaines à quelques centaines d'ampère), ce qui est très important pour la récupération de l'énergie lors du freinage par exemple. Les supercondensateurs supportent des courants de charge et/ou de décharge élevés ($> 100\text{ A}$).

En outre, l'expérience montre que les supercondensateurs ont une meilleure tenue en température que les batteries, mais leurs performances tendent à se dégrader entre -20 et -40 °C avec une augmentation de la résistance série.

Enfin, les supercondensateurs sont fabriqués avec des matériaux moins polluants que les batteries, hormis pour l'électrolyte, et ne nécessitent pas de maintenance particulière tel le nettoyage des électrodes des batteries.

Tous ces avantages font que les supercondensateurs sont utilisés dans de nombreuses applications aujourd'hui et permettent d'augmenter le rendement des systèmes dans lesquels ils sont intégrés. Mais attention, le stockage par supercondensateurs ne se substitue pas aux stockages précédemment décrits. Il les complète et peut s'associer à eux de façon hybride. En particulier il peut s'associer au stockage des batteries électrochimiques. Seule une analyse technico-économique poussée permet d'optimiser la solution à retenir pour une application donnée : par exemple associer supercondensateur et batterie pour un système autonome à forte dynamique, ou encore associer pile à combustible et supercondensateur (à la place d'une batterie) pour une propulsion de véhicule...

II.10.6. Domaines d'utilisation

Les supercondensateurs sont particulièrement adaptés pour des applications qui requièrent des « pulses » d'énergie sur des temps très courts. L'application principale est le stockage

d'énergie rapide sur les véhicules électriques pendant les phases d'accélération et de freinage, les batteries ne pouvant qu'effectuer des échanges d'énergie longs (dizaine de secondes ou quelques minutes). Passons en revue les différents types d'applications :

- Application dans l'automobile où la technologie des SCs satisfait aux fonctions de démarrage (en particulier avec des contraintes à basse température), d'organes de puissance des chaînes de traction hybrides (assistance aux accélérations et récupération de l'énergie) en étant alimentés soit par la batterie à l'arrêt, soit par l'alternateur en condition de marche ou par des organes auxiliaires. L'utilisation des SCs est particulièrement adaptée aux nouvelles fonctions de la chaîne de traction (filtrage des appels de puissance, « stop & go », accélération, récupération d'énergie au freinage...). Ces fonctions exigent en effet des appels de puissance importants pendant quelques secondes et une durée de vie de l'élément de stockage d'énergie de plusieurs centaines de milliers de cycles.
- Application dans les transports collectifs urbains où les SCs permettent d'améliorer le rendement énergétique des tramways et métros en permettant la récupération de l'énergie de freinage, la suppression locale de caténaires, la marche électrique des motrices diesels en zones dont on souhaite réduire la pollution, l'assistance au démarrage des moteurs diesels, la substitution aux batteries de démarrage. Comme dans l'automobile, ils participent à l'hybridation des chaînes de traction des autobus. L'application des principes d'hybridation automobile aux bus urbains permet de réduire la consommation de plus de 30 %.
- Applications diverses pour l'alimentation d'appareils consommables (appareils photo), alimentation de secours de mémoires en informatique, récupération de l'énergie de freinage (ascenseurs, arrêts contrôlés des machines de finition lors des disparitions de réseau).

II.10.7. Dimensionnement des supercondensateurs

Étude de dimensionnement

Sachant que NP_{sc} supercondensateurs identiques de capacité $C_{scelelem}$ voient leur capacité totale multipliée $C_{sc} = NP_{sc} * C_{scelelem}$ ainsi que leur courant global $I_{sc} = NP_{sc} * I_{scelelem}$, tandis qu'un banc de NS_{sc} supercondensateurs divise la capacité $C_{sc} = C_{scelelem} / NS_{sc}$ et multiplie la tension $V_{sc} = NS_{sc} * V_{scelelem}$. Partant de là, le banc peut être dimensionné à l'aide des deux équations suivantes. La première permet de déterminer la capacité nécessaire selon la puissance spécifique voulue, en imposant la durée maximale pendant laquelle le supercondensateur doit pouvoir se charger ou décharger entièrement :

$$C_{sc} = \frac{I_{sc} \Delta t_{charge}}{V_{scnom}} \quad \text{II.6}$$

Tandis que la seconde en déduit l'énergie maximale emmagasinable selon la capacité et la tension nominale :

$$E_{scmax} = 1/2 C_{sc} * V_{scnom}^2 \quad \text{II.7}$$

Le fait de combiner plusieurs supercondensateurs identiques permet donc d'ajuster, tension, puissance et énergie stockable aux valeurs souhaitées. Cependant, en pratique des SCs de mêmes caractéristiques ont une capacité pouvant varier de plus ou moins 20% d'un élément à l'autre, entraînant par exemple dans un banc en série des tensions différentes et donc une répartition des charges inégales. Un circuit d'équilibrage est alors indispensable pour éviter usure et surcharge du banc.

II.10.8. Modélisation des supercondensateurs

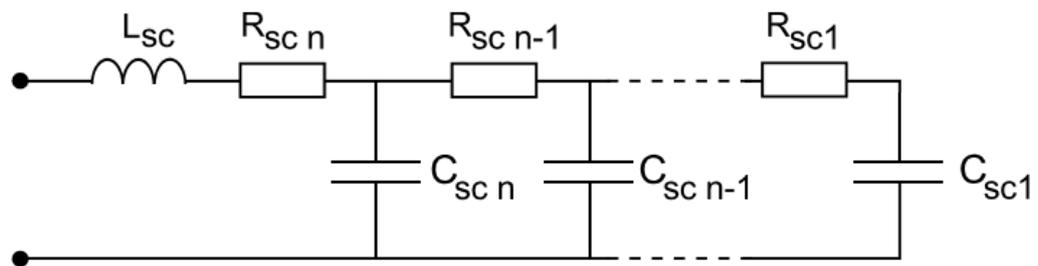
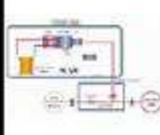
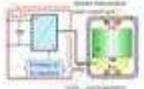


Figure II. 12 : Modélisation d'un supercondensateur à partir des circuits RC.

II.11. Comparaison des différentes technologies de stockage

La présence d'unités de stockage au sein d'un système de puissance était indispensable pour en assurer deux fonctions vitales : l'autonomie à moyen terme du site pendant les périodes où la production est très faible, et l'équilibre énergétique en stockant ou déstockant la différence entre puissance produite et puissance consommée à chaque instant. Le panel des solutions de stockage, résumé figure 1.13 peut se classer selon leur énergie et puissance spécifiques, qui permettent d'assurer respectivement la première et la seconde fonction. Pour une utilisation en cas de pénurie, nous ne retenons pas les piles à combustible, trop chères, et les volants d'inertie, trop dangereux dans ce contexte.

Tableau II. 1 : comparaison des différentes technologies de stockage

Technologie	Inductif Supra-condacteur	Super-condensateur	Electro-chimique	Volant Inertie	Air comprimé en bouteille	Hydrogène PAC réversible
Illustrations						
Forme d'énergie	magnétique	électrostatique	chimique	mécanique	mécanique	chimique
Densité d'énergie (accumulateur seul, hors équip. annexes)	1 à 5 Wh/kg	5 à 10 Wh/kg	20 à 120 Wh/kg	1 à 5 Wh/kg	8 Wh/kg (200 bars)	300 à 600 Wh/kg (200 à 350 bars) hors PAC
Capacité réalisable ou réalisée	qq kWh	qq kWh	qq Wh à qq MWh	qq kWh à qq 10 kWh	qq kWh à qq 10 kWh	NA
Constante de temps	qq s à 1 mn	qq s à qq mn	qq 10 mn (NiCd) à qq 10 heures (Pb)	qq mn à 1 h	1 h à qq jours (peu d'auto-décharge)	1 h à qq jours (peu d'auto-décharge)
Cyclabilité	qq 10 000 à qq 100 000 fatigue mécanique	qq 10 000 à qq 100 000	qq 100 à qq 1000 dégradations chimiques	qq 10 000 à qq 100 000 fatigue mécanique	qq 1000 à qq 10 000 fatigue mécanique	??
Rendement électrique	> 0,9	0,8 à > 0,9 selon régime	0,7 à 0,8 selon techno et régime	0,8 à > 0,9 selon régime	0,3 à 0,5 selon régime	0,3 à 0,5
Connaissance de l'état de charge	Aisée (courant)	Aisée (tension)	Difficile Paramètres variables	Aisée (vitesse)	Aisée (pression)	Aisée (remplissage H2)
Coût énergie €/kWh(1)	500 à 72000	50 000 à 150 000 (dimensionnement en puissance)	Pb-acide : 50 à 200 Lithium : 700 à 1000	150 à 2000 (massif) ≈ 25000 (composite)	?	15
Coût puissance €/kW(1)	≈ 300	≈ 300	250 à 1500	300 à 350	?	6000
Remarques	Cryogénie	Grande cyclabilité	Technologie mature	Coût global compétitif sur la durée de vie	Rendement faible	Intéressant si contexte de réseau d'hydrogène

Peu chères et souvent sans entretien, les batteries sont la solution idéale pour assurer l'autonomie énergétique sur plusieurs jours. Cependant, elles présentent une faible puissance spécifique, ce qui amène à se demander ce qui se passe lors de pics de production ou de consommation.

