الجمهـــوريـــــة الجزائـريـــــة الديـمـقـراطيـــــة الشـعـبيـــــة
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليـم العالـــي والـبحـــث العلمـــي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA -
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة-
(Ex ESTI)

DEPARTEMENT SECOND CYCLE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE

INGENIEUR D'ETAT

FILIERE

ELECTROTECHNIQUE

SPECIALITE

PRODUCTION ELECTRIQUE ET ENERGIES RENOUVELABLES

Intitulé :

Étude et simulation d'un système photovoltaïque pour alimenter une station de dessalement d'eau de mer

Mémoire d'Ingénieur

Présenté par

BOURRICH Youcef
YOUSFI Fatima Zohra

Encadrant :	**Grade**	**Établissement d'affiliation**
MAYACHE Hichem	**MCB**	**ENSTI**
Président	**Grade**	**Établissement d'affiliation**
TIGANI Ilyes	**MCB**	**ENSTI**
Examinateurs	**Grade**	**Établissement d'affiliation**
MESSIKH Tarek	**MCB**	**ENSTI**
REKIK Badri	**MCB**	**ENSTI**

Année / 2023

Remerciements

Nous tenons tout à bord à remercier **Allah** le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donner la force, la volonté et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nos vifs remerciements à notre encadrant de Monsieur **Mayache Hichem** de nous avoir encadrés, orientés et conseillés tout au long de ce travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guide nos réflexions et ont accepté à nous rencontrer et répondre à nos questions durant nos recherches.

Nous remercions vivement les membres de jury pour l'intérêt qu'ils ont manifesté, en acceptant de juger notre humble travail, et de l'enrichir par leurs propositions. Nos remerciements également à nos enseignants qui ont contribué à notre formation pendant tout le cursus universitaire.

Enfin, nous tenons également à remercier toute la communauté de l'électrotechnique.

Dédicace Youcef

“

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL PARTICULIÈREMENT À MES CHERS PARENTS, QUI ONT CONSACRE LEUR EXISTENCE À BÂTIR LA MIENNE, POUR LEUR SOUTIEN, PATIENCE ET SOUCIS DE TENDRESSE ET D'AFFECTION POUR TOUT CE QU'ILS ONT FAIT POUR QUE JE PUISSE ARRIVER À CE STADE.

À MA MÈRE QUI M'A ENCOURAGE DURANT TOUTES MES ÉTUDES, ET QUI SANS ELLE, MA RÉUSSITE N'AURA PAS EU LIEU, QU'ELLE TROUVE ICI MON AMOUR ET MON AFFECTION.

À MON PÈRE, QUI EST TOUJOURS DISPONIBLE POUR NOUS, ET PRÊT À NOUS AIDER, JE LUI CONFIRME MON ATTACHEMENT ET MON PROFOND RESPECT.

À MES FRÈRES (FARES ET MADJED) QUI ME SONT TRÈS CHERS.

À TOUS LES MEMEBRES DE MA FAMILLE

”

- BOURRICH Youcef

Dédicace Tayma

“

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL :

À MES TRÈS CHERS PARENTS, AMMAR ET HOURIA, LA LUMIÈRE DE MA VIE, POUR TOUS LEURS SACRIFICES, LEUR AMOUR, LEUR TENDRESSE, LEUR SOUTIEN ET LEURS PRIÈRES TOUT AU LONG DE MES ÉTUDES. JE NE VOUS REMERCIERAI JAMAIS ASSEZ DE NOUS AVOIR ÉLEVÉS EN NOUS INCULQUANT DES VALEURS ET LE RESPECT.

À MON FRÈRE LARBI, AINSI QU'À MES SŒURS ZINA ET MINA, POUR LEUR SOUTIEN ET LEURS ENCOURAGEMENTS TOUT AU LONG DE MA SCOLARITÉ. VOUS ÊTES MES PILIERS, MES COMPAGNONS DE VIE. ENSEMBLE, NOUS AVONS PARTAGÉ UNE VIE PRÉCIEUSE, FAITE DE RIRES ET DE LARMES. JE SUIS RECONNAISSANTE DE VOUS AVOIR À MES CÔTÉS, TOUJOURS PRÉSENTS ET SOLIDAIRES.

À MA CHÈRE COPINE SOPHIA, TU ES BIEN PLUS QU'UNE COPINE INTIME, TU ES MON ROC, MA CONFIDENTE ET MON BONHEUR. LES MOMENTS PRÉCIEUX QUE NOUS PARTAGEONS, REMPLIS DE RIRES, DE COMPLICITÉ ET D'AMOUR INCONDITIONNEL, RESTERONT À JAMAIS GRAVÉS

DANS MON CŒUR.

À MA CHÈRE NADA, TU ES TOUJOURS LÀ, MA COMPAGNE DE CHAQUE INSTANT. TA PRÉSENCE EST UN CADEAU PRÉCIEUX QUE JE CHÉRIS CHAQUE JOUR.

À TOUTES LES PERSONNES QUI M'ONT TOUJOURS ENCOURAGÉE ET À CEUX QUI ME SOUHAITENT PLUS DE SUCCÈS, JE VOUS ADRESSE MA GRATITUDE SINCÈRE.

AVEC AMOUR

”

- YOUSFI Fatma Zohra

Résumé

Ce mémoire présente une étude et une simulation d'un système photovoltaïque pour alimenter une station de dessalement d'eau de mer. Dans ce travail, nous avons analysé les composantes du système, simulé sa performance et évalué son impact environnemental. Les résultats montrent que l'utilisation d'un système photovoltaïque est techniquement réalisable, rentable et bénéfique sur le plan environnemental. Cette recherche contribue à l'intégration des énergies renouvelables dans le dessalement de l'eau de mer.

Mots clés : système photovoltaïque, dessalement de l'eau de mer, simulation, efficacité énergétique, coûts, impact environnemental.

Abstract

This work presents a study and simulation of a photovoltaic system aimed at powering a seawater desalination plant. In this work, we analyzed the components of the system, simulated its performance, and assessed its environmental impact. The results demonstrate that the use of a photovoltaic system is technically feasible, cost-effective, and environmentally beneficial. This research contributes to the integration of renewable energy in seawater desalination.

Keywords : photovoltaic system, seawater desalination, simulation, energy efficiency, costs, environmental impact.

ملخص

تقدم هذا المذكرة دراسة ومحاكاة لنظام طاقة شمسية يهدف إلى توفير الطاقة لمحطة تحلية مياه البحر. في هذا العمل، قمنا بتحليل مكونات النظام، ومحاكاة أدائه، وتقييم تأثيره البيئي. تظهر النتائج أن استخدام نظام طاقة شمسية ممكن تقنيًا، وفعّال من الناحية التكلفة، ومفيد بيئيًا. تسهم هذه الدراسة في دمج الطاقة المتجددة في تحلية مياه البحر

كلمات مفتاحية :

نظام طاقة شمسية ، تحلية مياه البحر ، محاكاة كفاءة الطاقة ، تكاليف ، تأثير بيئي.

Liste des sigles et acronymes

Mtemp	*Millions de tonnes équivalent pétrole*
Tep	*Tonnes équivalent pétrole*
EnR	*Energies renouvelable*
RCREEE	*Centre Régional pour les Énergies Renouvelables et l'efficacité Énergétique*
PNL	*Pacific Northwest Laboratory*
PV	*Photovoltaïque*
$\mathbf{P}_{pv}$	*Puissance du module photovoltaïque*
$\mathbf{V}_{pv}$	*Tension du module photovoltaïque*
$\mathbf{I}_{pv}$	*Courant du module photovoltaïque*
PPM	*Point de puissance maximale*
PO	*Perturbation et observation*
GPV	*Générateur photovoltaïque*
PWM	*Pulse Width Modulation*
UTE	*Unité de traitement d'eau*
MPPT	*Maximum Power Point Tracking*
IGBT	*insulated-gate bipolar transistor*
f.é.m	*forces électromotrices*
$\mathbf{V}_{mp}$	*Tension qui correspond au puissance maximale*

I_{mp}	*Courant qui correspond au puissance maximale*
MW	*Méga watt*
kWh	*Kilowatt heure*
kWh/m²	*Kilowatt heure par mètre carré*
heures/an	*Heures par an*
kWh/m²/an	*Kilowatt heure par mètre carré par an*
m/s	*Mètre par seconde*
°C	*Celsius*
°C/100m	*Celsius par cent mètre*
GWh	*Gigawatt heure*
m3/hab./an	*Mètre cube par habitant par an*
K	*Kalvin*

Table des matières

Remerciements . . . . . **II**

Dédicace Youcef . . . . . **III**

Dédicace Tayma . . . . . **IV**

Résumé . . . . . **VI**

Abstract . . . . . **VII**

VIII . . . . . **ملخص**

1 . . . . . **générale Introduction**

3 . . . . . **Etat de l'art 1**

4 . . . . . Introduction I.1

4 . . . . Énergie primaire en Algérie : la tendance des combustibles fossiles I.2

5 . . . . . L'historique énergétique en Algérie I.3

6 . . . . . Combustibles fossiles et leurs conséquences I.4

6 . . . . La transition énergétique de l'Algérie vers les énergies renouvelables I.5

7 . . . . . Les énergies renouvelables I.6

7 . . . . . L'énergie solaire I.6.1

7 . . . . . L'énergie solaire photovoltaïque

8 . . . . . L'énergie solaire thermique

9 . . . . Le potentiel solaire pour les énergies renouvelables I.6.1.1

10 . . . . . L'énergie éolienne I.6.2

Potentiel éolien de l'Algérie : une ressource abondante à I.6.2.1

10 . . . . . exploiter

11 . . . . . L'énergie géothermique I.6.3

Les sources chaudes et zones à gradient élevé en Algérie : I.6.3.1

12 . . . . . un potentiel géothermique à exploiter

12 . . . . . La biomasse I.6.4

Potentiel énergétique de la forêt et des déchets en Algérie I.6.4.1

12 . . . . . (Biomasse)

13 . . . . . L'énergie hydraulique I.6.5

13 . . . . . Potentiel hydraulique de l'Algérie I.6.5.1

14 . . . . . L'eau : une ressource essentielle pour la planète et l'humanité I.7

14 . . . . . Les multiples usages de l'eau dans notre vie quotidienne I.8

Consommation d'eau et stress hydrique dans les pays développés et en développement I.9
15 . . . . . .
15 . . . . . La situation critique de la rareté d'eau en Algérie selon la FAO I.10
Répartition et mobilisation des ressources en eau en Algérie : défis et inégalités I.11
16 . . . . . régionales
17 . . La stratégie nationale de l'eau en : objectifs, mesures et projets I.11.1
18 . . . . . Le dessalement de l'eau de mer : techniques et évolutions I.12
19 . . . . . Les procèdes thermiques de distillations I.12.1
19 . . . . . La distillation multiflash I.12.1.1
20 . . . . . La distillation à multiples effets (MED) I.12.1.2
20 . . . . . La compression de vapeur (MVC) I.12.1.3
21 . . . . . Les procèdes membranaires I.12.2
21 . . . . . L'électrodialyse (ED) I.12.2.1
21 . . . . . L'osmose inverse (RO) I.12.2.2
22 . . . . . Divers types de sources d'énergie pour les usines de dessalement I.13
23 . . . . . Dessalement grâce à des énergies renouvelable I.14
23 . . . . . Distillateur solaire direct I.14.1
23 . . . . . Distillation et énergie solaire I.14.2
24 . . . . . Osmose inverse et énergie solaire (photovoltaïque) I.14.3
24 . . . . . Osmose inverse et énergie éolienne I.14.4
Les différentes techniques de dessalement : particularités techniques et choix I.15
25 . . . . . énergétiques
26 . . . . . Conclusion I.16

27 . . . . . Les composants du système de dessalement par photovoltaïque II
28 . . . . . Introduction II.1
28 . . . . . Présentation du soleil II.2
28 . . La conversion de l'énergie solaire en électricité avec l'effet photovoltaïque II.3
29 . . . . . Différents types de systèmes photovoltaïques II.4
29 . . . . . Les systèmes connectés au réseau électrique II.4.1
29 . . . . . Les systèmes hybride II.4.2
30 . . . . . Les systèmes autonomes II.4.3
31 . . . . . Le module photovoltaïque II.5
31 . . . . . Constitution II.5.1
32 . . . . . Les caractéristiques de transfert du module PV II.5.2
33 . . . . . Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque II.5.3
Définition et modélisation du courant de court-circuit d'un II.5.3.1
33 . . . . . module PV
34 . . . . . La tension de circuit-ouvert V_{co} II.5.3.2
34 . . . . . Le facteur de forme II.5.3.3
34 . . . . . Le modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque II.6
Impact des paramètres météorologiques et électriques sur les performances II.7
36 . . . . . d'un module PV
36 . . . . . Influence de l'ensoleillement II.7.1
37 . . . . . Influence de la température II.7.2
37 . . . . . Influence de la résistance série II.7.3

38 . . . . . Influence de la résistance parallèle II.7.4
38 . Effet de l'ombrage partiel sur le fonctionnement du module PV II.7.5
39 . . . . . Les protections électriques des installations photovoltaïques II.8
40 . . . . . La puissance de sortie d'un module PV II.9
41 . . . . . Techniques MPPT pour les applications photovoltaïques II.10
41 . . . . . Premiers types de commande MPPT II.10.1
42 . . . . . Algorithme de Perturbation et Observation II.10.2
44 . . . . . Interface d'électronique de puissance pour PV II.11
44 . . . . . Connexion GPV-charge II.11.1
44 . . . . . Connexion directe II.11.1.1
46 . . . . . Connexion via un étage d'adaptation II.11.1.2
46 . . . . . Constitution d'un système photovoltaïque II.11.2
46 . . . . . Convertisseur DC/DC II.11.2.1
47 . . . . . Convertisseur abaisseur (Buck)
47 . . . . . Convertisseur élévateur (Boost)
48 . . . . . Convertisseur élévateur - abaisseur (Buck-Boost)
48 . . . . . Récapitulatif d'analyse et choix du convertisseur
49 . . . . . Onduleur PV II.11.2.2
50 . . . . . Onduleurs triphasés II.11.2.3
50 . . . Onduleurs en pont triphasé avec convertisseur Boost
50 . . . . . La machine asynchrone II.12
51 . . . . . Composants du moteur asynchrone II.12.1
51 . . . . . Stator II.12.1.1
51 . . . . . Rotor II.12.1.2
52 . . . . . Principes de fonctionnement II.12.2
52 . . . . . Glissement II.12.2.1
52 . . . . . Fréquences rotoriques II.12.2.2
53 . . . . . La pompe II.13
54 . . . . . Pompe centrifuge dans le système de dessalement (RO) II.13.1
54 . . . . . Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge II.13.2
55 . . . . . Sous système moteur-pompe II.13.3
56 . . . . . Conclusion II.14