Si le pic est dans une gamme de fréquences suffisamment basse, il peut être absorbé par la batterie, engendrant une charge ou décharge à fort courant. Cependant, la durée de vie d'une batterie est tributaire du nombre de ses cycles de charge-décharge, qui à l'usage engendre des phénomènes chimiques irréversibles qui diminuent peu à peu sa capacité. Mais plus le courant utilisée pour la charge ou de décharge est fort, plus elle se dégrade vite. Les pics de puissance sont amenés à se produire très régulièrement, ce qui limite à long terme nettement la durée de vie de la batterie. Donc pour minimiser l'impact de ce phénomène nous allons utiliser une hybridation du système de stockage.

II.12. Hybridation du stockage

Elle consiste à assembler plusieurs sources de stockage dans un même circuit pour plusieurs raisons, telles que la réduction des coûts, la capacité d'énergie stockée et la durée de vie des éléments du système. Les différentes sources peuvent être connectées selon plusieurs configurations soit pour intervenir simultanément selon la variation de la charge soit alternativement selon le temps.

Pour cela et afin de réduire le vieillissement des batteries, qui sont les éléments les plus couramment utilisés pour stocker l'énergie électrique dans les systèmes industriels. Parce qu'elles ont une forte énergie spécifique, c'est-à-dire qu'ils peuvent stocker beaucoup d'énergie. Cependant, elles ont une faible puissance spécifique, elles ont donc du mal à suivre des variations de charge très rapides. Ainsi les utilisés pour gérer les impacts de délestages du consommateur ou les fluctuations climatiques peut donc, engendrer un vieillissement prématuré des batteries, celles-ci étant déjà de courte durée de vie. D'autres types de stockage existent, tels les supercondensateurs, qui possèdent à l'inverse une faible énergie spécifique et une forte puissance spécifique. Composants destinés à devenir économiquement rentables dans les années à venir, ils possèdent une durée de vie bien plus longue que les batteries de l'ordre de 100.000 cycles de charge et décharge. Donc, ces éléments de forte puissance sont en mesure de soulager les batteries en absorbant ou fournissant les pics très importants de puissance.

Conclusion

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. Le système de stockage est un élément crucial de l'installation photovoltaïque, il représente 40 à 50 % du coût de l'installation. La gestion de l'énergie solaire nécessite d'envisager des stockages suivant les conditions météorologiques et qui répondent à deux fonctions principales :

Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps).

- Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV

Il existe plusieurs types de stockage dans le système PV, le plus utilisé est le stockage électrochimique dont on peut citer essentiellement les accumulateurs électrochimiques.

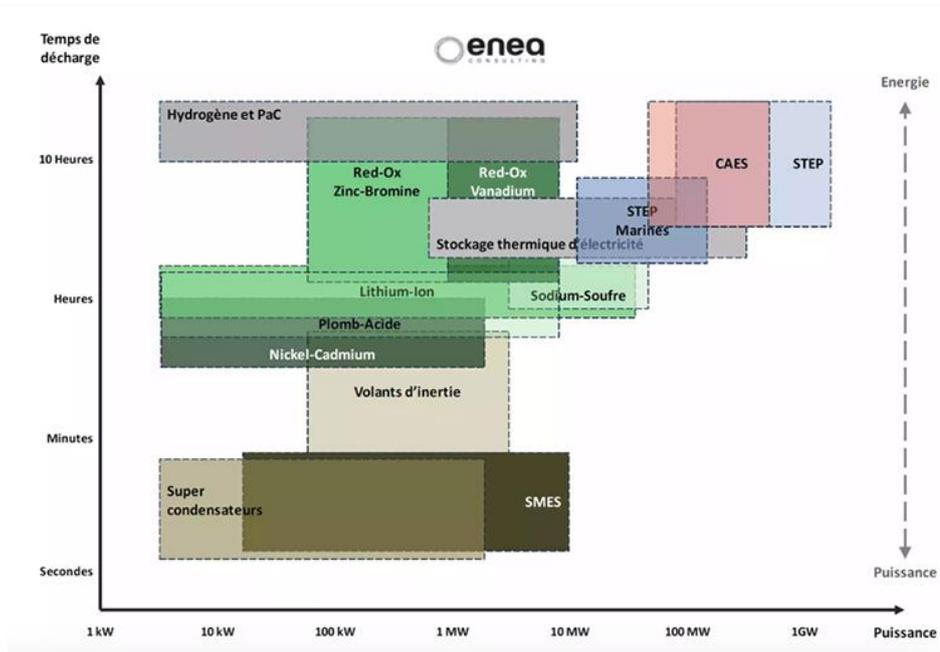


Figure II. 13 : Comparatif des applications des principales technologies de stockage (ENEA)

**CHAPITRE III : LA STRATEGIE
DE GESTION D'ENERGIE DE
LA CENTRALE
PHOTOVOLTAIQUE**

III.1 Introduction

Le dimensionnement du stockage de l'énergie pour les systèmes isolés est encore du domaine de la recherche étant donnée sa complexité en termes de modélisation et d'optimisation. Le stockage d'énergie devient actuellement intéressant dans une problématique connectée ou faiblement connectée réseau pour résoudre le problème d'intermittence des énergies renouvelables. Le but est de prolonger la durée de fonctionnement de la centrale, jusqu'au 00, en stockant l'énergie produite par la centrale photovoltaïque pendant le surplus de production où il y a le prix le plus bas car la consommation est moins importante. Et de restituer l'énergie pendant le pic de consommation de soir où le prix devrait être plus important. Alors on optimiserait la capacité idéale de stockage d'énergie suivant la consommation. Dans cette partie de notre travail, nous allons dimensionner le système de stockage hybride et proposer une stratégie de gestion.

III.2. Structure du système prévu

La figure (III.1) illustre la configuration que nous avons proposée pour notre système :

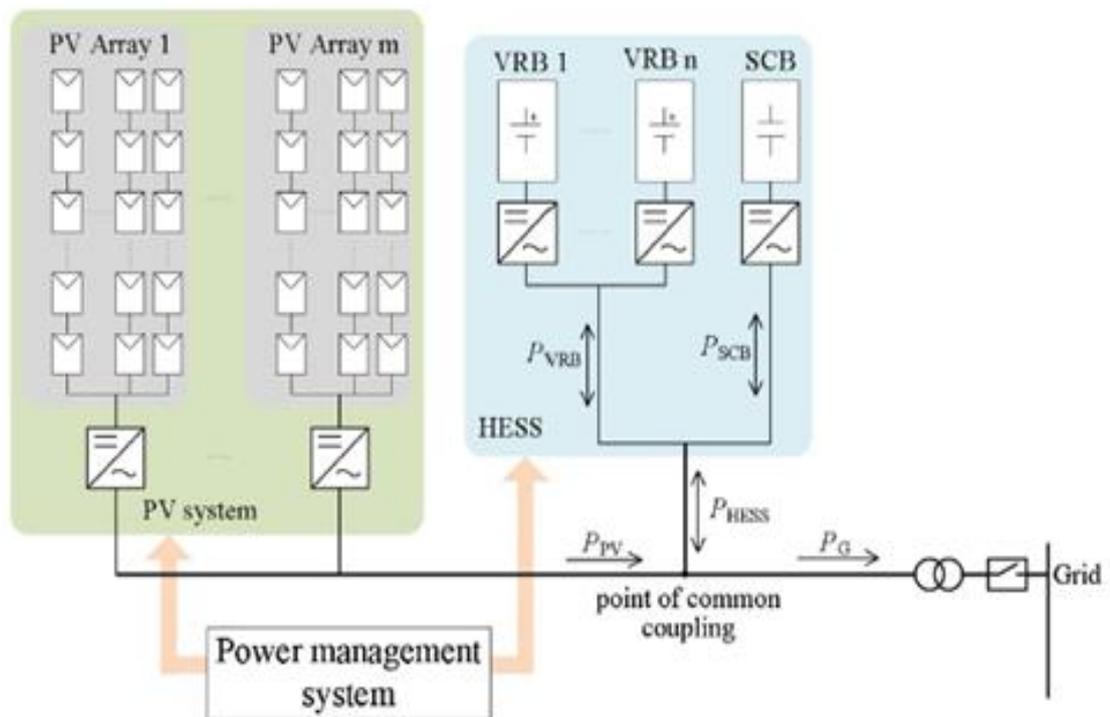


Figure III. 1 : Schéma de raccordement des différents éléments

- En premier nous avons les panneaux photovoltaïques qui a leur sortie sont reliés à un onduleur afin de convertir leur courant en courant alternatif.
- Il y a ensuite les dispositifs de stockage c'est-à-dire les batteries et les supercondensateurs ; ils sont aussi couplés avec des convertisseurs car ils fournissent du courant continu à leur sortie.
- Enfin le réseau électrique et le point de raccordement de tous les éléments ; selon la disponibilité et la demande l'énergie est photovoltaïque est soit stockée soit injectée dans le réseau après passage dans le poste de liaison.

III.3. La production d'énergie

Suite aux données relevées à partir de la centrale, nous avons tracé la courbe de production annuelle comme cela est illustré dans la figure III.2

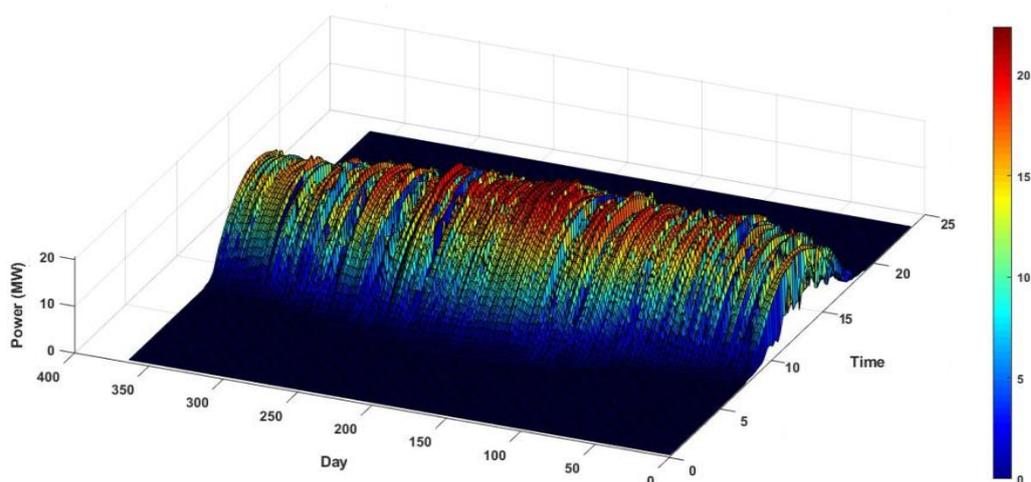


Figure III. 2 : Courbe de la représentation en 3D de la production énergétique

Cette courbe de la production de la centrale contient trois axes ; un axe présent les jours de l'année, un autre pour les heures d'une journée et l'axe vertical donne les valeurs de la puissance crête produite. Pour l'hiver nous remarquerons qu'il y a très peu d'ensoleillement (environ 8h de temps) ; ce qui peut expliquer la faible puissance crête. Pendant le printemps, les heures d'ensoleillement ont peu augmenté même si les valeurs ne sont toujours pas élevées. Durant l'été, l'ensoleillement dure plus de 12h et il est maximum donc nous recueillons de très fortes puissances. L'automne est aussi une saison durant laquelle nous avons un faible ensoleillement.

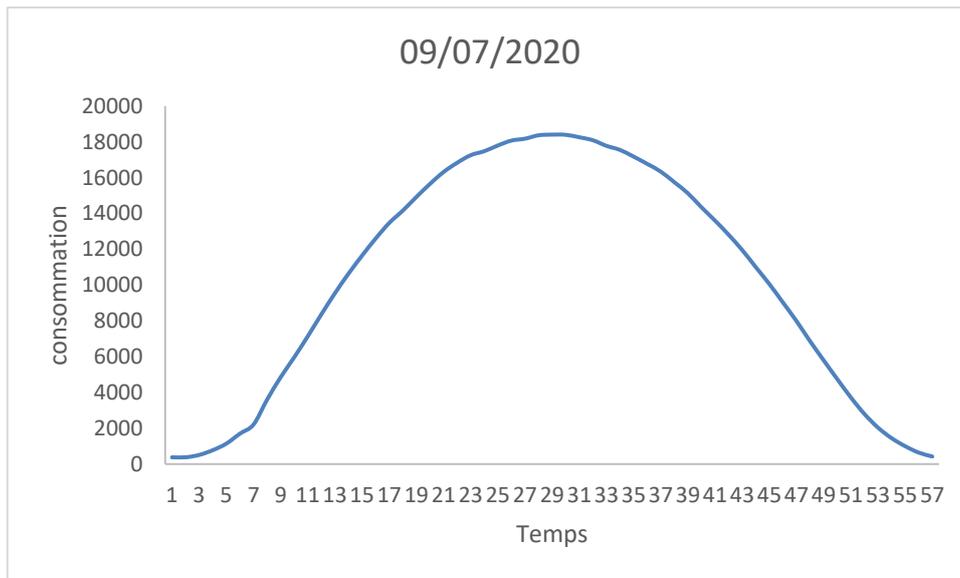


Figure III. 3 : Courbe de production journalière en été

La production est très importante pendant l'été et elle dure plus de la moitié d'une journée. Elle commence avant 6h et ne s'arrête que vers 20h ; elle est forte jusqu'au midi solaire avant de commencer à décroître.

III.4. La consommation d'énergie

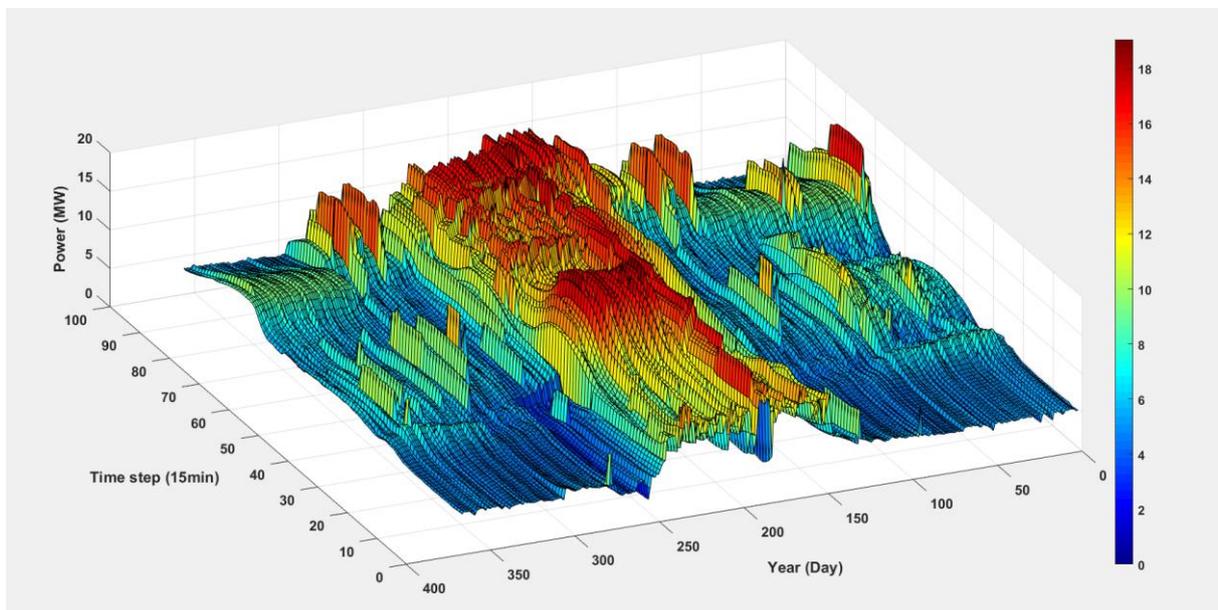


Figure III. 4 : Courbe en 3D de la consommation.

La courbe annuelle en 3D de la consommation est une représentation en temps réel de la demande énergétique de la région de notre centrale. On arrive à y voir que les valeurs sont plutôt faibles durant l’hiver mis à part dans les heures tardives du soir. Durant l’été, on atteint des valeurs très importantes presque toute la journée ; cela est dû à la chaleur et aussi à la nécessité de rafraîchissement.

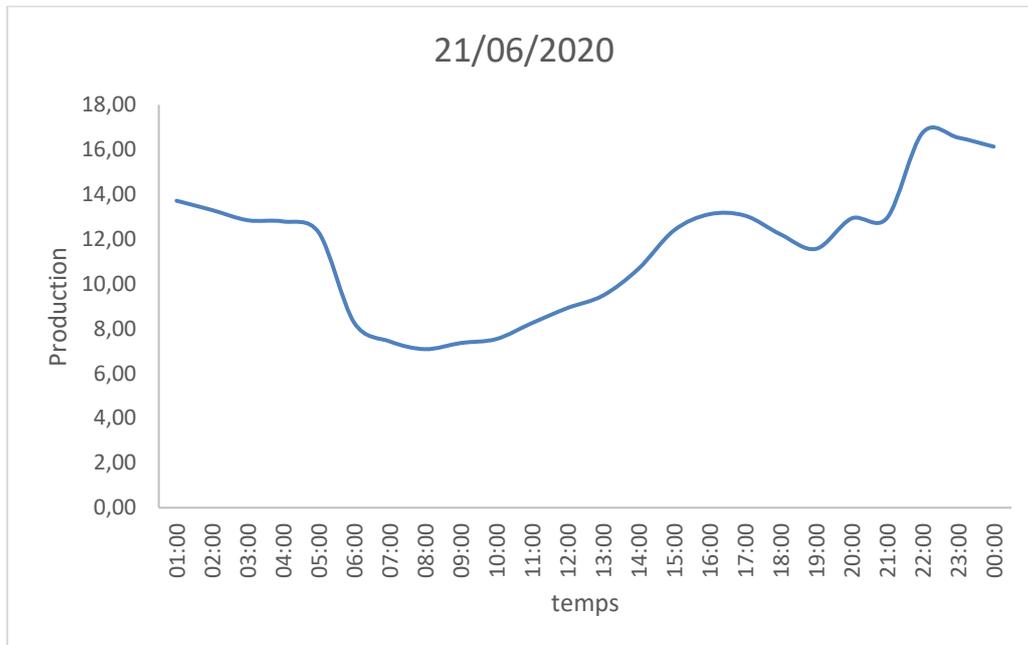


Figure III. 5 : Courbe de la consommation journalière durant l’été.

Dans cette courbe, nous avons trois principales situations :

Premièrement, le matin lorsque l’activité humaine est restreinte donc pas de grande consommation énergétique. Deuxièmement, l’après-midi ou la chaleur est présente et donc une forte demande en termes d’énergie afin de refroidir les maisons, bureaux, etc. Dernièrement, la nuit donc à partir de 19h la consommation augmente encore pour atteindre des valeurs maximales mais à partir de 00h elle commence à diminuer même si elle reste conséquente.