57 . . . . . Fonctionnement et dimensionnement de la station renouvelable III
58 . . . . . Introduction III.1
58 . . . . . Description de l'installation du site UTE Desaladora de Skikda III.2
60 . . . . . L'osmose inverse alimentée par énergie solaire (PV-RO) III.3
60 . . . . . Présentation du central d'Oued el Kebrit III.4
Approche d'alimentation photovoltaïque pour un module de dessalement III.5
61 à la station de Skikda, alimentée par une centrale photovoltaïque externe
61 . . . . . Hypothèses de travail III.5.1
62 . . . . . Description du système proposé III.5.2
62 . . . . . Paramètres du système proposé III.5.3
62 . . . . . Système photovoltaïque
63 . . . . . Système de pompage
63 . . . . . Unité d'osmose inverse

64 . . . . . Membranes d'osmose inverse :
64 . . . . . Fonctionnement de la station renouvelable proposé III.6
66 . . . . . Dimensionnement d'une installation photovoltaïque III.7
66 . . . . . Paramètres d'entrée pour le dimensionnement III.7.1
66 . . . . . Présentation du site d'étude III.7.2
68 . . . . . Application numérique III.8
Caractéristique P-V du module PV sous les conditions moyennes III.8.1
68 . . . . . d'Annaba
69 . . . . . Les parametres d'un sous champs de Oued Kebrit III.8.2
Les parametres d'un sous champs de Oued kebrit avec les conditions III.8.3
73 . . . . . Moyenne de la région d'Annaba
76 . . . Le besoin énergétique de la station de déssalement proposé III.8.4
76 . . . . . Application numérique III.8.4.1
76 . . . . . Nombre total des panneaux III.8.4.2
77 . . . . . Surface occupée par les sous-champs III.8.4.3
77 . . . . . Raccordement des 5 sous-champs III.8.4.4
77 . . . . . Simulations des 5 sous-champs III.8.4.5
80 . . . . . Les conditions climatique annuelles la région d'Annaba III.8.5
85 . . . . . Conclusion III.9

86 . . . . . Modélisation et commande vectorielle de moteur asynchrone IV
87 . . . . . Introduction IV.1
87 . . . . . Modèle transitoire de la machine asynchrone IV.2
87 . . . . . Hypothèses de travail IV.3
88 . . . . . Les équations de la machine asynchrone en régime quelconque IV.4
89 . . . . . Équation mécanique
89 . . . . . Modèle de Park de la machine asynchrone triphasée IV.5
90 . . . . . Choix du repère dq IV.5.1
91 . . . . . Equations des tensions
91 . . . . . Équations des flux
91 . . . . . Expression du couple électromagnétique
92Modélisation et simulation du MAS sous l'environnement Matlab Simulink IV.6
92 . . . . . Transformation de Park
92 . . . . . Les équations des flux :
92 . . . . . Les équations des tensions
93 . . . . . Les équations électromécaniques et mécaniques :
93 . . . . . Transformation de Park inverse :
94 . . . . . Simulation avec un couple résistant nul IV.6.1
94 . . . . La vitesse du moteur asynchrone lors du démarrage
95 . . . . . Courant de démarrage
95 Simulation avec un couple résistant non nul (Cr=5 N.m a t=3 sec) IV.6.2
96 . . . . . Vitesse du moteur
96 . . . . . Courant d'alimentation
97 . . . . . Commande de la machine asynchrone IV.7
Modélisation de la commande vectorielle commandé en tension sous l'environnement IV.8
100 . . . . . Matlab Simulink

100 . . . . . Découplage électromagnétique
100 . . . . . Découplage par retour d'état
101 . . . . . Onduleur :
102 . . . . . Moteur asynchrone :
102 . . . . . Simulation numérique IV.9
102 . . . . . Présentation des résultants de simulation IV.9.1
102 . . . . . Simulation avec variation par couple résistance IV.9.2
102 . . . . . La vitesse
103 . . . . . Le couple
103 . . . . . Les flux :
104 . . . . . Le courant I_{qs} :
104 . . . . . Le courant I_{ds} :
105 . . . . . Simulations avec variation de vitesse de consigne IV.9.3
105 . . . . . Vitesse :
106 . . . . . Les flux :
106 . . . . . Le courant I_{qs} :
107 . . . . . Le courant I_{ds} :
108 . . . . . ConclusionIV.10

109 . . . . . Générale Conclusion

112 . . . . . Bibliographie

Table des figures

I.1 photovoltaïques solaire panneaux [3]. 8
I.2 thermique solaire Panneaux [4]. 8
I.3 Répartition de l'énergie solaire en Algérie [6]. 9
I.4 éloienne des Parc [7]. 10
I.5 le potentiel des vents en Algérie par région [8]. 11
I.6 thermique Centrale [9]. 11
I.7 Les déchets du bois [11]. 12
I.8 hydraulique Centrale [12]. 13
I.9 Ressources, usages et interdépendance des eaux [14]. 15
I.10 Carte mondiale illustrant l'eau de disponibilité [17]. 16
I.11 Bassins hydrographiques en Algérie [17]. 16
I.12 Schéma expliquant le processus de l'eau de dessalement [18]. 18
I.13 Les procédés différents de l'eau de dessalement [19]. 19
I.14 Distillateur par successives détentes [18]. 20
I.15 Distillation à effets multiples (MED) [18]. 20
I.16 Compression mécanique de vapeur [18]. 21
I.17 Le processus de l'osmose inverse [20]. 22
I.18 Distillateur direct solaire [19]. 23
I.19 Distillateur associé à des capteurs solaire [19]. 24

II.1 Conversion photovoltaïque [23]. 28
II.2 Système photovoltaïque au réseau connecté [22]. 29
II.3 Configuration du système à hybride bus continu [22]. 30
II.4 Les systèmes photovoltaïques autonomes de types différents [22]. 30
II.5 Caractéristiques résultantes d'un regroupement en série de cellules n_s [22]. 31
II.6 Caractéristiques résultantes d'un regroupement en parallèle de cellules n_p [22]. 32
II.7 Caractéristiques du module PV d'un P-V et I-V : [24] 33
II.8 Modelé électrique équivalent à une diode de la cellule photovoltaïque [22]. 35
II.9 Modelé électrique équivalent simplifier de la cellule photovoltaïque [22]. 35
II.10 Caractéristiques du module PV d'un P-V et I-V pour ensoleillements différents
II.11 Caractéristiques du module PV d'un P-V et I-V à température constante à [24]. 36
II.12 Caractéristiques du module PV d'un P-V et I-V à différentes températures [24]. 37
II.13 Evolution de la fonction caractéristiques du module PV d'un P-V et I-V en [24]. 38

39 . . . . . [25] cellule la sur l'ombrage de Incidence II.14
activation et protection, de diodes avec photovoltaïque panneau d'un Architecture II.15
40 . . . . . [22] cellule d'une défaillance la de lors by-pass diode la de
42 . . . . . [27] MPPT commande première la de Organigramme II.16
43 . . . . . [28] PO méthode la de fonctionnement de Caractéristique II.17
44 . . . . . [28PO[méthode la de Organigramme II.18
45 . . . . . [29] GPV-Charge directe Connexion II.19
connexion en charge la de fonction en GPV d'un fonctionnement de Points II.20
45 . . . . . [29] directe
46 . . . [30] d'adaptation étage un travers à charge une à GPV d'un Connexion II.21
47 . . . . . [31] DC/DC hacheur d'un Symbole II.22
47 . . . . . [32] abaisseur(buck) Hacheur de électrique Circuit II.23
48 . . . . . [33] (Boost) élévateur Hacheur de électrique Circuit II.24
48 . . . . . [34] Buck-Boost convertisseur du équivalent Circuit II.25
49 . . . . . [35] PV onduleurs des Topologie II.26
50 . . . . . [36HB[pont à Boost convertisseur d'un doté triphasé Onduleur II.27
51 . . . . . [37] asynchrone Machine d'une stator de Exemple II.28
51 . . . . . [37] asynchrone Machine d'une rotor de Exemple II.29
52 . . . . . [37] asynchrone machine d'une fonctionnement de Principe II.30
la à tournent asynchrone machine d'une statoriques et rotoriques champs Les II.31
53 . . . . . [37] vitesse même
54 . . . . . [38] centrifuge pompe d'une Constitution II.32
55 . . . . . [38] centrifuge Pompe II.33

59 . . . . . .[39] Skikda de dessalement de station la de Schéma III.1
60 . . . . . .[39] inverse d'osmose unité d'une Schéma III.2
60 . . . . . .[39] solaires panneaux des par actionné d'OI système d'un Schéma III.3
63 . . . . . autonome photovoltaïque installation d'une Synoptique III.4
67 . . . . . [42] Annaba région l'Ensoleillement de variation La III.5
région la de moyenne conditions les dans P-V courbe la de Caractéristique III.6
69 . . . . . d'Annaba
temps du fonction en sous-champs seul d'un MPPT puissance la de Variation III.7
70 . . . . . STC. conditions les dans
temps du fonction en sous-champs seul d'un MPPT tension la de Variation III.8
70 . . . . . STC. conditions les dans
dans temps du fonction en sous-champs seul d'un MPPT courant du Variation III.9
71 . . . . . STC. conditions les
en sous-champs seul d'un hacheur du sortie de puissance la de VariationIII.10
71 . . . . . STC. conditions les dans temps du fonction
fonction en sous-champs seul d'un hacheur du sortie de tension la de VariationIII.11
72 . . . . . STC. conditions les dans temps du
fonction en sous-champs seul d'un hacheur du sortie de courant du VariationIII.12
72 . . . . . STC. conditions les dans temps du
temps du fonction en sous-champs seul d'un MPPT puissance la de VariationIII.13
73 . . . . 19,35°C) ,m^2W/ 603,29) d'Annaba région la de conditions les dans

temps du fonction en sous-champs seul d'un MPPT Tension la de VariationIII.14
74 . . . . 19,35°C) ,m^2W/ 603,29) d'Annaba région la de conditions les dans
temps du fonction en sous-champs seul d'un MPPT courant du VariationIII.15
74 . . . 19,35°C) ,m^2W/ (603,29 d'Annaba région la de conditions les dans
sous-champs seul d'un hacheur du sortie de puissance la de VariationIII.16
(603,29 d'Annaba région la de conditions les dans temps du fonction en
75 . . . . . 19,35°C) ,m^2W/
en sous-champs seul d'un hacheur du sortie de tension la de VariationIII.17
(603,29 d'Annaba région la de conditions les dans temps du fonction
75 . . . . . 19,35°C). ,m^2W/
en sous-champs seul d'un hacheur du sortie de courant du VariationIII.18
(603,29 d'Annaba région la de conditions les dans temps du fonction
76 . . . . . 19,35°C). ,m^2W/
temps du fonction en sous-champs 5 des MPPT puissance la de VariationIII.19
77 . . . . . 19,35°C) (603,29, d'Annaba région la de conditions les dans
temps du fonction en sous-champs 5 des MPPT Tension la de VariationIII.20
78 . . . . . 19,35°C) (603,29, d'Annaba région la de conditions les dans
temps du fonction en sous-champs 5 des MPPT courant du VariationIII.21
78 . . . . . 19,35°C) (603,29, d'Annaba région la de conditions les dans
en sous-champs 5 des hacheur du sortie de puissance la de VariationIII.22
79 . . . . . d'Annaba. région la de conditions les dans temps du fonction
fonction en sous-champs 5 des hacheur du sortie de tension la de VariationIII.23
79 . . . . . d'Annaba. région la de conditions les dans temps du
fonction en sous-champs 5 des hacheur du sortie de courant du VariationIII.24
79 . . . . . d'Annaba. région la de conditions les dans temps du
80 d'Annaba. région la pour l'année toute de l'irradiation représente SignalIII.25
80d'Annaba. région la pour l'année toute de température la représente SignalIII.26
mois 12 les pendant sous-champs 5 des MPPT puissance la de VariationIII.27
81 . . . . d'Annaba région la de conditions les dans temps du fonction en
en mois 12 les pendant sous-champs 5 des MPPT tension de VariationIII.28
81 . . . . . d'Annaba région la de conditions les dans temps du fonction
en mois 12 les pendant sous-champs 5 des MPPT courant du VariationIII.29
82 . . . . . d'Annaba région la de conditions les dans temps du fonction
sous-champs 5 des hacheur du sortie la de puissance la de VariationIII.30
région la de conditions les dans temps du fonction en mois 12 les pendant
82 . . . . . d'Annaba.
pendant sous-champs 5 des hacheur du sortie la de tension la de VariationIII.31
d'Annaba. région la de conditions les dans temps du fonction en mois 12 les
83 . . . . . .
pendant sous-champs 5 des hacheur du sortie la de courant du VariationIII.32
d'Annaba. région la de conditions les dans temps du fonction en mois 12 les
83 . . . . . .

l'éspace dans rotoriques et statoriques phases trois des représentation La IV.1
88 . . . . .].43[
90 . . . . .]44[MAS la de Park de transformation la de Représentation IV.2

92 . . . . . Matlab sur park de Transformation IV.3
92 . . . . . flux des équations Les IV.4
93 . . . . . tensions des équations Les IV.5
93 . . . . . mécaniques et électromécaniques équations Les IV.6
94 . . . . . inverse Park de Transformation IV.7
95 . . . . . démarrage de lors asynchrone moteur de vitesse la de Variation IV.8
95 . . . . . asynchrone moteur du démarrage du courant du Variation IV.9
un avec démarrage du lors asynchrone moteur du vitesse la de VariationIV.10
96 . . . . . résistant couple
96 . résistant couple un avec asynchrone moteur du démarrage de CourantIV.11
98 . . . . . flux de l'orientation de choix LeIV.12
100 . . tension en commandé vectorielle commande la de synoptique SchémaIV.13
100 . . . . . électromagnétique DécouplageIV.14
101 . . . . . d'état retour par DécouplageIV.15
101 . . . . . vitesse de CalculIV.16
101 . . . . . d'onduleur commande LaIV.17
102 . . . tension en commandé vectorielle commande la de complet SchémaIV.18
103 . . . . . référence de vitesse la et réelle vitesse LaIV.19
103 . . . . . temps de fonction en couple de VariationIV.20
104 . . . . . résistant couple du changement du lors flux des VariationIV.21
104 . . . . . résistant couple du changement du lors I_{qs} courant du VariationIV.22
105 . . . . . résistant couple du changement du lors I_{ds} courant du VariationIV.23
105 . . . . référence de vitesse la à rapport par réelle vitesse la de VariationIV.24
106 . . . . . vitesse de changement du lors couple du VariationIV.25
106 . . . . . vitesse de changement du lors flux du VariationIV.26
107 . . . . . vitesse de changement du lors I_{qs} courant du VariationIV.27
107 . . . . . vitesse de changement du lors I_{ds} courant du VariationIV.28

Liste des tableaux

I.1 Consommation brute intérieure Energie d'en primaire par Algérie source (Mtep) [1] 5
I.2 Production d'énergie en primaire par Algérie source [1''Mtep''[. 6
I.3 Potentiel solaire en Algérie [5]. 9
I.4 Régions hydrographiques en Algérie [17] 17
I.5 Unité de dessalement solaire Osmose¨ et inverse de Village photovoltaïque¨ (village Tunisie en Ghilene Ksar de 300 habitants situé dans le nord de la Tunisie) [19] 24
I.6 Tableau de comparaison de procédés [19] 25

II.1 Principe de l'algorithme PO [28]. 43

III.1 Caractéristique de la pompe (BP) 63
III.2 Caractéristique de la pompe (HP) 63
III.3 Caractéristique de la pompe booster 64
III.4 Caractéristique de la pompe de nettoyage 64
III.5 La moyenne des 5 années d'éclairement et de température de la région d'Annaba pendant 12 mois 67
III.6 La puissance récupérée par chaque panneau pendant les 12 mois dans les conditions climatiques de la région d'annaba 68

Introduction générale

De nos jours, l'accès à une eau potable et propre constitue une préoccupation majeure à l'échelle mondiale et l'Algérie ne fait pas exception. Malgré les progrès réalisés dans de nombreux pays, des millions de personnes continuent de souffrir de pénuries d'eau et de conséquences sanitaires dévastatrices. Les facteurs tels que la croissance démographique, l'urbanisation rapide, les changements climatiques et la dégradation de l'environnement ont exacerbé cette situation. Dans de nombreuses régions, les ressources en eau douce sont limitées, ce qui rend le dessalement de l'eau de mer une solution de plus en plus attrayante. Cependant, l'alimentation en énergie de ces stations de dessalement représente un défi majeur. C'est dans ce contexte que l'étude et la simulation d'un système photovoltaïque pour alimenter une station de dessalement d'eau de mer prennent tout leur sens, offrant une alternative durable, écologique et respectueuse de l'environnement pour répondre aux besoins en eau potable de manière efficace et fiable.

Ce mémoire d'ingénieur se concentre sur l'étude et la simulation d'un système photovoltaïque appliqué à une station de dessalement d'eau de mer. L'objectif principal est de démontrer la faisabilité technique et l'efficacité d'un tel système pour répondre aux besoins en eau potable dans une zone côtière telle que la région de Annaba.

La première partie de ce mémoire présentera une revue de la littérature sur les systèmes photovoltaïques ainsi que les technologies de dessalement d'eau de mer existantes, en mettant l'accent sur les techniques les plus couramment utilisées et leurs avantages et inconvénients respectifs. Ceci permettra de comprendre les enjeux et les défis liés à l'association du dessalement de l'eau de mer par les systèmes photovoltaïques.

Ensuite, une étude approfondie des systèmes photovoltaïques sera menée. Cela inclura l'analyse des composants clés. Les modèles mathématiques qui seront utilisés pour simuler le fonctionnement des systèmes photovoltaïques et de dessalement seront aussi présentés en détail. Par la suite, les résultats des simulations seront analysés et discutés. L'accent sera mis sur l'efficacité énergétique, la fiabilité du système et sa capacité à répondre à la demande en eau potable de manière continue. Des recommandations seront formulées pour optimiser la conception et les paramètres du système afin d'obtenir des performances maximales.

En conclusion, ce mémoire fournira une évaluation détaillée de l'application des systèmes photovoltaïques pour alimenter les stations de dessalement d'eau de mer. Les résultats obtenus contribueront à une meilleure compréhension des avantages, des limitations et des possibilités d'intégration de cette solution dans la région de Annaba. L'objectif ultime est de promouvoir une approche durable et économiquement viable pour l'accès à l'eau potable, en exploitant les ressources solaires abondantes dont dispose globalement notre pays et spécialement notre région.

Chapitre 1

Etat de l'art

I.1 Introduction

L'énergie électrique joue un rôle crucial dans la société moderne. Depuis l'avènement de la révolution industrielle, elle est devenue le moteur de notre développement économique, social et technologique. De nos jours, les besoins en énergie électrique sont plus importants que jamais, et cette demande ne cesse de croître à mesure que notre monde devient de plus en plus connecté et dépendant des technologies. L'augmentation des besoins en énergie électrique n'est que la conséquence de la croissance démographique, ce qui entraîne une demande plus élevée en électricité pour répondre aux besoins quotidiens des individus, des foyers, des entreprises et des infrastructures publiques.

De plus, l'évolution des modes de vie et des habitudes de consommation telles que : les appareils et équipements électriques, chauffage, climatisation, éclairage, appareils électroménagers, dispositifs électroniques ou transport, contribuent également à cette hausse des besoins en énergie électrique. De par son potentiel et ses ressources naturelles, **l'Algérie** a une forte dépendance aux énergies fossiles, principalement le pétrole et le gaz, pour produire de l'électricité. Cependant, cette dépendance est vulnérable aux fluctuations des prix du pétrole sur le marché international, ce qui a un impact important sur l'économie algérienne et sur sa capacité à répondre aux besoins croissants en électricité. De plus, la production d'électricité à partir de sources fossiles à des conséquences néfastes sur l'environnement, notamment en termes d'émissions de gaz à effet de serre.

En outre, l'Algérie est confrontée à une pénurie d'eau majeure, surtout dans les régions arides et semi-arides, exacerbée par les effets du changement climatique qui entraînent une diminution des précipitations et une augmentation des températures. Par conséquent, la production d'eau potable à partir de sources alternatives est une priorité pour le pays. Dans ce contexte, les énergies renouvelables apparaissent comme une solution durable et respectueuse de l'environnement pour répondre aux besoins croissants en énergie et en eau. Cependant, le potentiel des énergies renouvelables en **Algérie** reste sous-exploité, alors que le pays dispose d'un énorme potentiel en énergie solaire et éolienne.

L'objectif de ce chapitre est d'analyser la situation énergétique en **Algérie**, en mettant en évidence la préférence du pays pour les combustibles fossiles au détriment des énergies renouvelables. Nous examinerons également la transition énergétique de **l'Algérie** vers les énergies renouvelables et le potentiel de ces dernières dans le pays. Enfin, nous aborderons la question de l'eau en **Algérie** et les solutions innovantes pour produire de l'eau potable à partir de sources alternatives.

I.2 Énergie primaire en Algérie : la tendance des combustibles fossiles

En 2017, la consommation totale d'énergie primaire était de 55,48 millions de tonnes équivalent pétrole **(Mtep)**, soit **1,34 tep par habitant 28%** en dessous de la moyenne mondiale de **1,86 tep**, mais 2 fois plus élevée que la moyenne africaine. Le tableau ci-dessous nous présente la consommation intérieure brute d'énergie primaire en **Algérie**, avec une distinction des priorités tendancielles vers certaines sources d'énergie. On

constate une tendance marquée vers les combustibles fossiles, avec une évolution significative au cours de la période étudiée (voir les différents taux de variation). Malgré des taux de variation importants pour les énergies renouvelables, leur consommation demeure faible par rapport aux combustibles fossiles. voir le tableau **Tab. I.1** [1] .

Source	1990	%	2000	%	2010	%	2017	2017	Var. 2017 /1990
Charbon	0.63	3.1	0.52	1.9	0.34	0.9	0.22	0.3 %	-68 %
Pétrole	9.32	42.0	9.59	35.5	16.39	40.9	19.36	34.9 %	+108 %
Gaz Naturel	12.17	54.9	16.84	62.4	23.32	58.1	35.90	64.7 %	+195 %
Total fossiles	22.17	99.9	26.95	99.8	40.05	99.8	55.48	99.94 %	+150 %
Hydraulique	0.012	0.05	0.005	0.02	0.015	0.04	0.005	0.01%	-58 %
Biomasse -déchets	0.011	0.05	0.054	0.20	0.052	0.13	0.010	0.02%	-9 %
Solaire -éolien							0.05	0.09 %	NS
Total EnR	0.023	0.10	0.059	0.22	0.67	0.17	0.065	0.12 %	+183 %
Solde Exp.électricité	0.008	0.04	0.008	0.03	0.007	0.01	-0.03	-0.05 %	+260 %
Total	22.19	100	27.00	100	40.11	100	55.52	100 %	+150 %

Tab. I.1 : Consommation intérieure brute d'Energie primaire en Algérie par source (Mtep) [1]

I.3 L'historique énergétique en Algérie

Le deuxième tableau nous permet d'observer la politique économique algérienne dans le domaine de l'énergie voir le tableau **Tab. I.2** Les données montrent une évolution de la production des combustibles fossiles de 1990 à 2017, avec une tendance pour les énergies fossiles en raison du potentiel naturel.

Source	1990	%	2000	%	2010	%	2017	2017 %	Var. 2017 /1990
Pétrole	61.24	61.2	72.32	50.8	78.50	52.1	70.95	46.4 %	+16%
Gaz Naturel	38.84	38.8	69.85	49.1	71.96	47.8	81.83	53.5 %	+111 %
Total fossiles	100.08	99.98	142.16	99.96	150.46	99.96	152.79	99.96 %	+53 %
Hydraulique	0.012	0.01	0.005	0.004	0.015	0.01	0.005	0.003 %	-58 %
Solaire -éolien							0.05	0.03 %	NS
Biomasse Déchets	0.011	0.01	0.054	0.04	0.052	0.03	0.010	0.007 %	-9 %
Total EnR	0.023	0.02	0.059	0.04	0.067	0.04	0.065	0.04 %	+183 %
Total	100.11	100	144.22	100	150.52	100	152.85	100 %	+53 %

Tab. I.2 : Production d'énergie primaire en Algérie par source ''Mtep''[1]

I.4 Combustibles fossiles et leurs conséquences

Durant les dernières décennies, l'utilisation du pétrole a entraîné une augmentation du CO2 dans l'atmosphère accélérée par l'industrialisation de nombreux pays. Les combustibles fossiles posent des problèmes majeurs, notamment le rejet de CO2 et l'épuisement des ressources. Le réchauffement climatique est principalement causé par la concentration de gaz tels que le CO2 dans l'atmosphère, causée par les activités humaines. Bien que l'effet de serre soit naturellement présent, l'aggravation de cet effet est responsable des changements climatiques actuels. La concentration de gaz à effet de serre et la température devraient continuer à augmenter dans les années à venir.[2]

I.5 La transition énergétique de l'Algérie vers les énergies renouvelables

L'Algérie a pris l'engagement de se tourner vers une ère énergétique durable pour résoudre les défis environnementaux en lançant un programme de développement des énergies renouvelables. Ce plan a été adopté par le gouvernement **en février 2011**, révisé **en mai 2015** et promu au rang de priorité nationale **en février 2016**. L'objectif est d'installer une capacité de production d'énergie renouvelable de **22 000 MW** d'ici **2030** pour le marché national, avec la possibilité d'exportation si les conditions du marché le permettent. Ce programme permettra de réduire les émissions de CO2 de **193 millions de tonnes**. Pour faciliter et promouvoir l'adoption des pratiques d'énergie renouvelable

et d'efficacité énergétique dans le monde arabe, **l'Algérie** et neuf autres pays arabes ont créé le Centre Régional pour les Énergies Renouvelables et l'efficacité Énergétique **(RCREEE) en juin 2008** en vertu de la Déclaration du **Caire**. Le RCREEE est devenu une organisation internationale indépendante à but non lucratif **en août 2010** après la conclusion d'un accord de siège avec le gouvernement égyptien.

I.6 Les énergies renouvelables

Les sources d'énergie renouvelables peuvent être consommées sans affecter leur disponibilité future, tandis que les combustibles fossiles et nucléaires sont non-renouvelables. Depuis les années 70, les risques économiques et géopolitiques liés aux énergies fossiles ont été mis en évidence et l'extension des réseaux électriques est souvent coûteuse ou impossible dans les régions isolées. Les énergies renouvelables offrent une alternative car elles ont moins d'impact sur l'environnement, sont inépuisables, permettent une production décentralisée et offrent une indépendance énergétique. [2]
Il existe plusieurs types de ressources renouvelables :

- L'énergie solaire
- L'énergie éolienne
- La géothermie
- La biomasse
- L'énergie hydraulique

I.6.1 L'énergie solaire

La conversion de l'énergie solaire en électricité ou en chaleur peut être réalisée grâce à des panneaux ou des capteurs solaires. Le soleil est la principale source des différentes formes d'énergies renouvelables disponibles sur terre.
Il y a deux types :

L'énergie solaire photovoltaïque L'énergie solaire photovoltaïque transforme directement le rayonnement lumineux en électricité en utilisant des modules photovoltaïques contenant des cellules solaires ou des photopiles pour effectuer cette conversion d'énergie.

Fig. I.1 : panneaux solaire photovoltaïques [3].

L'énergie solaire thermique Elle diffère de l'énergie solaire photovoltaïque car elle génère de la chaleur en captant le rayonnement solaire infrarouge pour chauffer l'eau ou l'air. Les capteurs thermiques sont utilisés dans ce processus qui utilisent une technologie différente. Ils sont couramment appelés « chauffe-eau solaires » ou « capteurs à air chaud » dans la vie quotidienne.[2]

Fig. I.2 : Panneaux solaire thermique [4].

I.6.1.1 Le potentiel solaire pour les énergies renouvelables

Grâce à sa localisation géographique, **l'Algérie** bénéficie d'un ensoleillement parmi les plus élevés au monde. La durée d'ensoleillement dépasse les **2000 heures** par an sur la quasi-totalité du territoire national et peut atteindre jusqu'à **3900 heures** dans les hauts plateaux et le Sahara. Chaque jour, une surface horizontale d'$1m^2$ reçoit environ **5 kWh d'énergie solaire**, ce qui équivaut à une moyenne annuelle d'environ**1700 kWh/m^2** au nord du pays et de **2263 kWh/m^2** au sud. Voir le tableau **Tab. I.3**

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie %	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m^2/an)	1700	1900	2650

Tab. I.3 : Potentiel solaire en Algérie [5].

La répartition de l'énergie reçue en **Algérie** sur une moyenne annuelle est illustrée dans le schéma ci-dessous. Ce schéma met en évidence les différents niveaux d'énergie, ce qui permet de diviser le pays en régions présentant des niveaux d'énergie similaires.