La figure III.5 et la figure III.4 montrent que la production n’est pas synchrone et adéquate avec la consommation de l’énergie provenant de soleil les usagers de la région utilisent encore l’énergie fossile c’est la cause qui justifiée la nécessité d’un stockage pour profiter davantage de l’énergie solaire.

III.5. Dimensionnement manuel

Relation entre la demande énergétique et la puissance crête

$$E_{elec} = N * P_c \quad \text{III.1}$$

E_{elec} : demande énergétique journalière en Wh/j

N : nombre d'heure en h/j

P_c : puissance crête en Wc

La première permet de calculer le nombre d'heures équivalent d'ensoleillement, N_e , pour une journée à partir des données de gisement solaire, E_{sol} en Wh/(m²j) -- énergie reçue par 1 m² en un jour.

En fait, la puissance des panneaux solaires est déterminée sous des conditions standardisées (Ensoleillement optimum de 1000W/m², à une température de 25°C et sous un ciel clair), donc là ensuite on peut ajouter des pertes (pertes dans le système photovoltaïque et pertes de L'onduleur si ce n'est pas déjà pris en compte)

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, la puissance crête de consommation avoisine 18 MWc dans le pire mois(juillet) donc pour l'énergie a stocké il faudra la multipliée par le nombre d'heures sans ensoleillement durant lesquelles le stockage prendra le relais donc pendant 7h de temps.

$$E_{elec} = 7 * 18 = 126 \text{ MWh/j}$$

III.5.1. Les batteries

Pour déterminer le système de batteries, il faut donc connaître le nombre de jours d'autonomie nécessaire, c'est-à-dire le nombre de jours susceptibles d'être sans apport d'énergie solaire et les températures pour le lieu choisi. Des températures basses sont nocives pour les batteries. Il faut donc appliquer un coefficient réducteur qui tient compte de ce fait. On doit aussi connaître la profondeur de décharge du type de batteries choisi (seuil sous lequel la batterie ne peut être déchargée, sinon elle sera endommagée). Avec ces données et la demande énergétique, on calcule la capacité des batteries et la capacité en tenant compte des coefficients de réduction.

$$C_{batt} = (E_{dem} / j * j_a) / (\eta_{batt} * V_{batt} * P_b) \quad \text{III.2}$$

$$C_{batt} = 126 \text{ MWh/j} * 1j / (0.9 * 96 * 0.85) = 1.71 \text{ MAh}$$

Notre choix s'est porté sur des batteries au Lithium ion ayant une capacité de 500 Ah et 96V de tension à leur borne.

Le nombre total de batteries est donc : $1.71 \text{ MAh} / 500 \text{ Ah} = 3432$ batteries

La tension à la sortie des panneaux photovoltaïques est de 1000V.

Le nombre de batteries en série est : $1000 \text{ V} / 96 \text{ V} = 11$ batteries par chaîne

Le nombre de batteries en parallèle est : $3432 / 11 = 312$ chaînes de batteries.

Branchement des batteries

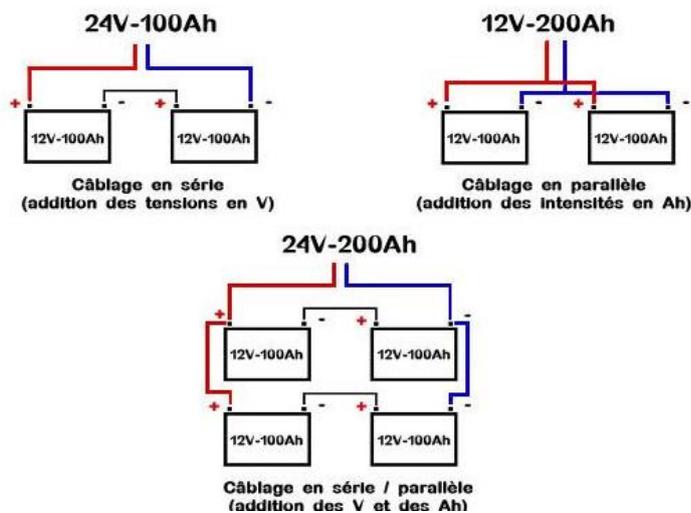


Figure III. 6 : Schéma du branchement série parallèle des batteries

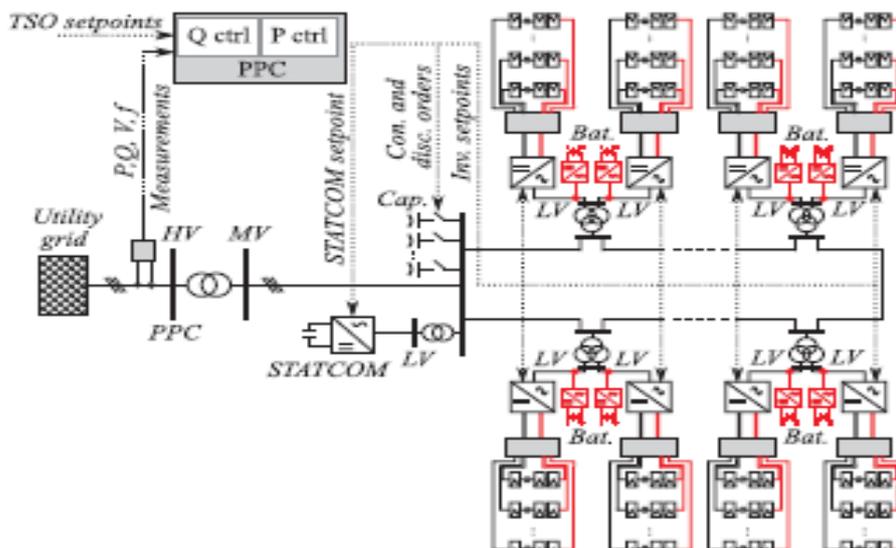


Figure III. 7 : Schéma du branchement des batteries avec le système PV

III.5.2. Les supercondensateurs

Notre choix s'est porté sur des SCs ayant une capacité de 3000F et une tension de 2.8 V.

La tension à la sortie du système photovoltaïque est de 1000 V ; nous pouvons donc obtenir le nombre de supercondensateurs dont nous aurons besoin.

SCs en série : $1000 \text{ V} / 2.8 \text{ V} = 358$ supercondensateurs par branche.

Capacité d'une branche C_b : $3000 / 358 = 8.38 \text{ F}$

$$E = W_h * 3600 \text{ J} \tag{III.3}$$

$$E = \frac{1}{2} C_t * U^2 \tag{III.4}$$

$$C_t = (2 * E) / U^2 \tag{III.5}$$

$$E = 126 \text{ MWh} * 3600 \text{ J} = 453 \text{ GJ}$$

$$C_t = 2 * 453 \text{ GJ} / (1000)^2$$

$$C_t = 907.2 \text{ Kf}$$

Le nombre de supercondensateurs en parallèle : $C_t / C_b = 907200 / 8.38 = 108\,250$ branches de SCs.