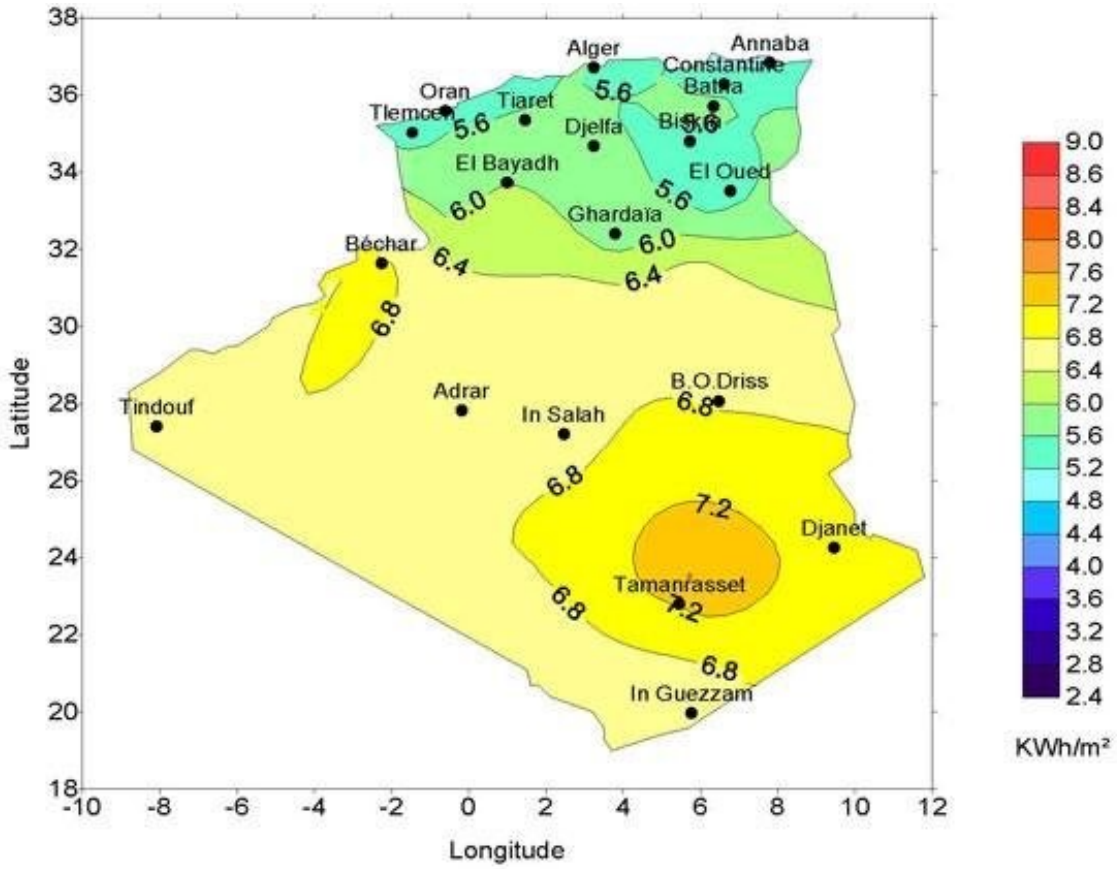

Fig. I.3 : Répartition de l'énergie solaire en Algérie [6].

I.6.2 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est obtenue à partir du vent en utilisant des dispositifs aérogénérateurs tels que des éoliennes ou des moulins à vent. Cette énergie tire son nom d'Éole, le dieu grec des vents. [2]

Fig. I.4 : Parc des éloienne [7].

I.6.2.1 Potentiel éolien de l'Algérie : une ressource abondante à exploiter

En **Algérie**, la carte des vents peut être classée en différentes zones selon la méthode de classification **"Pacific Northwest Laboratory" (PNL)** :

- **Adrar et Hassi-R'Mel**, avec des vitesses moyennes annuelles respectives de **6,37 m/s et 6,11 m/s** sont classés dans la classe 5 caractérisée par un bon potentiel éolien.
- **Tindouf**, avec une vitesse moyenne annuelle de **5,67 m/s** est répertorié dans la classe 4 adaptée aux applications éoliennes.
- **In-Salah**, avec une vitesse moyenne annuelle de **5,13 m/s** est classé dans la classe 3 pouvant être utilisé pour des applications éoliennes mais nécessitant des mâts de grande hauteur.
- **Mechria, Bordj-Badji-Mokhtar, Timimoun, Djelfa, In-Amenas, Biskra**, le Port **d'Oran et Arzew** , quant à eux, sont inclus dans la classe 2 considérée comme ayant un potentiel éolien marginal.
- Le reste des sites est classé dans la classe 1.[8]

Ces classifications sont basées sur les vitesses moyennes annuelles du vent et servent à évaluer le potentiel éolien des différentes régions en **Algérie.**

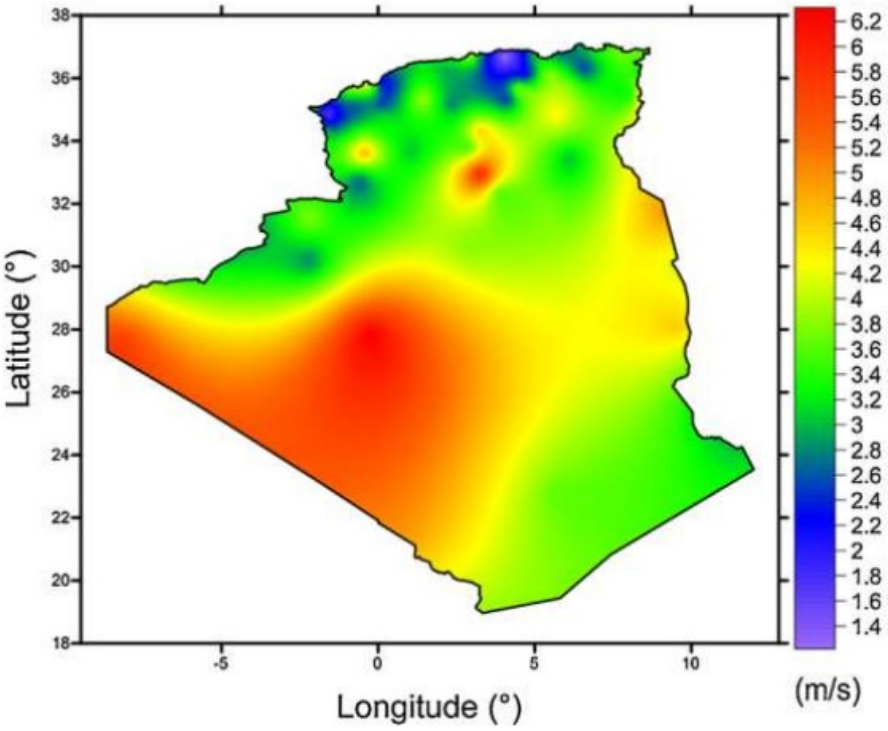

Fig. I.5 : le potentiel des vents en Algérie par région [8].

I.6.3 L'énergie géothermique

Le fonctionnement de la géothermie repose sur l'extraction de l'énergie géothermique stockée dans le sol. Cette source d'énergie provient principalement de la chaleur générée par la radioactivité naturelle des roches composant la croûte terrestre. [2]

Fig. I.6 : Centrale thermique [9].

I.6.3.1 Les sources chaudes et zones à gradient élevé en Algérie : un potentiel géothermique à exploiter

Les données géologiques ont révélé la présence de plus de **200 sources** chaudes dans la partie nord de **l'Algérie**. Environ un tiers d'entre elles ont des températures supérieures à '**45°C**, avec des températures atteignant jusqu'à **118°C à Biskra**. Des études ont également identifié trois zones avec un gradient thermique dépassant les **5°C/100m** : la zone de **Relizane et Mascara**, la zone **d'Aïne Boucif et Sidi Aïssa** et la zone de **Guelma et Djebel El Onk**. [10]

I.6.4 La biomasse

L'énergie biomasse est produite grâce à la photosynthèse qui stocke l'énergie sous forme organique et est récupérée par combustion du bois ou d'autres biocarburants. Si les quantités brûlées ne dépassent pas les quantités produites, elle est considérée comme une source d'énergie renouvelable.[2]

Fig. I.7 : Les déchets du bois [11].

I.6.4.1 Potentiel énergétique de la forêt et des déchets en Algérie (Biomasse)

Le potentiel énergétique de la forêt en **Algérie** est estimé à environ **37 millions de tonnes** équivalent pétrole **(TPE)**. Sur ce potentiel, il est possible de récupérer environ **3,7 millions de TEP**, mais le taux de récupération actuel n'est que d'environ **10%**. En ce qui concerne les déchets ménagers, le potentiel national est d'environ **5 millions** de

tonnes de déchets urbains et agricoles qui ne sont pas recyclés, représentant un gisement d'énergie d'environ **1,33 million de TEP** par an. [10]

I.6.5 L'énergie hydraulique

L'énergie hydroélectrique est produite à partir d'un cours d'eau ou d'une retenue d'eau. Elle exploite la force potentielle créée par la différence de hauteur entre deux points d'eau en mouvement. L'énergie hydraulique est convertie en électricité grâce à une turbine qui fait tourner un alternateur. La puissance de la centrale dépend en grande partie du débit d'eau. [2]

Fig. I.8 : Centrale hydraulique [12].

I.6.5.1 Potentiel hydraulique de l'Algérie

L'Algérie dispose d'une côte de **1200 kilomètres** et de plusieurs barrages sur son territoire, mais ces sources d'énergie ne sont pas correctement exploitées pour la production d'électricité. En **2014**, le gouvernement a décidé de fermer les centrales hydroélectriques du pays, comme le Barrage **d'Ighil Emda à Kherrata** et celui **d'Erraguen à Jijel**, afin de les consacrer à l'irrigation et à l'alimentation en eau potable. Cette décision a été motivée par le fait que la production hydroélectrique était insignifiante et ne contribuait que très peu au bilan énergétique de **l'Algérie**. Selon une source, la filière hydraulique ne représentait que **389,4 GWh des 28 950 GWh** produits par SPE, la filiale de production d'électricité de **Sonelgaz**, alors que la majeure partie de la production électrique **(28 560 GWh)** était assurée par le gaz.

En résumé, il est évident que **l'Algérie** dispose d'un énorme potentiel en termes d'énergies renouvelables, en particulier en énergie solaire et éolienne. Toutefois, leur utilisation est encore insuffisante et les combustibles fossiles restent la source d'énergie prédominante dans le pays. De plus, **l'Algérie** est confrontée à un grave problème de pénurie d'eau, en particulier dans les régions arides et semi-arides. Cependant, il est important de souligner que les énergies renouvelables peuvent également contribuer à la production d'eau potable. Par conséquent, il est crucial d'explorer davantage les solutions potentielles pour produire de l'eau potable à partir de sources alternatives.

I.7 L'eau : une ressource essentielle pour la planète et l'humanité

L'eau est un élément clé pour la matière végétale, fournissant de l'hydrogène et de l'oxygène nécessaires à la photosynthèse par hydrolyse. Cependant, son importance ne se limite pas aux plantes, car elle est cruciale pour la biologie et l'économie en général. L'hydrosphère est l'un des fondements de la vie et des équilibres écologiques, ce qui signifie que l'eau est à la fois un aliment, un médicament, une matière première industrielle, énergétique et agricole, ainsi qu'un moyen de transport essentiel.[14][15]

I.8 Les multiples usages de l'eau dans notre vie quotidienne

L'eau a de nombreux usages, mais en ce qui concerne la santé humaine, son utilisation est principalement axée sur l'agriculture, l'aquaculture, l'industrie, l'artisanat, les loisirs aquatiques tels que la baignade, et surtout la fourniture d'eau potable, que ce soit de manière collective ou individuelle. Cette eau potable peut être utilisée à des fins alimentaires, telles que pour la boisson et la cuisine, ainsi que pour les tâches ménagères et l'hygiène personnelle.[14]

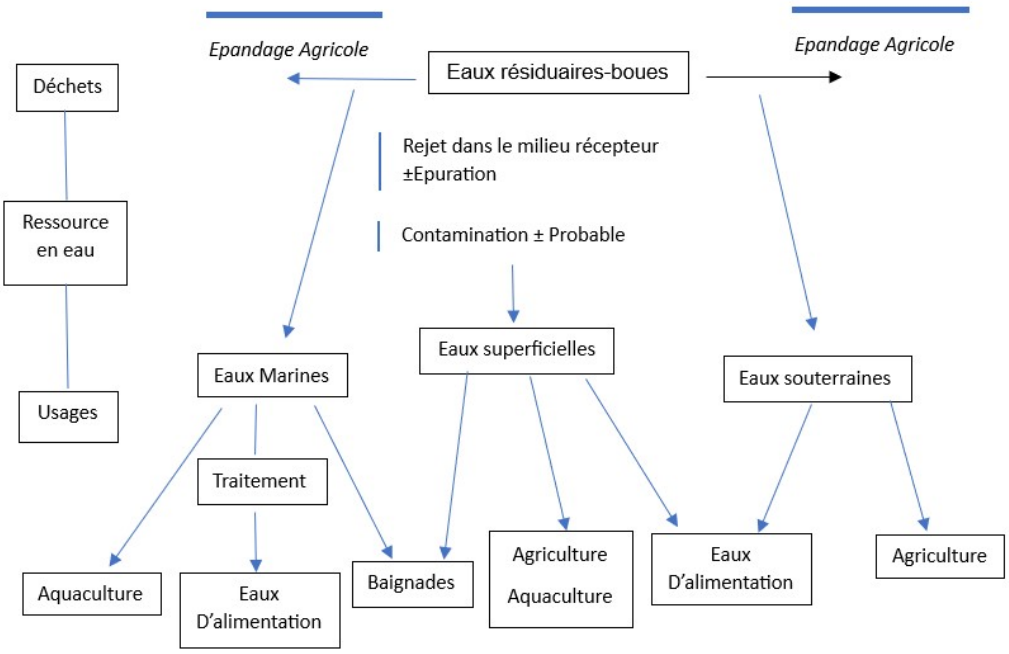

FIG. I.9 : Ressources, usages et interdépendance des eaux [14].

I.9 Consommation d'eau et stress hydrique dans les pays développés et en développement

La consommation d'eau par habitant varie considérablement en fonction du niveau de développement économique d'un pays. Dans les pays industrialisés, la consommation moyenne est d'environ **320 litres par personne et par jour**, tandis que dans les pays en développement, elle est de **340-600 litres par personne et par jour (données de 2021)**. Le stress hydrique est un problème majeur lorsque les ressources annuelles en eau d'une région sont inférieures à **1700 mètres cubes par an et par personne** . Quant à la pénurie d'eau, elle se produit lorsque la quantité d'eau prélevée dans les lacs, les rivières ou le sous-sol est si importante que les ressources en eau, inférieures à **1000 mètres cubes par an et par personne**, ne peuvent plus répondre aux besoins humains et écologiques.

I.10 La situation critique de la rareté d'eau en Algérie selon la FAO

D'après la **FAO, l'Algérie** est considérée comme l'un des 17 pays les plus défavorisés en termes de ressources hydriques parmi les 180 pays évalués. En effet, avec seulement **478** m^3 d'eau renouvelable par habitant et par an, **l'Algérie** dispose de moins **de 50%** du seuil de rareté défini par la Banque Mondiale à **1000** m^3**/hab/an, moins de 33%** du seuil de confort hydrique compris entre **1000 et 1700** m^3**/hab/an**, et seulement **7%**

de la moyenne mondiale estimée à **6700 m^3/hab/an en 2003 selon la FAO** [17]

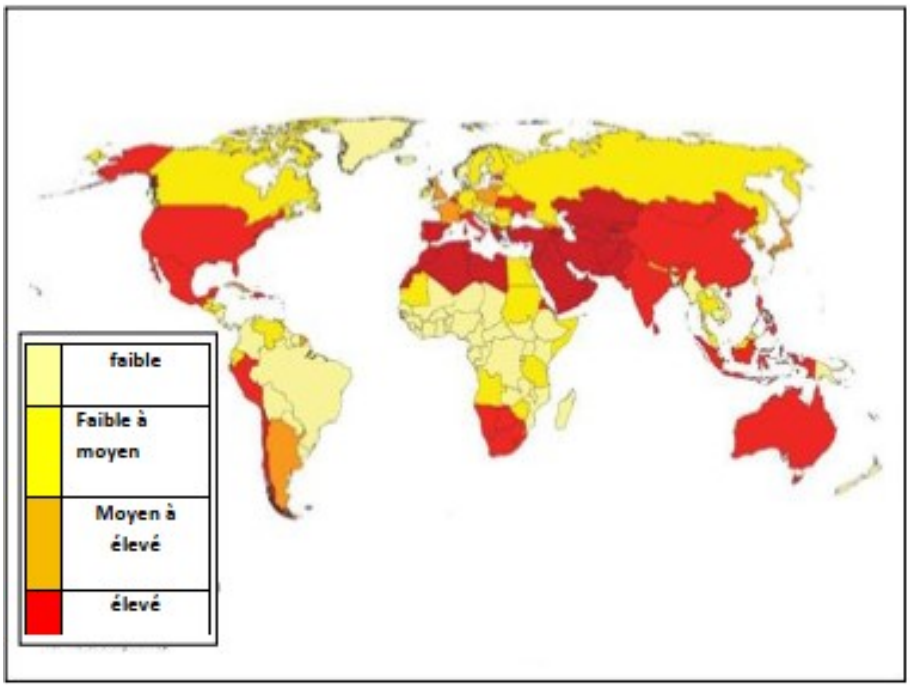

FIG. I.10 : Carte mondiale illustrant la disponibilité de l'eau [17].

I.11 Répartition et mobilisation des ressources en eau en Algérie : défis et inégalités régionales

L'Algérie est composée de 19 bassins versants qui sont regroupés en cinq bassins hydrographiques distincts. Les ressources en eau du pays sont estimées en moyenne à **17,2 milliards de m^3/an**, réparties de la manière suivante d'après **Bouchedja (2012)** :

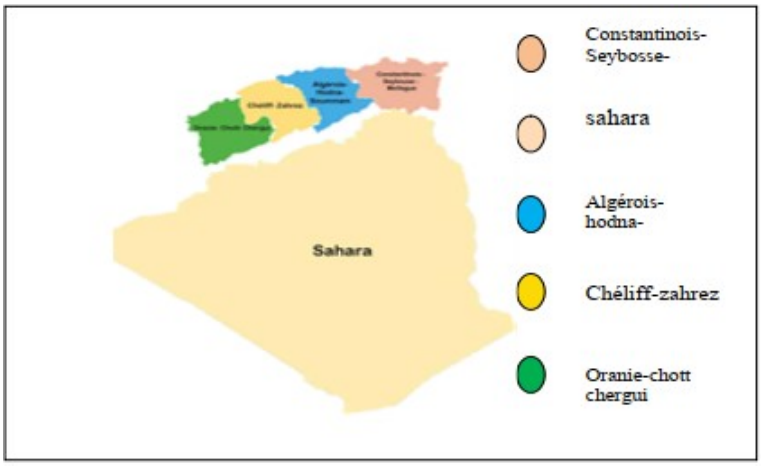

FIG. I.11 : Bassins hydrographiques en Algérie[17].

Régions hydrog raphiques	Eaux superficielles	Eaux souterraines	Total de la ressource
Oranie-chott che rgui	1 milliard de m^3	0.6 milliard de m^3	1.6 milliard de m^3
Cheliff-zahrez	1.5 milliard de m^3	0.33 milliard de m^3	1.83 milliard de m^3
Algerois-Hodna-Soumam	3.4 milliards de m^3	0.74 milliard de m^3	4.14 milliards de m^3
Consta ntinois-Seybousse- Mellegue	3.7 milliards de m^3	0.43 milliard de m^3	4.43 milli ards de m^3
Sahara	0.2 milliard de m^3	5 milliards de m^3	Il s'agit de la nappe albienne

Tab. I.4 : Régions hydrographiques en Algérie [17]

Dans les régions nord du pays : 12 milliards de m^3/an dont **10 milliards de m^3** proviennent de ressources superficielles et **2 milliards de m^3** de ressources souterraines.
Dans les régions sahariennes : 5,2 milliards de m^3/an avec seulement **0,2 milliards de m^3** provenant de ressources superficielles et **5 milliards de m^3** de ressources souterraines. La mobilisation des ressources en eau a atteint **2,7 milliards de m^3/an en 2011** grâce à la construction de 63 barrages. Ce chiffre devrait atteindre **4,3 milliards de m^3/an en 2030** avec la construction de **121 barrages**. D'autres solutions sont envisagées pour pallier les besoins en eau, comme le développement de la réutilisation des eaux usées, qui a permis la mobilisation de **1,2 millions m^3/an en 2015**, ainsi que le dessalement avec une capacité de **2,3 millions m^3/jour**.

Cependant, certaines régions souffrent d'inégalités en matière d'eau, comme l'ouest et le sud touchés par la sécheresse ou le nord avec des besoins importants en eau.

I.11.1 La stratégie nationale de l'eau en : objectifs, mesures et projets

La politique de développement de l'eau vise à réaliser deux objectifs principaux : sécuriser l'approvisionnement en eau potable des populations et améliorer la sécurité alimentaire grâce à une meilleure irrigation des terres. Pour atteindre ces objectifs, des programmes quinquennaux ont été mis en place, incluant diverses stratégies. Ainsi, pour s'assurer des ressources en eau suffisantes, des transferts d'eau interrégionaux sont envisagés, ainsi que **le dessalement de l'eau de mer** et la réutilisation des eaux usées épurées. De plus, la construction de barrages et la réhabilitation des systèmes d'eau existants sont également prévues.

En 2025, l'objectif est de construire **75 barrages pour un volume** régularisable global de **6 milliards de mètres cubes**, ainsi que 16 grandes unités de dessalement d'eau de mer pour un volume dessalé de **942 hm^3**. En agriculture, une meilleure gestion de l'eau et l'utilisation de techniques d'irrigation modernes pourraient réduire les demandes en eau de **20** à **30%**, tandis que la réhabilitation des réseaux d'approvisionnement en eau potable permettrait de ramener le taux de fuite de **40% à 30%**. Enfin, **34 stations**

d'épuration des eaux usées sont actuellement en construction, avec pour objectif en **2025** une capacité d'épuration et de réutilisation de **1,2 milliard de mètres cubes par an**.

En **Algérie**, l'eau potable est une ressource rare et précieuse. Pour répondre aux besoins croissants en eau potable, le pays utilise de plus en plus la technique de dessalement de l'eau de mer. Cette technique consiste à éliminer le sel et les impuretés de l'eau de mer pour la rendre potable. La technique la plus courante en **Algérie** est l'osmose inverse, qui utilise une membrane pour filtrer l'eau. D'autres techniques sont également envisagées, mais elles sont plus coûteuses et nécessitent davantage d'énergie. Le dessalement de l'eau de mer est donc une solution innovante pour répondre aux besoins en eau potable en **Algérie**, mais doit être combiné à d'autres stratégies pour garantir la sécurité hydrique du pays.

I.12 Le dessalement de l'eau de mer : techniques et évolutions

Le dessalement de l'eau de mer a été pratiqué depuis l'Antiquité avec la méthode d'évaporation. Dans les années **1940**, le dessalement de l'eau de mer s'est développé à grande échelle grâce aux technologies de dessalement thermique par distillation. Les premières usines industrielles de dessalement ont émergé au Moyen-Orient dans les années **1950**. L'osmose inverse est apparue dans le domaine du dessalement à la fin des années **1960**. Aujourd'hui, il y a plus de **15 000 usines** de dessalement en activité dans le monde, produisant plus de **40 millions de m^3 d'eau par jour**, avec une augmentation de **12%** sur les cinq dernières années [18].

Le processus de dessalement se compose généralement de quatre étapes : une prise d'eau de mer, un poste de prétraitement, l'installation de dessalement proprement dite et un post-traitement [18].

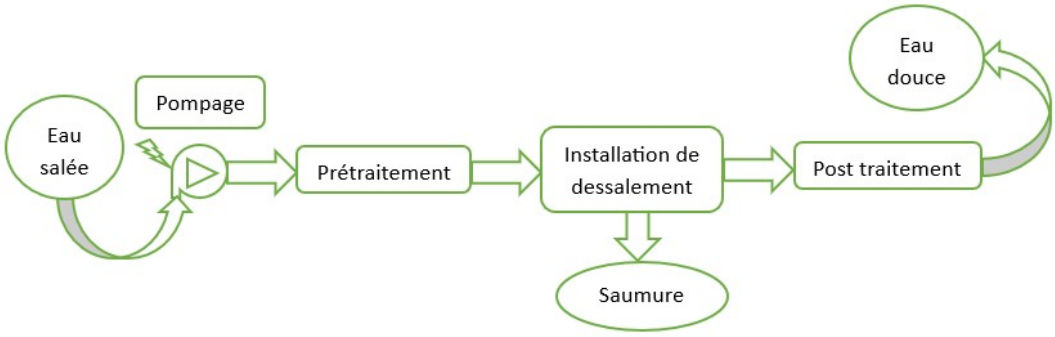

Fig. I.12 : Schéma expliquant le processus de dessalement de l'eau de mer [18]

Le dessalement de l'eau de mer peut être effectué par prise directe ou puits côtiers pour obtenir une eau moins turbide, réduisant ainsi les prétraitements nécessaires. Les prétraitements comprennent la chloration, la filtration et l'antitartre pour éviter l'obstruction des conduites et des équipements, tandis que le post-traitement consiste en la correction de la corrosivité et la désinfection finale pour assurer la potabilité de l'eau. Les

procédés de dessalement utilisent soit la distillation soit les membranes sélectives pour séparer l'eau des sels dissous [19].

Il existe plus de **27 procédés** différents de dessalement qui peuvent être classés en deux grandes familles : les procédés thermiques qui sont énergivores et utilisent un changement de phase et les procédés membranaires qui sont moins énergivores et n'impliquent pas de changement de phase.

Les procédés thermiques sont principalement des procédés de distillation, tandis que les procédés membranaires utilisent des membranes sélectives pour séparer les sels de l'eau de mer. Deux procédés membranaires sont actuellement utilisés en dessalement : l'osmose inverse et l'électrodialyse. Depuis **2001**, l'osmose inverse est le procédé le plus utilisé dans le monde pour le dessalement, représentant **53%** des capacités mondiales de production d'eau. Le choix de la technologie de dessalement est souvent lié à la nature des ressources en eau et des ressources énergétiques des pays concernés [19].

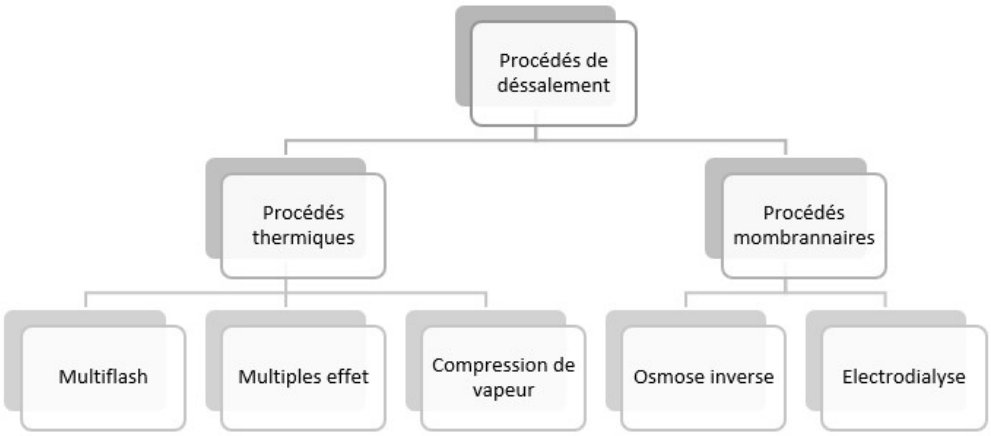

Fig. I.13 : Les différents procédés de dessalement de l'eau de mer [19]

I.12.1 Les procèdes thermiques de distillations

I.12.1.1 La distillation multiflash

La distillation multiflash est une technique de distillation basée sur la vaporisation instantanée de l'eau de mer chauffée à environ **110°C**. Cette eau de mer prétraitée est introduite dans le premier étage d'une installation où la pression est inférieure à sa pression de vapeur saturante, ce qui entraîne une distillation flash. Le reste de l'eau de mer passe à la chambre suivante où une nouvelle distillation flash a lieu dans des conditions de pression et de température plus basses. Ce processus se répète jusqu'à la dernière chambre, permettant une production supérieure à **25 000** m^3 d'eau douce par jour avec une salinité comprise entre **50 et 100 mg/L** pour une consommation électrique allant de **1 à 3 kWh par mètre cube** d'eau produite [18].