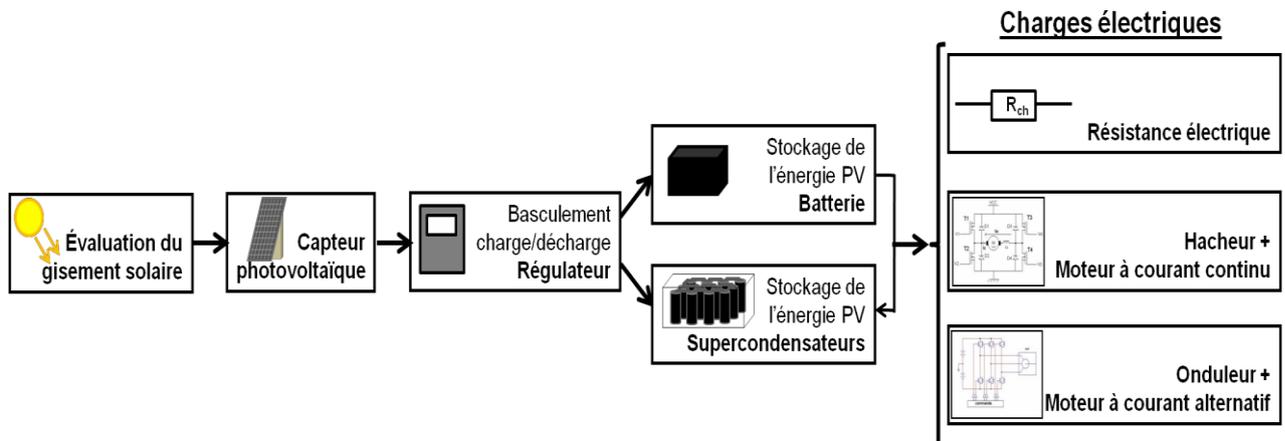


Figure III. 8 : schéma global du système

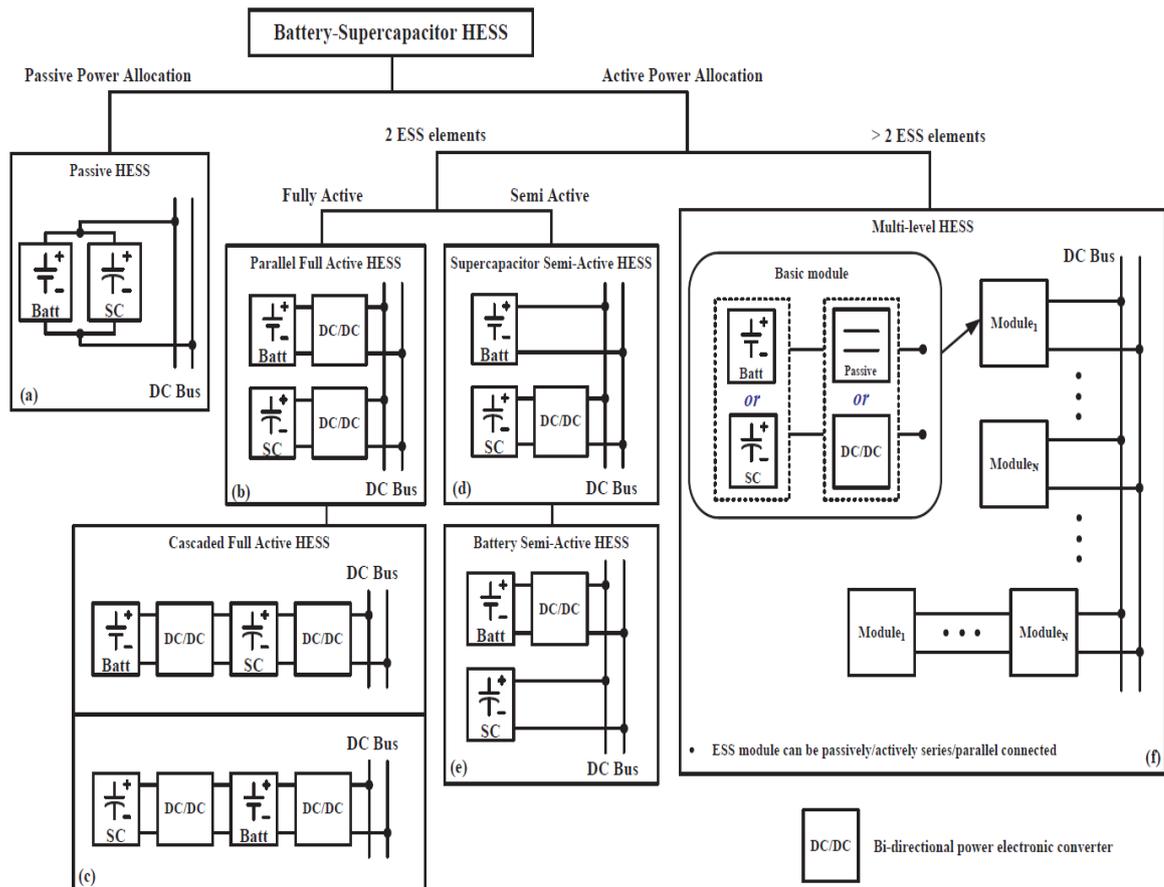


Figure III. 9 : Raccordement des systèmes de stockage

III.6. La stratégie de gestion d'énergie

III.6.1. Introduction

La gestion de l'énergie est un art qui demande de nombreuses compétences personnelles du gestionnaire parce qu'un bon organigramme de gestion peut nous optimiser beaucoup l'énergie pendant une année.

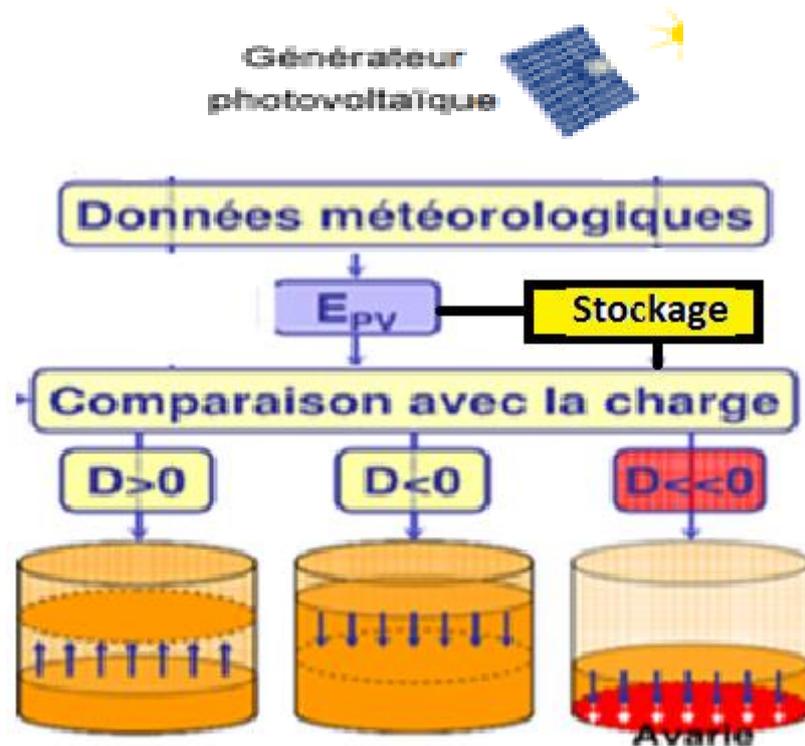


Figure III.10 : Illustration de l’algorithme de calculs

III.6.2. Méthodologie

Le système étudié est composé d’un système photovoltaïque et d’un stockage. On considère que la puissance nominale totale du système est limitée à 14MW. Ainsi si le système est composé de deux sous-systèmes (PV+stockage) à puissance nominale identique et égale à la puissance maximale consommée, alors la charge pourrait être satisfaite pendant un temps limité même en cas de manque de la ressource primaire.

A partir des données météorologiques disponible et des modèles pour décrire le comportement du photovoltaïque, on calcul pour chaque heure i l’énergie produite ($E_{PV}(i)$). Celle-ci est comparée avec la charge électrique (E_{charge}).

* Si la différence entre l’énergie produite et l’énergie consommée appelée D est positive, alors l’excès d’énergie $E_{toSTOCK}$, est stocké dans le dispositif de stockage ;

* Si cette différence est négative, il y a donc une pénurie d’énergie et le dispositif de stockage doit fournir l’énergie nécessaire manquante $E_{fromSTOCK}$;

*Si l’énergie stockée n’est pas suffisante pour assurer cette différence, une avarie est enregistrée et les paramètres suivants sont calculés – énergie non satisfaite, nombre et durée des pannes. La méthode ainsi décrite est présentée sur la Figure ci-dessus.

Une fois les calculs réalisés pour chaque heure de l'année, les paramètres annuels seront calculés comme suit :

- La différence annuelle entre l'énergie produite et la charge **Dan** (III.6)

$$D_{an} = \sum_{i=1}^{8760} (E_{pv}(i) - E_{charge}(i)) \quad \text{III.6}$$

- L'énergie stockée E_{stock} et sa valeur maximale $E_{stock, max}$ (III.7)

$$E_{stock} = \sum_{i=1}^{8760} [E_{pv}(i) - E_{charge}(i)] \text{ si } E_{pv}(i) - E_{charge} > 0 \quad \text{(III.7)}$$

$$E_{stock, max} = \max [E_{pv}(i)] \quad \text{si } E_{pv}(i) - E_{charge} > 0$$

Heures par an 8760 ; par mois 720 et 24 par jour.

Pénurie réglée (un petit manque d'énergie réglé par l'énergie stockée)

$$E_p = \sum_{i=1}^{8760} [E_{from, stock} + E_{pv}(i) - E_{charge}(i)] \quad \text{si } E_{from, stock} + E_{pv}(i) - E_{charge} \geq 0$$

Avarie (le stockage n'a pas réglé le manque nous avons une coupure)

- L'énergie totale non satisfaite E_{fault} et la durée des avaries au cours de l'année T_{fault} (III.8)

$$E_{fault} = \sum_{i=1}^{8760} [E_{from, stock} + E_{pv}(i) - E_{charge}(i)] \text{ si } E_{from, stock} + E_{pv}(i) - E_{charge} < 0 \quad \text{(III.8)}$$

$$T_{fault} = \sum_{i=1}^{8760} \frac{[E_{from, stock} + E_{pv}(i) - E_{charge}(i)]}{E_{charge}(i)} \text{ si } E_{from, stock} + E_{pv}(i) - E_{charge} < 0$$

❖ Résumé

Pour le système PV, on calcule les paramètres définis par (III.6), (III.7) et (III.8), puis on détermine **la configuration optimale** de la puissance crête selon **un** des critères suivants :

- Une valeur minimale de D_{an} -c'est-à-dire une valeur absolue de la différence minimale entre l'énergie produite et consommée. Il s'agit ici de la valeur absolue de cette différence :

- **si** cette différence minimale est **positive (D=1)**, cela implique que la charge **est satisfaite par le système** donc il faut ajuster et confirmer le dimensionnement ;

- **si** cette différence minimale est **négative (D=0)**, et elle devient positif avec l'énergie qui parvient du stockage (**D=1**), cela implique que la charge **est satisfaite par le système** ;

- si cette différence minimale est **négative ($D=0$)**, cela implique que la charge **n'est pas satisfaite par le système** donc il faut déterminer :

- Le nombre minimal d'avaries – dans ce cas, le consommateur se verra privé d'électricité le moins de fois possible ; « beaucoup ou moindre »
- La durée minimale des avaries sur l'année – dans ce cas, le consommateur se verra privé d'électricité le moins longtemps possible ; C'est une amélioration par rapport au critère précédent car la durée des avaries peut être différente ; « durée ne dérange pas »
- La quantité énergie minimale non satisfaite.