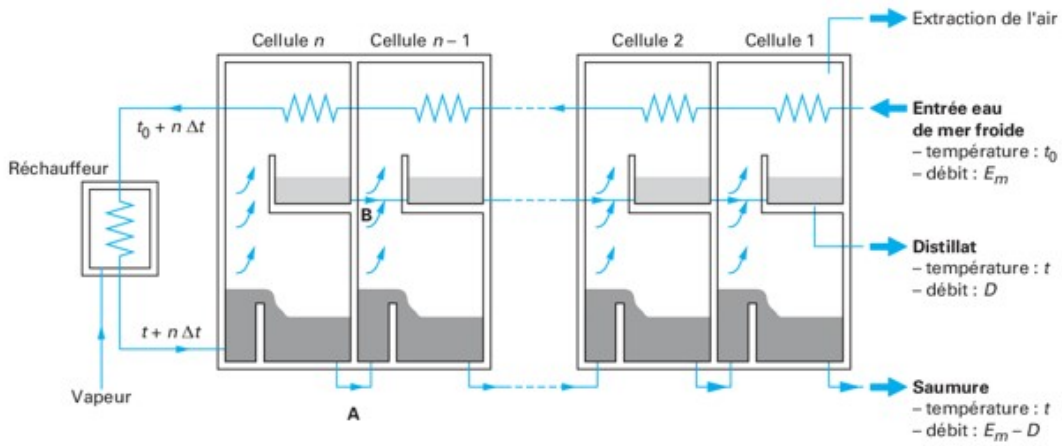

FIG. I.14 : Distillateur par détentes successives [18]

I.12.1.2 La distillation à multiples effets (MED)

La distillation à simple effet est un processus de production d'eau douce qui implique la vaporisation de l'eau de mer à l'aide d'un serpentin de chauffage, puis la condensation de la vapeur produite sur un deuxième serpentin refroidi par de l'eau de mer froide.

La distillation à multiples effets est une extension de ce procédé, dans lequel plusieurs cellules sont utilisées en série pour produire de l'eau douce avec une salinité plus faible. Ce procédé est efficace pour produire de grandes quantités d'eau douce, avec une consommation d'énergie **de 1 à 2 kWh par mètre cube d'eau produite** [18].

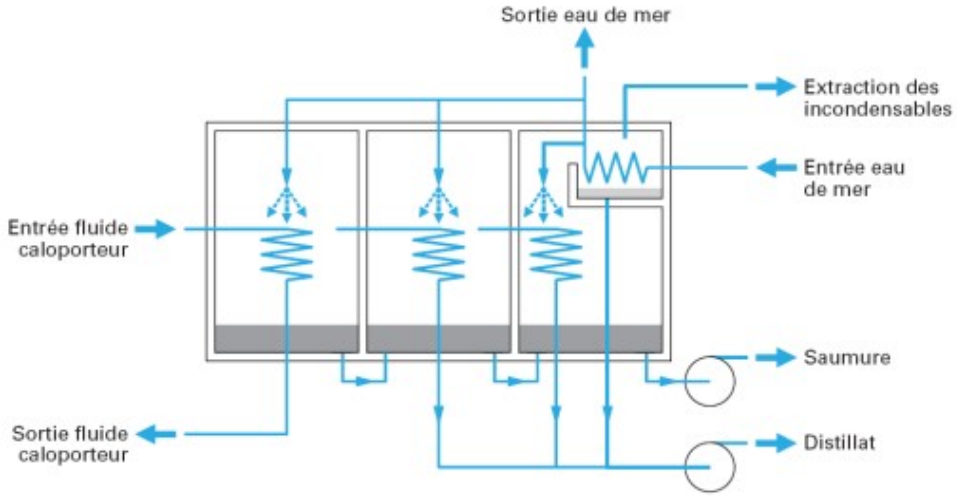

FIG. I.15 : Distillation à multiples effets (MED) [18]

I.12.1.3 La compression de vapeur (MVC)

Le procédé de distillation par compression de vapeur consiste à chauffer l'eau de mer jusqu'à ébullition, comprimer la vapeur produite, la faire condenser pour produire de l'eau douce. Cette méthode permet de produire jusqu'à **5 000** m^3 d'eau douce par jour avec

une salinité de **1 à 50 mg/L**, mais avec une consommation d'énergie élevée de **12 à 17 kWh/m^3**. Cependant, des prétraitements comme la chloration, la filtration et un traitement antitartre sont nécessaires, et les gaz incondensables doivent être gérés [18].

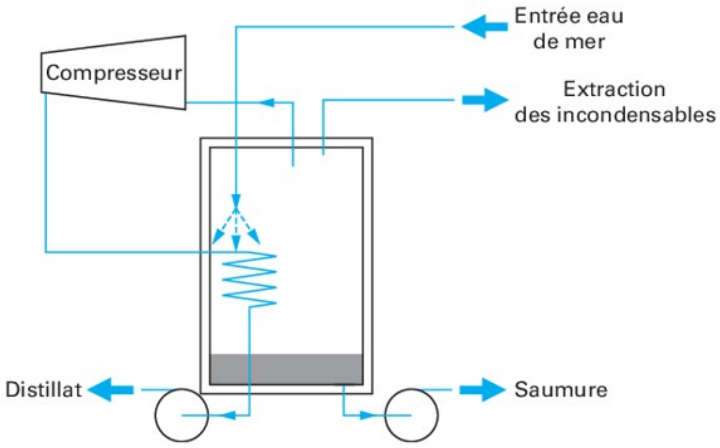

FIG. I.16 : Compression mécanique de vapeur [18]

I.12.2 Les procèdes membranaires

I.12.2.1 L'électrodialyse (ED)

L'électrodialyse est un procédé de concentration et de déminéralisation d'une solution contenant des ions. Il utilise un gradient de potentiel appliqué entre deux électrodes, à travers des membranes échangeuses d'anions et des membranes échangeuses de cations. Les ions se déplacent en réponse au champ électrique créé et se concentrent dans un compartiment, tandis que l'autre compartiment devient appauvri en sel. Cependant, en raison de sa consommation énergétique élevée, l'électrodialyse est moins compétitive que l'osmose inverse et n'est donc généralement utilisée que pour le traitement des eaux saumâtres de concentration inférieure à **3 g/L**.

I.12.2.2 L'osmose inverse (RO)

Le procédé d'osmose inverse permet de dessaler l'eau de mer en appliquant une pression supérieure à la pression osmotique à travers une membrane semi-perméable, permettant à l'eau de s'écouler du compartiment salé vers le compartiment d'eau douce. Cependant, les membranes sont sujettes à l'encrassement, ce qui nécessite un prétraitement rigoureux de l'eau de mer, incluant la filtration pour éliminer les particules en suspension et l'ajout de produits chimiques tels que l'hypochlorite de sodium, le chlorure ferrique, l'acide sulfurique et le bisulfite de sodium. L'osmose inverse est considérée comme le procédé le plus efficace pour dessaler l'eau de mer, produisant jusqu'à **100 000 m^3 d'eau douce par jour** avec une consommation d'énergie de **3 à 5 kWh/m^3** [20].

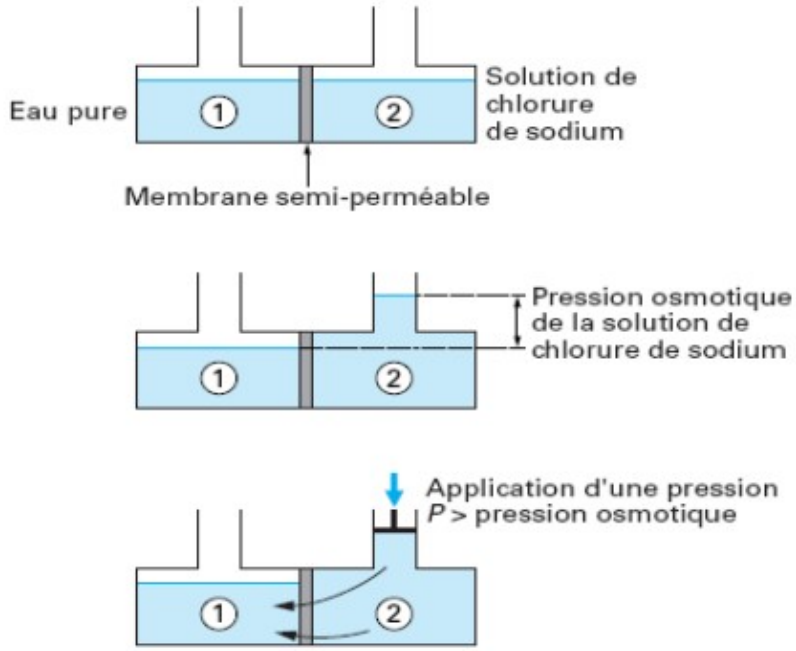

Fig. I.17 : Le processus de L'osmose inverse [20]

Le phénomène de polarisation de concentration est un obstacle majeur à l'efficacité de l'osmose inverse. Il se produit lorsque le rejet des sels par la membrane entraîne une accumulation de sels près de celle-ci, augmentant ainsi la concentration de sels. Cela peut entraîner une diminution du taux de rejet, une précipitation possible des sels en surface de la membrane, une réduction du flux de perméat en raison de l'augmentation de la pression osmotique pour de fortes concentrations et une accumulation de matières en surface de membrane pouvant conduire à la formation d'un dépôt [9].

I.13 Divers types de sources d'énergie pour les usines de dessalement

Pour les grandes usines de dessalement, le coût le plus bas est souvent atteint par le couplage d'une centrale électrique avec une unité de production d'eau, où les vapeurs d'échappement des turbines sont utilisées pour alimenter les unités de dessalement. Un exemple d'accouplement de turbine à gaz et d'usine de dessalement consiste à utiliser une turbine à gaz pour produire de l'électricité, avec la chaleur résiduelle produite par l'usine servant à produire de la vapeur à pression moyenne. Cette vapeur est ensuite utilisée pour produire de l'eau douce dans l'usine de dessalement. Ce système peut produire **1 000 MW** d'électricité pour **450 000 m^3/jour d'eau douce**.

Dans un autre arrangement, une chaudière à haute pression est associée à une turbine à vapeur pour produire de l'électricité et fournir de la vapeur à basse pression pour l'unité de dessalement. Les proportions puissance/eau produite sont typiquement de **500 MW d'électricité** pour **450 000 m^3/jour d'eau douce produite**. Enfin, une nouvelle

tendance consiste à associer les centrales nucléaires et les usines de dessalement ce qui permet de produire de l'eau douce à moindre coût.

I.14 Dessalement grâce à des énergies renouvelable

I.14.1 Distillateur solaire direct

Le distillateur solaire direct, en raison de sa productivité faible d'environ **4 litres par jour par mètre carré** et de son coût de production élevé compris entre **6,5 et 13 euros par mètre cube** , est approprié pour les installations de petite taille et éloignées de toute autre source d'énergie.

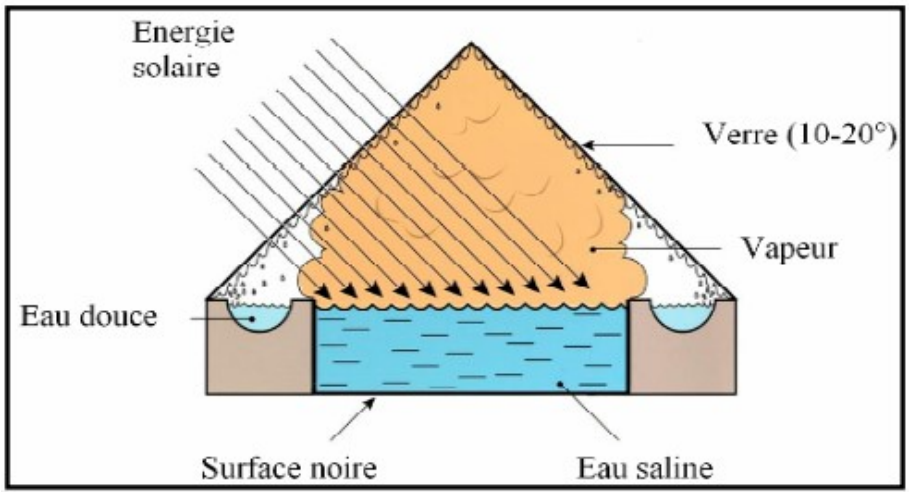

Fig. I.18 : Distillateur solaire direct [19]

La capacité typique / coût correspondante : 1 m^3/Jour - 1€/m^3

Capacité maximal en service : 36 m^3/jour (Gwadar 2 , Pakistan)

I.14.2 Distillation et énergie solaire

La capacité typique / coût correspondante : 10 m^3 / jour - 8€/m^3

Capacité maximal en service : 72 m^3 / Almeria Espagne

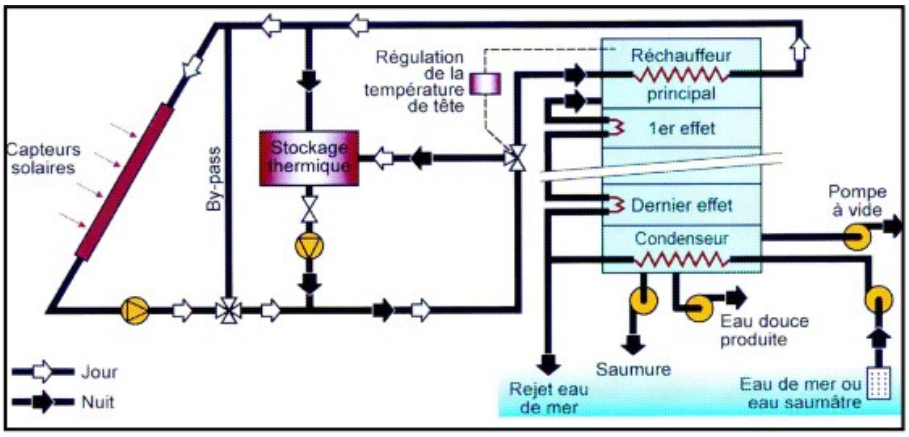

FIG. I.19 : Distillateur a effets multiples associé à des capteurs solaire [19]

I.14.3 Osmose inverse et énergie solaire (photovoltaïque)

Le procédé d'osmose inverse couplé à une source d'énergie solaire photovoltaïque fonctionne grâce à l'énergie électrique ou mécanique et est facile à mettre en place avec l'utilisation d'une pompe haute pression. Il s'avère être très efficace d'un point de vue énergétique, avec une consommation d'énergie moyenne de **2 kWh/**m^3 pour le dessalement d'eau de mer.

Unité de dessalement	Conditions de fonctionnement
Eau saumâtre salinité=4.5g/litre	Eté=35 kWh/j soit= 7.5 h/j ×15 m^3/j
Capacité osmose inverse= 2m^3/h	Hiver= 16 kWh/j soit=3.75 h× 2 m^3/h= 7.5m^3/j
Taux de conversion= 70%	
Puissance nécessaire=3.57 kW	Cout de l'eau produite
Energie consommée= 1.70 kWh/m^3	5.6€/m^3 contre 8.5€/m^3 pour le transport par camion

TAB. I.5 : Unité de dessalement solaire ¨Osmose inverse et photovoltaïque¨ Village de Ksar Ghilene en Tunisie (village de 300 habitants situé dans le nord de la Tunisie) [19]

I.14.4 Osmose inverse et énergie éolienne

Pour les unités de grande capacité **(> 1 000** m^3**/jour)**, le stockage d'énergie par batteries n'est pas envisageable. Il est nécessaire de se connecter à un réseau électrique pour pallier les aléas des énergies renouvelables et assurer un fonctionnement **24 heures sur 24 de l'unité de dessalement**.
La capacité typique / coût correspondante : 10 m^3/Jour - 6€/m^3
Capacité maximal en service : 6000 m^3/jour (Maroc)

I.15 Les différentes techniques de dessalement : particularités techniques et choix énergétiques

Le dessalement est un processus très énergivore, avec l'utilisation de la chaleur pour la technique **MED**, et d'un peu d'électricité pour les pompes et les auxiliaires. En revanche, l'osmose inverse n'utilise que de l'électricité, qui est une forme d'énergie plus précieuse.