Pour certains critères il sera possible d'avoir plusieurs solutions optimales. Dans le cas où l'énergie non satisfaite est importante,

III.6.3. Organigramme general de la gestion d'énergie

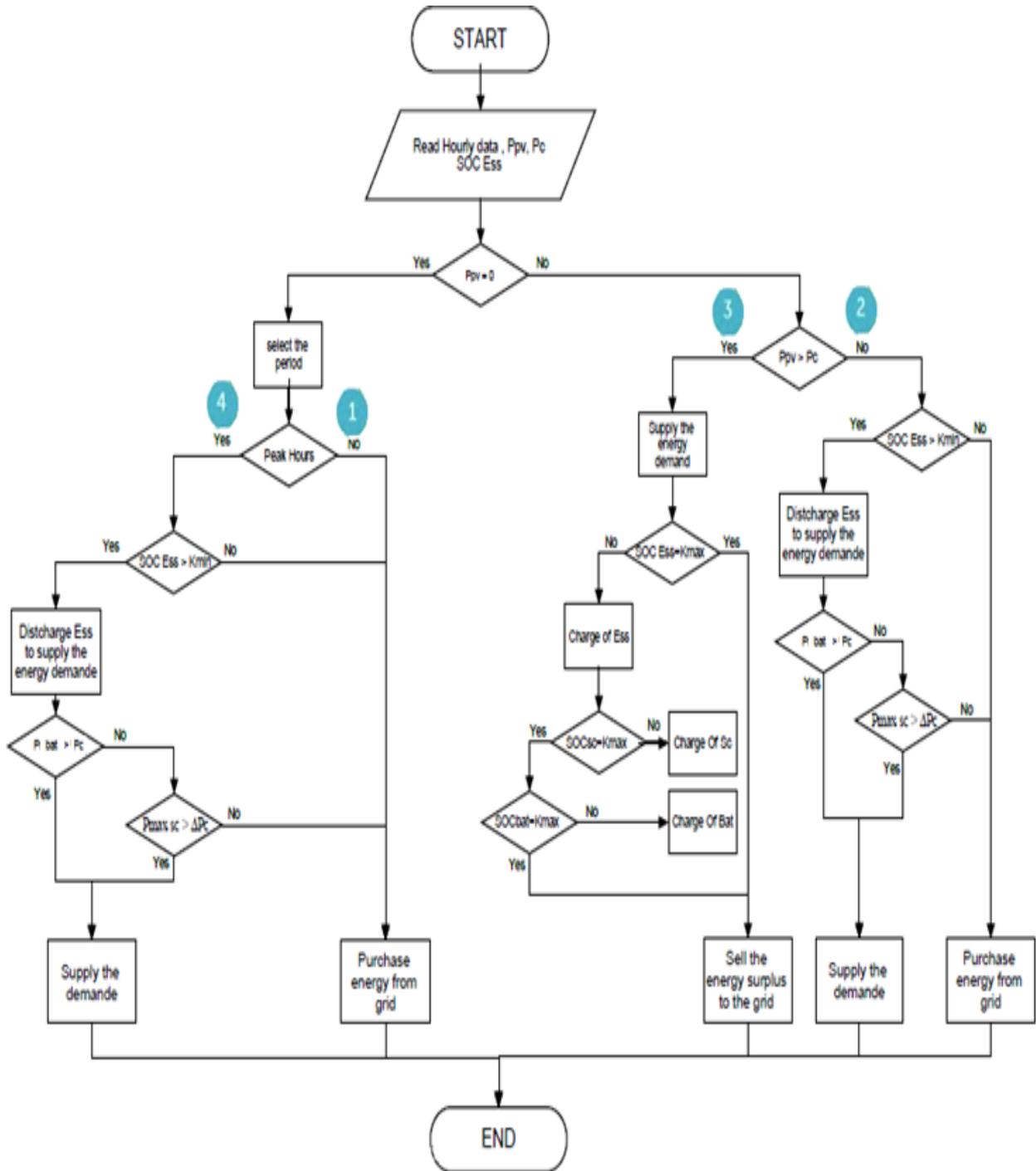


Figure III. 10 : Organigramme général de la stratégie de gestion

Scénario 1 :

Pendant les heures creuses, lorsque l'énergie photovoltaïque est nulle, la consommation doit être assurée auprès du réseau d'électrique. Il est rentable d'acheter de l'électricité sur le réseau même si la batterie est suffisamment chargée pour fournir l'énergie nécessaire au chargement. La décharge de la batterie entraînant une perte de capacité de vieillissement de la batterie, elle sera ajoutée au coût de dégradation du coût de fonctionnement total.

Scénario 2 :

Pendant les heures creuses, lorsque l'énergie photovoltaïque n'est pas suffisante pour alimenter les charges, la consommation doit être assurée par la production PV et par le réseau électrique.

Scénario 3 :

Pendant les heures de pointe, lorsque la puissance PV fournie par la centrale PV est supérieure à la charge, le surplus sera envoyé pour charger le SSE.

Scénario 4 :

Pendant les heures creuses, lorsque l'énergie photovoltaïque n'est pas suffisante pour alimenter les charges, la consommation doit être assurée par la production PV et par l'ESS. Si L'ESS est inférieur à la consommation l'écart sera assuré par le réseau électrique.

Scénario 5 :

Pendant les heures de pointe, lorsque la puissance PV est nulle, la consommation sera assurée par L'ESS. Si L'ESS est inférieur à la consommation l'écart sera assuré par le réseau électrique.

III.6.4. Organigramme de charge du système de stockage

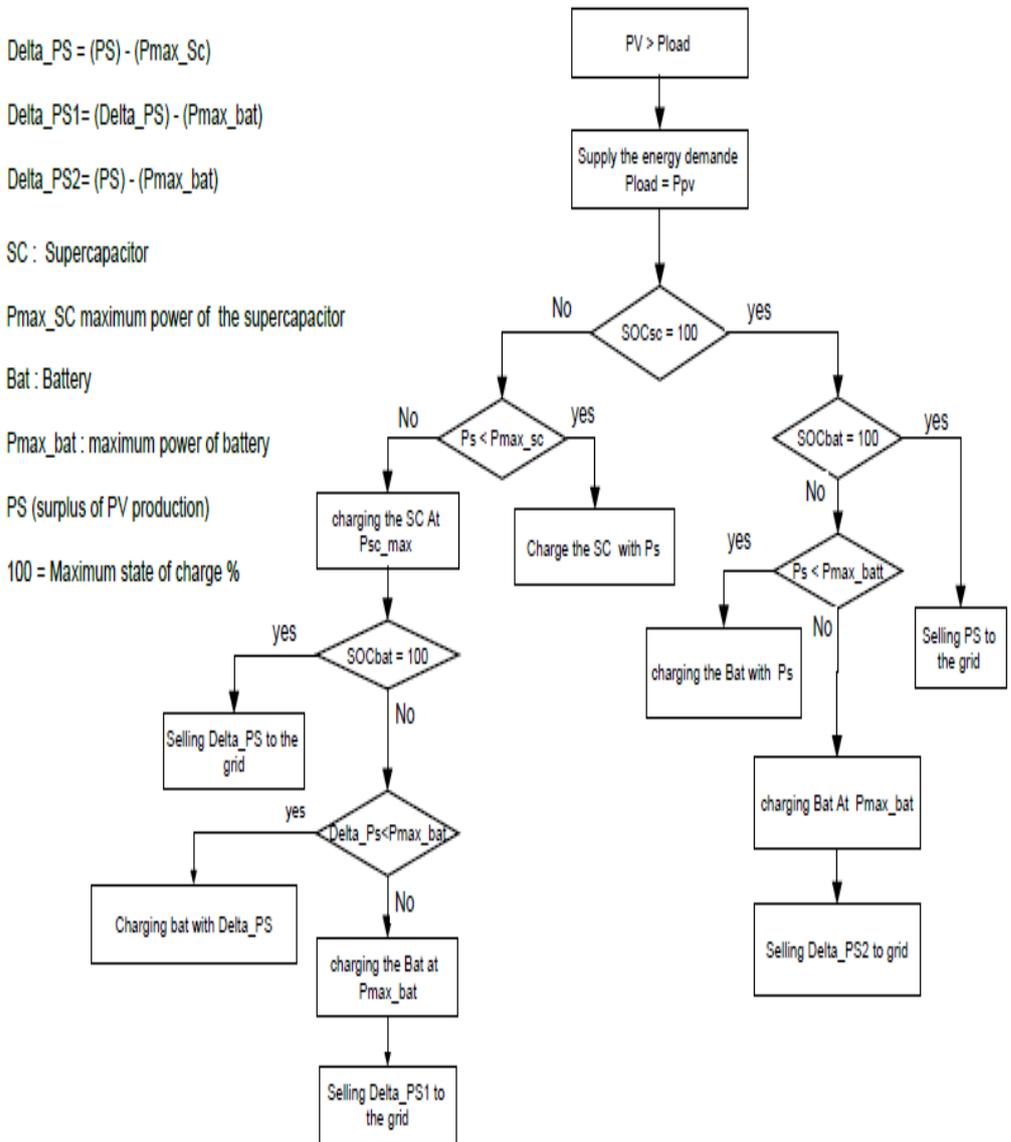


Figure III. 11 : Organigramme du processus de charge des systèmes de stockage

En premier il faut s'assurer la demande énergétique lorsque l'énergie PV produite est supérieure à la consommation et par la suite nous avons différentes situations :

- Lorsque les SCs sont chargés à 100%, on vérifie l'état de charge des batteries et si elles sont aussi chargées à 100%, on vend l'excédent au réseau. Sinon si les batteries ne sont pas chargées on compare leur état de charge avec le surplus de la production

photovoltaïque et on les charge suivant cet aspect avant de vendre si reste il y a au réseau.