Chaque technique présente des avantages spécifiques en fonction des conditions. Les techniques thermiques conviennent mieux aux eaux très salines et chaudes, tandis que les techniques à membranes sont plus économiques pour des eaux moins salines et à des températures plus basses **(environ 25°C)** voir le tableau **Tab. I.6** Par ailleurs, le coût de l'énergie varie considérablement d'un pays à l'autre. Les pays riches en ressources pétrolières ont un accès facile et peu coûteux au pétrole, ce qui les incite à privilégier les techniques thermiques. En revanche, les pays qui manquent de ressources fossiles opteront plutôt pour l'osmose inverse.[19]

Comparaison des procèdes	ME	MVC	OI
Température de fonctionnement (C°)	<70	<70	<45
Principale source d'énergie	Thermique	Mécanique (Via électricité)	Mécanique (Via électricité)
Consommation thermique(kWh/m^3)	6	Pas applicable	Pas applicable
Consommation électrique(kWh/m^3)	1.5	8-14	4-7
Salinité de l'eau brute(g/l)	30-100	30-50	1-45
Salinité de l'eau traitée(mg/l)	<10	<10	<500
Capacité d'un train(m^3/j)	500-12.000	10-2.500	1-10.000
Avantages	20% moins cher que le MSF	Simplicité	Modularité
Inconvénients	Consommation plus faible que MSF	Capacité Limitée	Fragilité

Tab. I.6 : Tableau de comparaison de procédés [19]

I.16 Conclusion

En conclusion, le dessalement de l'eau de mer est une technique clé pour répondre aux besoins en eau potable en **Algérie** un pays confronté à une situation de stress hydrique en raison de son climat aride et semi-aride. La technique de l'osmose inverse est largement utilisée en **Algérie** pour dessaler l'eau de mer, en raison de son efficacité et de sa faible consommation d'énergie par rapport aux autres techniques de dessalement.

Cependant, le dessalement de l'eau de mer nécessite une grande quantité d'énergie, ce qui peut rendre le coût de production de l'eau potable élevé. C'est pourquoi l'utilisation d'énergies renouvelables pour alimenter les stations de dessalement est une solution prometteuse pour rendre le processus plus durable et plus économique. En **Algérie**, l'utilisation de l'énergie solaire et éolienne pour le dessalement de l'eau de mer est en train de se développer, offrant une solution innovante et écologique pour répondre aux besoins croissants en eau potable.

Dans le deuxième chapitre de notre étude, nous allons nous concentrer sur l'utilisation de l'énergie photovoltaïque comme source principale d'alimentation pour notre station de dessalement. Nous examinerons en détail les différents composants essentiels de notre système, tels que les panneaux solaires, les convertisseurs statiques et les moteurs asynchrones qui entraines les pompes de notre station.

Chapitre II

Les composants du système de dessalement par photovoltaïque

II.1 Introduction

Dans le contexte actuel où les ressources en eau douce sont de plus en plus limitées, les technologies de dessalement de l'eau de mer gagnent en importance. Parmi ces technologies, l'osmose inverse est largement utilisée en raison de son efficacité énergétique et de sa capacité à produire de l'eau potable de haute qualité. Cependant, l'un des défis majeurs de l'osmose inverse est son besoin en énergie pour fonctionner de manière optimale.

L'énergie et le rayonnement solaire se révèlent être une option prometteuse pour alimenter les installations de dessalement par osmose inverse. L'énergie solaire, en tant que source d'énergie renouvelable abondante, propre et disponible partout dans le monde, offre une opportunité de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et de promouvoir le développement durable.

II.2 Présentation du soleil

Le soleil est une étoile pseudo-sphérique qui a un diamètre énorme de **1 391 000 km** et se trouve à une distance moyenne de **149 598 000 km** de la Terre. Principalement composé d'hydrogène et d'hélium, il abrite des réactions de fusion nucléaire en permanence et possède une température de cœur de **107 K.** [21]

II.3 La conversion de l'énergie solaire en électricité avec l'effet photovoltaïque

Le principe de la conversion de l'énergie solaire en électricité est appelé effet photovoltaïque qui permet la transformation directe de la lumière du soleil en électricité. Les cellules photovoltaïques à base de silicium sont capables de transformer les photons en électrons grâce à des matériaux semi-conducteurs. Le courant continu généré est directement utilisable. Les modules photovoltaïques sont ainsi utilisés pour produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire.[22]

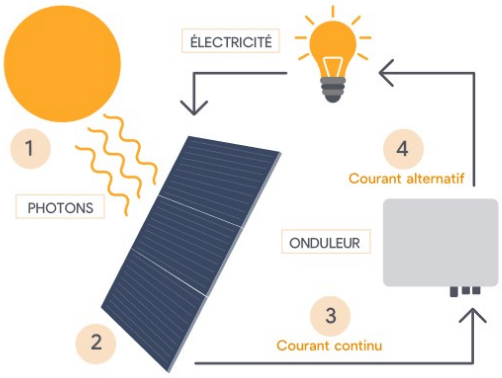

Fig. II.1 : Conversion photovoltaïque [23].

II.4 Différents types de systèmes photovoltaïques

En matière de systèmes photovoltaïques, on peut généralement distinguer trois types, à savoir les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés à un réseau. [22]

II.4.1 Les systèmes connectés au réseau électrique

Les systèmes de production photovoltaïque connectés au réseau électrique (illustrés dans **Fig. II.2**) sont une réponse à la tendance croissante de décentralisation de la production d'électricité. Ces systèmes produisent de l'énergie près des zones de consommation, limitant ainsi la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Ces systèmes produisent leur propre électricité et envoient leur surplus d'énergie au réseau auquel ils peuvent également se connecter en cas de besoin, éliminant ainsi la nécessité d'acheter et de remplacer des batteries. En cas de coupure de courant, ces systèmes peuvent également servir de source d'alimentation de secours.[22]

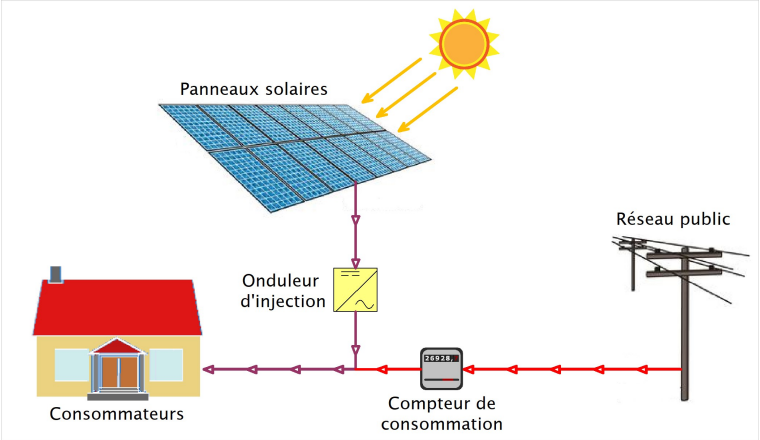

Fig. II.2 : Système photovoltaïque connecté au réseau [22].

II.4.2 Les systèmes hybride

Les systèmes d'énergie hybride combinent plusieurs sources d'énergie renouvelables et conventionnelles pour assurer une production électrique continue. Ces systèmes sont souvent utilisés dans les régions isolées et fonctionnent de manière autonome par rapport aux réseaux électriques principaux. Deux configurations courantes sont utilisées : l'architecture à bus continu et l'architecture à bus alternatif. Dans la première configuration, la puissance des différentes sources est centralisée sur un bus continu, puis convertie en courant continu par des systèmes de conversion d'énergie. Les générateurs et le système de stockage sont connectés en série avec un onduleur pour alimenter les charges alternatives. Dans la seconde configuration, tous les composants du système hybride sont reliés directement à la charge alternative. Ces deux configurations offrent des avantages spécifiques en termes de commande et de fonctionnement. [22]

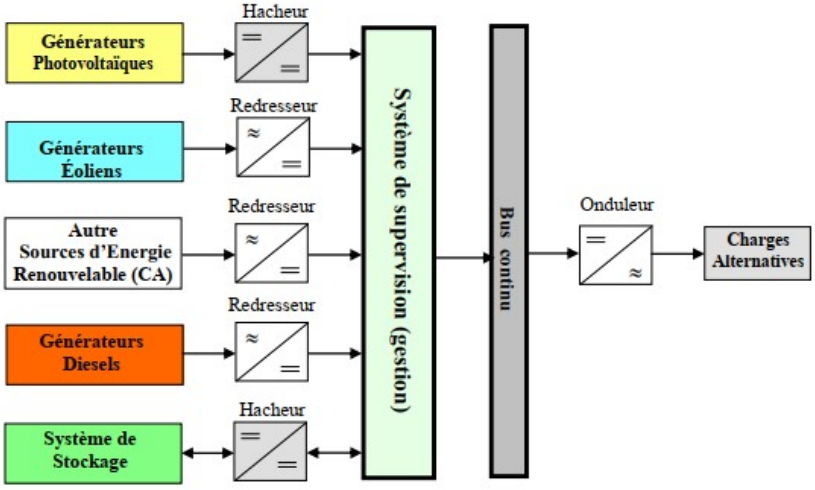

FIG. II.3 : Configuration du système hybride à bus continu [22].

II.4.3 Les systèmes autonomes

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont conçus pour fonctionner de manière indépendante, sans recourir à d'autres sources d'énergie. Ils sont couramment utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau électrique. La figure **Fig. II.4** illustre les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes, qui peuvent être directement couplés à une charge adaptée ou connectés à un adaptateur d'impédance **MPPT (Maximum Power Point Tracking)** pour une meilleure efficacité. [22]

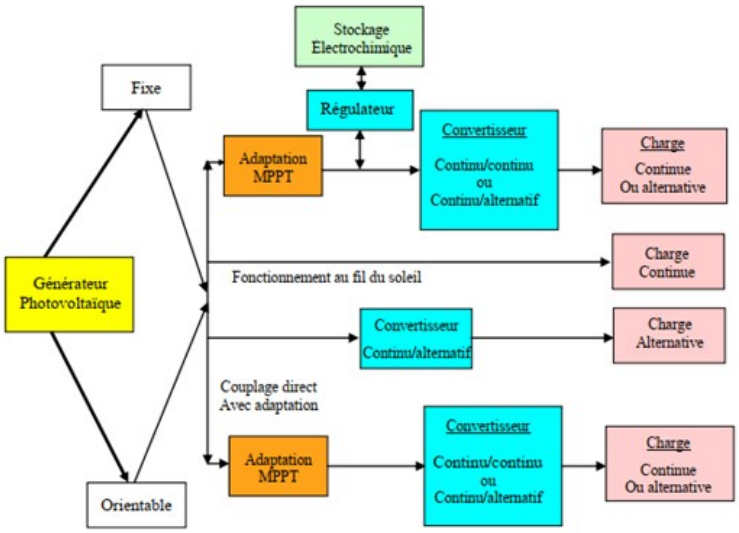

FIG. II.4 : Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes [22]

II.5 Le module photovoltaïque

II.5.1 Constitution

Les modules photovoltaïques sont constitués de cellules photovoltaïques qui produisent une faible puissance électrique. Pour augmenter la tension du module photovoltaïque, on associe en série n_s cellules. les équations **(II.1) et (II.2)** permettent de calculer la tension en circuit ouvert (V_{co}) et le courant de court-circuit (I_{cc}) pour une telle association. [22]

$$V_{\mathrm{co_{ns}}} = n_{\mathrm{s}}.V_{\mathrm{co}} \tag{II.1}$$

et

$$I_{\mathrm{cc_{ns}}} = I_{\mathrm{cc}} \tag{II.2}$$

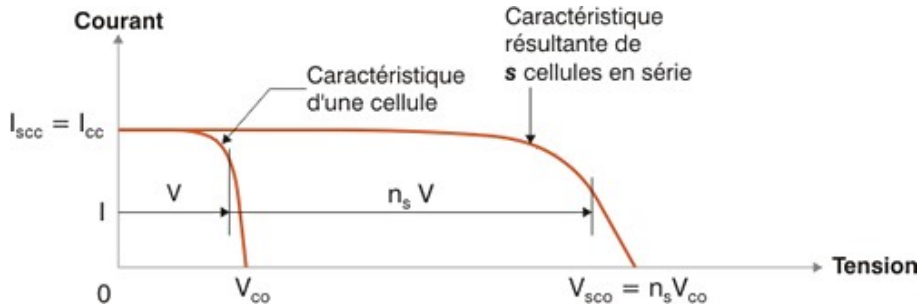

FIG. II.5 : Caractéristiques résultantes d'un regroupement de n_s cellules en série [22]