- Quand les supercondensateurs ne sont pas chargés à leur maximum, ils sont en premier mis en charge avec le surplus de production ensuite les batteries si nécessaire et la différence sera vendu au réseau électrique.

III.6.5. Organigramme de décharge ses systèmes de stockage

$$\Delta_{load} = P_{load} - P_{batmax}$$

$$\Delta_{load_1} = P_{load} - P_{max_bat} - P_{max_sc}$$

20% : minimum state of charge

$$Net_load = P_{load} - P_{pv}$$

$$Net_load_1 = P_{load} - P_{pv} - P_{max_bat}$$

$$Net_load_2 = P_{load} - P_{pv} - P_{max_bat} - P_{max_sc}$$

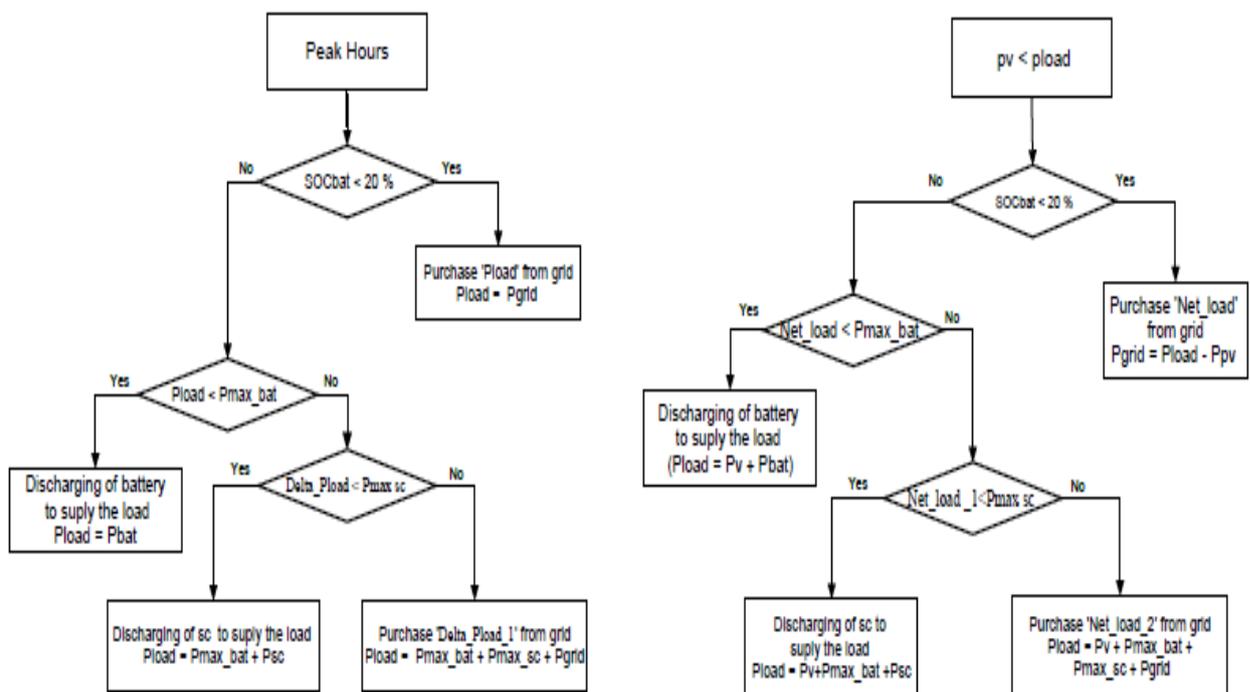


Figure III. 12 : Organigramme du processus de décharge des systèmes de stockage

Pendant les heures de pic, si les batteries ont atteint leur limite de décharge il faut faire appel au réseau électrique pour subvenir aux besoins énergétiques. Sinon lorsque la demande est

inférieure à l'énergie stockée dans les batteries, elles sont déchargées pour palier au creux. La demande peut aussi être assurée par les SCs dans le cas contraire ou par le réseau selon la nécessité.

Lorsque la production est inférieure à la consommation en dehors des heures de pointes ; si les batteries sont à moins de 20%, on utilise l'énergie du réseau.

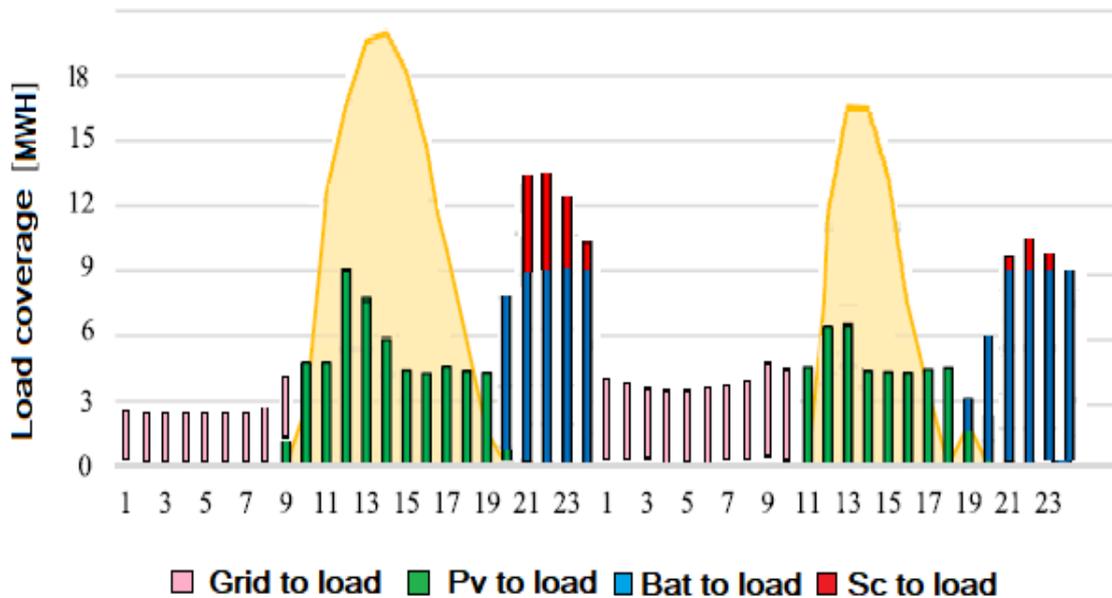


Figure III. 13 : Courbe de la gestion d'énergie

La courbe de la figure III.12 obtenu par programmation de notre stratégie sur Matlab, représente bien le résultat de l'application de notre stratégie de gestion de l'énergie électrique sur deux jours de différentes périodes :

- ✓ La couleur rose représente l'énergie que le réseau fournit pour la consommation ; elle est plus grande pour la journée 2 car sa production est moins importante.
- ✓ La couleur verte est l'énergie fournit par les panneaux ; cela se fait pendant la période de production et elle est plus conséquente pour la journée 1.
- ✓ La couleur bleue est pour l'énergie que les batteries fournissent en se déchargeant ; elle est presque la même pour les deux journées.
- ✓ Le rouge est pour l'énergie fournit par les supercondensateurs dans leur décharge ; ils sont plus sollicités dans la journée 1.

Interprétation

À partir des résultats présentés, nous avons constaté ce qui suit :

- Grâce au système de stockage l'intervention du réseau a été minimisée à 8H au lieu de 16H en cas sans stockage. Donc le temps d'utilisation des énergies renouvelables a été prolongé à 16H ce qui présente un énorme gain des gaz polluants.
- Le fait d'avoir choisi un site d'implantation du système caractérisé par un potentiel solaire élevé comme El Bayad a pour conséquence de trouver de fortes variations au niveau de l'énergie perdue en provenance du système EnR.
- Pour diminuer l'énergie perdue produite par les systèmes à EnR il est obligatoire d'utiliser des dispositifs de stockage supplémentaires.
- La contribution globale du stockage d'énergie par ce système est voisine 30%.
- L'insertion d'un système de stockage hybride batterie et supercondensateur augmente la durée de vie de la batterie.
- Le supercondensateur protège la batterie contre les chocs des appels très importants de la puissance (pics de consommation)

Conclusions de l'étude

L'objectif de cette étude était de montrer comment l'insertion d'un moyen de stockage au sein d'un système hybride raccordé au réseau permettait d'augmenter le taux d'intégration des EnR dans la production globale d'électricité.

Même si les résultats ne sont que partiels, on constate que l'ajout d'un système de stockage au sein du système de production d'électricité permet d'augmenter la participation des sources renouvelables d'énergie dans la production globale et de ce fait diminue la production en provenance des sources fossiles. Cependant, il ressort également que la présence d'un seul moyen de stockage d'énergie ne devrait pas permettre d'atteindre entièrement notre objectif et que l'ajout d'un second type de stockage comme le supercondensateur améliorera les performances du système de production globale. Ainsi il met la batterie en abri des pics de charge ce qui augmente sa durée de vie

Il est évident que cette étude doit être poursuivie afin d'optimiser plusieurs paramètres tels que :

- La stratégie de gestion des différents moyens de production (Système PV, batteries, Cs)
- L'optimisation du dimensionnement des différents organes du système
- La simulation du fonctionnement du système hybride par Matlab Simulink
- Ajouté une régulation intelligente pour la charge et la décharge de batterie

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Ce travail présente une modeste contribution à la concrétisation et à la réalisation du programme National des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique mis en œuvre en 2012, récemment mis à jour en 2020 et qui prévoit la production de 16.000 MW d'ici 2035 en Algérie.

L'objectif de notre travail était une initiative visant à introduire un système de stockage hybride au niveau de la centrale photovoltaïque d'El Abiodh Sid cheikh qui a été mise en service en 2017 avec une capacité de pointe de 23,9 MW. Afin d'augmenter la pénétration des énergies renouvelables d'environ 30%. En plus de préparer un organigramme pour la gestion énergétique de la station après l'avoir équipée du système de stockage proposé, ainsi que de gérer la charge et la décharge du système ajouté.

Le premier chapitre a été consacré à la présentation générale de la centrale d'El Abiodh Sid Cheick donc un récapitulatif de tous les équipements techniques, leur installation et leurs poses ont été constatés. Nous avons étudié tout ce qui concerne le fonctionnement de la centrale et ses différents étages. La plus importante que nous avons retenue de cette présentation se récapitule dans l'architecture et la répartition de l'installation complète de la centrale photovoltaïque. Ainsi nous avons été affectés par son installation qui présente une sûreté d'alimentation de la production et évite la coupure totale de l'énergie en cas de défaillance d'un onduleur.

Le deuxième chapitre décrit les différents systèmes de stockage : leurs généralités, leurs usages, leur coût moyen, etc. Nous avons appris que le système de stockage est un élément essentiel de l'installation photovoltaïque. Cependant il prolonge la pénétration des énergies renouvelables dans l'installation et évite les fluctuations de l'énergie produite par les variations des conditions météorologiques. Nous avons conclu qu'il existe plusieurs types de stockage dans le système photovoltaïque, le plus utilisé est le stockage électrochimique, et on peut citer principalement les batteries. En fin, nous avons conclu que l'utilisation du stockage hybride est la seule solution pour prolonger la durée de vie des batteries et les garder en sécurité. Une configuration a été proposée de connecter avec les batteries des supercondensateurs pour répondre aux pics très importants de la consommation.

Dans le troisième chapitre nous avons choisi la technologie des batteries a utilisés et déterminé le nombre des batteries nécessaires pour la centrale ainsi que leurs modes de branchement. Comme nous avons aussi calculé le nombre des supercondensateurs et leur

Conclusion générale

connexion avec les batteries. Nous avons établi des organigrammes de la gestion de l'énergie de la centrale avec le dispositif de stockage hybride.

La programmation des organigrammes précédents sur Matlab, nous a permis de tracer pendant une période l'intervention des différents sous-systèmes. Par conséquent, l'analyse des courbes montre que le système de stockage hybride nous permet de réduire le temps d'intervention du réseau à 8 heures au lieu de 16 heures, donc un gain en énergie renouvelable considérable.

En fin puisque l'Algérie est dans la bonne direction en ce qui concerne les énergies renouvelables, car il est classé en troisième place après l'Afrique du Sud et l'Égypte au niveau africain dans les applications solaires. Donc, nous conseillons les chargés du programme des énergies renouvelables d'ajouter un rattachement pour les systèmes de stockage aux centrales réalisés pour bien profiter de l'énergie solaire.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

Bibliographie

- [1] Nathalie Devillers. « Caractérisation et modélisation de composants de Stockage électrochimique et électrostatique » Autre. Université de Franche-Comté, 2012. Français.
- [2] A. T. SINGO ‘ Système d’alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l’habitat énergétiquement autonome’ Thèse de doctorats, université Henri Poincaré, Nancy-I,2010
- [3] Othmane BENSEDDIK et Fathi DJALOUJ Mémoire de Master « Etude et optimisation du fonctionnement d’un système photovoltaïque » En vue de l’obtention du diplôme de master
- [4] FOGELMAN & Régis MONTLOIN, « Installations Photovoltaïques dans l’habitat isolé » livre édité par : EDISUD, 1983.
- [5] HARS et MARS : Histoire et Mémoires de l’Académie Royale des Sciences
- [6] H. BELGHITRI et H. «< Modélisation, simulation et optimisation d’un système hybride éolien-photovoltaïque>> mémoire de magister, 2009.
- [7] Ouadah Abdelkader Ghouldjebbar«<modélisation et simulation d’un système photovoltaïque raccordé au réseau>> master académique en génie électrique
- [8] C. BERNARD, C. SEBRAO, O. Bernard LAVAL, C. VAUDOUEUR ‘Gestion énergétique des panneaux photovoltaïques’ université de sfax école nationale d’ingénieurs de sfax,2008-2009.
- [9] Bouhenni Imane , Mehdi Fadhila « Dimensionnement d’un système d’une centrale solaire - Hydroélectrique pour alimenter le rectorat de l’université de Mostaganem site Kharouba »Université de Mostaganem 2019.
- [10] S. ABADA ‘ Etude et optimisation d’un générateur photovoltaïque pour la recharge d’une batterie avec un convertisseur sepic’, Mémoire Maître en Sciences, Université Laval, 2011
- [11]sonelgaz. <http://www.sonelgaz.dz/?page=article&id=34>
- [12] étude d’impact sur l’environnement de la centrale photovoltaïque d’el abiodh sidi cheikh document technique de centre national des technologie plus propre (CNTPP)
- [13] SKTM <http://www.sktm.dz/?page=article&id=11>

Références bibliographiques

- [14] B Electric <http://www.belectric.com/en/belectric/>
- [15] <https://www.google.fr/maps/@32.9443279,0.5521126,1309m/data=!3m1!1e3>
- [16] logiciel Google earth pro Windows
- [17] <https://fr.climate-data.org/location/46482/>
- [18] <http://www.sma.de/en/products/solarinverters/sunny-central-800cp-xt-850cp-xt-900cp-xt.html>
- [19] document technique de l'entreprise Belectric << offre EPC pour le lot n°4 région hauts plateaux ouest >>
- [20] Christian Matulu <<Etude et dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome pour une alimentation permanente>> mémoire master en sciences appliquées 2010 Université de Lubumbashi
- [21] revue complément technique numéro du mars/avril 2008 des éditions du moniteur
- [22] Atlas solaire Algérien CDER EISSN/ISSN 1112-3850
- [23] Philippe guibert TP énergie solaire UPMC université de la Sorbonne
- [24] Systèmes solaires, l'observateur des énergies renouvelables, Ed.Observ'ER, revue d'actualité des énergies renouvelables consultable sur le site : www.energiesrenouvelables.org.
- [25] A. Allègre, « Méthodologies de modélisation et gestion de l'énergie de systèmes de stockage mixtes pour véhicules électriques et hybrides », *Thèse de doctorat de l'Université de Lille 1*, 6 septembre 2010.
- [26] Y. Brunet, Problématiques du stockage d'énergie, Traité Electronique, Génie Electrique, Microsystèmes, Paris : Lavoisier, 2009.
- [27] S. Raël, B. Davat et F. Belhachemi, « Supercondensateurs à couche double électrique : principes de fonctionnement et comportement électrique », *Journées Électrotechniques du Club EEA, Cachan*, 21-22 mars 2002.
- [28] J. Van Mierlo, P. Van den Bossche et G. Maggetto, « Models of energy sources for EV and HEV: fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engine-generators », *Journal of Power Sources*, pp. 76-89, September 2003.
- [29] Pierre Teisseire, « Etudier un projet d'installation photovoltaïque : dimensionner un parc de batteries », guide Technique, Centre de formation de marigot, Novembre 2003, Haiti.

- [30] MADACI BOUTHAINA «Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multi systèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs» thèse de doctorat de l'Université des Frères Mentouri Constantine.
- [31] Mohamed Ansoumane Camara. « Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs. » Autre. Université Paris-Est, 2011. Français. NNT : 2011PEST1071. tel-00673218
- [32] « Devenir autonome en électricité grâce au solaire photovoltaïque »
- [33] P. Ministre « Leçons, Etats des Lieux et Perspectives pour un développement accéléré des énergies renouvelables » Commissariat aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique.
- [34] Mouhacen Dahmoun, « présentation de projet de la centrale d'EL Bayadh » Université de Mostaganem 2017
- [35] TRAORÉ, ABDOUL KARIM « gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque », 2016.
- [36] Tao Ma, Muhammad Shahzad Javed, « Energy Conversion and Management ». School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, 2019.
- [37] « Modeling of hybrid renewable energy system » M. K Deshmukha, S.S Deshmukhb 31 July 2006.
- [38] cours énergie master 1 énergie renouvelable
- [39] cours systèmes multi sources à énergies renouvelables master 2 énergie renouvelable.
- [40] Felix-Antoine LeBel « Méthode de dimensionnement et modélisation de batteries lithium-ion » Université de Sheerbrooke
- [41] « Systèmes Photovoltaïques Connectés au Réseau »
- [42] MINISTERE DE L'ENERGIE ET DES MINES « REGLES TECHNIQUES DE RACCORDEMENT AU RESEAU DE TRANSPORT DE L'ELECTRICITE ET REGLES DE CONDUITE DU SYSTEME ELECTRIQUE »
- [43] « Recommandation pour le raccordement au réseau des installations de production d'énergie »
- [44] Lila Croci « Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs. » Automatique. Université de Poitiers, 2013. Français.