Le courant de sortie d'un module PV peut également être augmenté en connectant en parallèle un groupe de n_p cellules identiques. les équations **(II.3) et (II.)** permetenet de calculer le courant de court-circuit (I_{cc}) et la tension en circuit ouvert (V_{co}) pour une association en parallèle de n_p cellules. [22]

$$I_{\mathrm{cc_{np}}} = n_{\mathrm{p}}.I_{\mathrm{cc}} \tag{II.3}$$

et

$$V_{\mathrm{co_{np}}} = V_{\mathrm{co}} \tag{II.4}$$

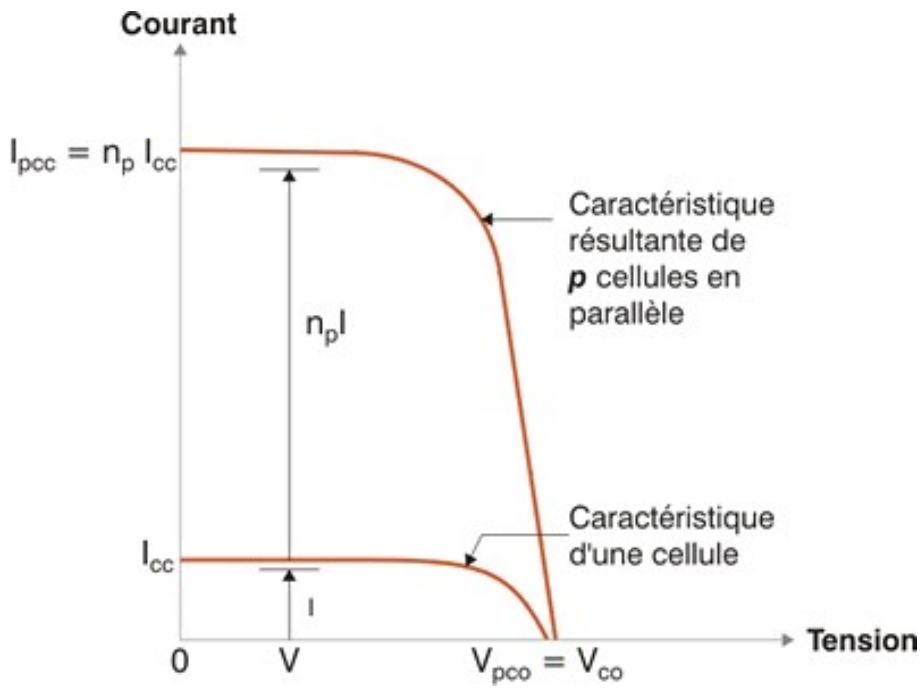

FIG. II.6 : Caractéristiques résultantes d'un regroupement de n_p cellules en parallèle [22]

On peut considérer que la caractéristique courant-tension (I-V) d'un module photovoltaïque est le résultat de l'association d'un réseau de n_s x n_p cellules. Par conséquent, la puissance de sortie disponible (P_{pv}) du module PV est calculée par :

$$P_{\mathrm{pv}} = n_{\mathrm{s}}.V_{\mathrm{pv}}.n_{\mathrm{p}}.I_{\mathrm{pv}} \tag{II.5}$$

II.5.2 Les caractéristiques de transfert du module PV

Les caractéristiques courant-tension **(I-V)** et puissance-tension **(P-V)** d'un module photovoltaïque permettent de comprendre comment il se comporte face à différentes charges en fonction de l'ensoleillement et de la température. La figure **II.7** présentee dans les caractéristiques I-V et P-V d'un module PV pour un éclairement et une température donnée.[24]

Le module PV a un comportement différent en fonction de la zone où se trouve le point de fonctionnement.

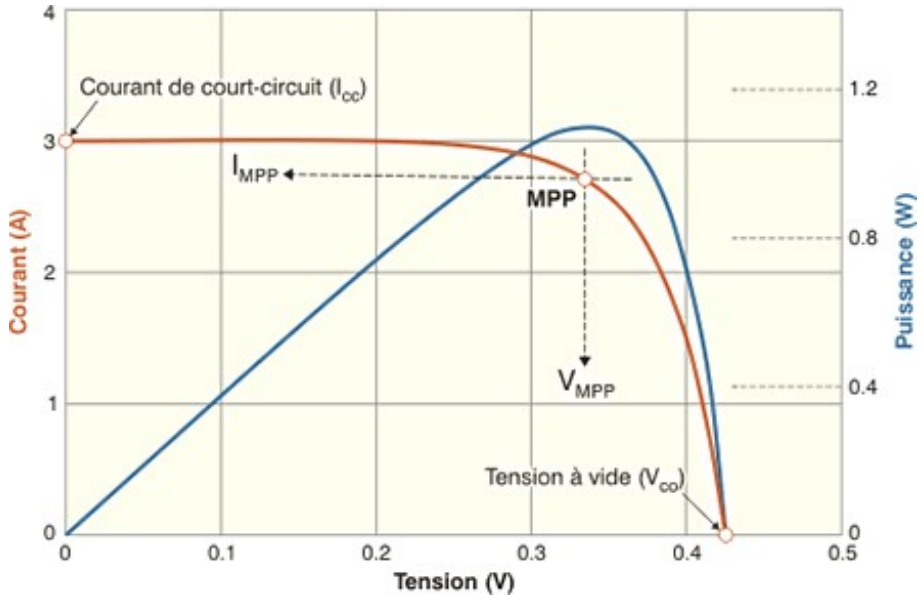

Fig. II.7 : Caractéristiques d'un module PV : I-V et P-V [24]

- Dans la zone ou la tension V est comprise entre 0 et 0.3V, le courant reste constant indépendamment de la tension, ce qui signifie que le module photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant.
- Dans la zone ou la tension V est supérieur à 0.35V , la tension reste presque constante même si le courant varie. Dans ce cas, le module photovoltaïque est assimilable à un générateur de tension.[24]
- Dans la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représentant la meilleure région pour le fonctionnement du module PV en tant que générateur photovoltaïque. C'est également la zone où le point optimal, caractérisé par une puissance de sortie maximale, peut être déterminé.[24]

Le fonctionnement du module PV dépend de la charge et des paramètres météorologiques tels que la température, l'humidité et l'ensoleillement, qui peuvent avoir une influence déterminante sur ses performances. [24]

II.5.3 Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque

Pour modéliser les performances d'un module PV, on considère les trois caractéristiques électriques les plus importantes : le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension en circuit-ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF).[24]

II.5.3.1 Définition et modélisation du courant de court-circuit d'un module PV

Le courant de court-circuit I_{cc} d'un module PV est la valeur du courant lorsque le module est court-circuité.

Le courant de court-circuit I_{cc} du module PV peut être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$I_{\mathrm{cc}} = I_{\mathrm{cc}_{(0)}} \left(\frac{G}{G_{(0)}} \right)^{\alpha} \tag{II.6}$$

Où $I_{cc(o)}$ est le courant de court-circuit du module PV sous l'ensoleillement standard $G_{(0)}$, tandis que I_{cc} est le courant de court-circuit du module PV sous le rayonnement solaire G.[24]

II.5.3.2 La tension de circuit-ouvert V_{co}

La tension de circuit-ouvert d'un module PV est la tension mesurée aux bornes du module lorsqu'il n'y a pas de charge connectée. Selon le modèle de **Van Dyk**, la tension de circuit-ouvert V_{co} d'un module PV pour un ensoleillement et une température donnée peut être exprimée par la formule suivante :

$$V_{\mathrm{co}} = \frac{V_{\mathrm{co}_{(0)}}}{1 + b.\ln\left(\frac{G_{(0)}}{G}\right)} \left(\frac{T_{(0)}}{T} \right)^{\gamma} \tag{II.7}$$

Où $V_{co(o)}$ est la tension de circuit-ouvert du module PV sous l'ensoleillement standard $G_{(o)}$**,** V_{co} est la tension de circuit-ouvert du module PV sous le rayonnement solaire **G,** γ et **b** représente une constante technologique sans dimension du module. [24]

II.5.3.3 Le facteur de forme

Le facteur de forme peut être défini comme le rapport entre la puissance maximale de sortie et le produit du courant de court-circuit et de la tension en circuit-ouvert du module :

$$FF = \frac{P_{\max}}{V_{\mathrm{co}} \cdot I_{\mathrm{cc}}} \tag{II.8}$$

Où P_{max} est la puissance de sortie maximale du module PV, V_{co} est la tension en circuit-ouvert du module PV et I_{cc} est le courant de court-circuit. [25]

II.6 Le modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque

Le modèle standard de la cellule photovoltaïque est décrit par une seule diode, contrairement au modèle à deux diodes illustrées dans **Fig. II.8**.[22]

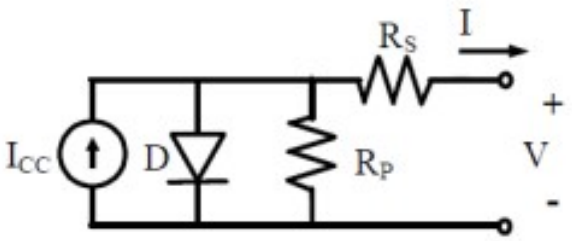

Fig. II.8 : Modelé électrique équivalent à une diode de la cellule photovoltaïque [22]

Ainsi, on obtient l'expression suivante pour le courant **I** :

$$I = I_{\text{cc}} - I_{(0)}\left[e^{\frac{q(V+l\cdot R_{\text{s}})}{nkT}} - 1\right] - \frac{V + I\cdot R_{\text{s}}}{R_{\text{p}}} \tag{II.9}$$

Étant donné que la résistance parallèle (R_p) est considérablement plus élevée que la résistance série (R_s), son impact est minime et peut donc être ignoré. Ce modèle simplifié est couramment utilisé pour faciliter l'étude de la cellule photovoltaïque et est illustré dans la figure **Fig. II.9** [22] .

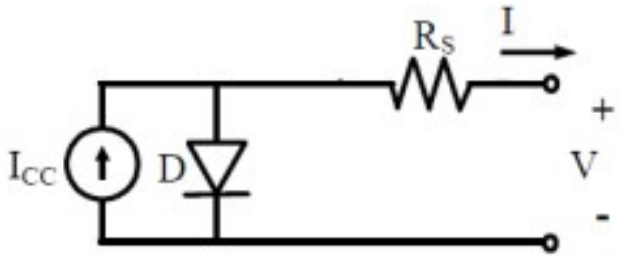

Fig. II.9 : Modelé électrique équivalent simplifier de la cellule photovoltaïque [22]

L'équation **(II.11)** devient alors :

$$I = I_{\text{cc}} - I_{(0)}\left[e^{\frac{q(V+I\cdot R_{\text{s}})}{nkT}} - 1\right] \tag{II.10}$$

Au début on calcule le courant de court-circuit à une température T de la cellule :

$$I_{\text{cc}(T)} = I_{\text{cc}(T_{\text{ref}})}\left[1 + a(T - T_{\text{ref}})\right] \tag{II.11}$$

Avec : $I_{cc(T_{ref})}$ est le courant de court-circuit à la température de référence T_{ref}, donné par la fiche technique du constructeur (mesuré sous un ensoleillement de **1 KW**$/m^2$).

T_{ref} est la température de référence de la cellule en **Kelvin (K)**, généralement **298K (25°C)**. **a** est le coefficient de température de I_{cc} **en (%/°C)**, donnée par la fiche technique du constructeur. Le courant de court-circuit I_{cc} est proportionnel à l'intensité de l'ensoleillement, sa valeur pour un ensoleillement donné **(E)** sera donc :

$$I_{\text{cc}(E)} = \frac{E}{E_{(0)}} \cdot I_{\text{cc}(E_{(0)})} \tag{II.12}$$

Avec : E_o est la valeur nominale de l'ensoleillement, généralement de $\mathbf{1KW}/m^2$. Le courant inverse de saturation (I_o) de la diode à la température de référence (T_{ref}) est donné par :

$$I_{(0)} = \frac{I_{\text{cc}}}{e^{\frac{qV_{\text{co}}}{nKT}} - 1} \tag{II.13}$$

Le courant inverse de saturation (I_o) pour une température $(\mathbf{T})$ donnée est calculé par l'expression suivante :

$$I_{\alpha(T)} = I_{0(Tref)} \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^{\left(\frac{3}{n}\right)} .e^{\frac{-q.Eg}{n.k}.\left(\frac{1}{T}-\frac{1}{Tref}\right)} \tag{II.14}$$

II.7 Impact des paramètres météorologiques et électriques sur les performances d'un module PV

Dans cette section, nous allons examiner l'impact de différents paramètres météorologiques (température, ensoleillement) et électriques (résistance série (R_s), résistance parallèle (R_p)) sur les performances d'un module PV. Nous étudierons plus particulièrement les caractéristiques électriques I-V et P-V, ainsi que la puissance nominale.[24]

II.7.1 Influence de l'ensoleillement

La relation entre le rayonnement incident et la caractéristique courant-tension d'un module PV est directe. En effet, une augmentation du flux lumineux entraîne un déplacement de la courbe I-V le long de l'axe des courants. Plus précisément, le courant de court-circuit est proportionnel à l'irradiation. Toutefois, l'augmentation du courant de court-circuit est plus importante que celle de la tension en circuit ouvert, qui est faiblement influencée par l'éclairement. En revanche, la puissance du module PV augmente considérablement avec l'éclairement.

La Figure **Fig. II.10** illustre l'évolution des caractéristiques I-V et P-V en fonction de l'éclairement **(E) en** $\mathbf{W}/m^2$.[24]

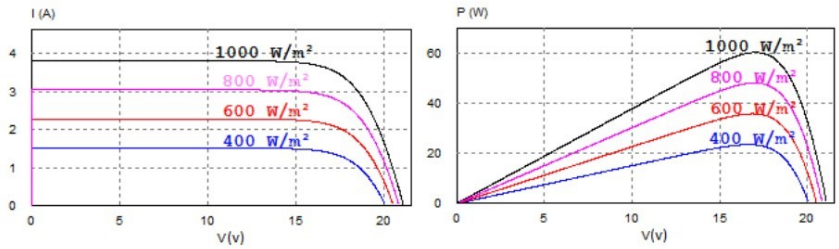

Fig. II.10 : Caractéristiques I-V et P-V d'un module PV pour différents ensoleillements à température constante [24]

II.7.2 Influence de la température

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température.[24]

La Figure **Fig. II.11** représente les caractéristiques I-V et P-V d'un module PV en fonction de la température, sous un éclairement constant. Elle montre que, une augmentation de la température entraîne une chute importante de la tension de circuit-ouvert (de l'ordre de -0.4%/K) tandis que le courant de court-circuit varie peu avec l'augmentation de la température. Globalement, une augmentation de la température entraîne une perte non négligeable de la puissance.[24]

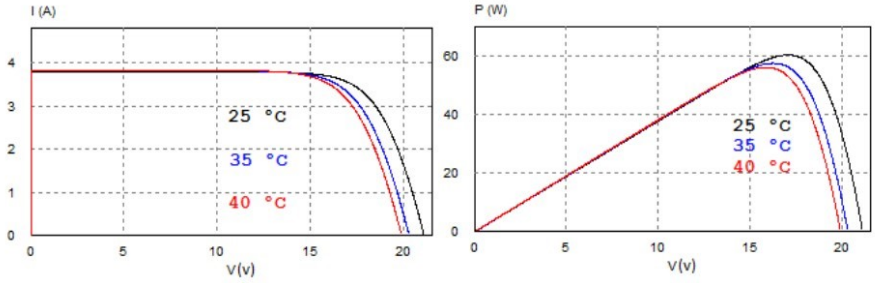

Fig. II.11 : Caractéristiques I-V et P-V d'un module PV pour différentes températures à ensoleillement constante [24]

II.7.3 Influence de la résistance série

La résistance série correspond à la résistance interne de la cellule photovoltaïque. Elle est influencée par divers facteurs tels que la résistance du semi-conducteur, la résistance de contact des grilles collectrices et la résistivité de ces grilles. La caractéristique I-V du module est affectée par la résistance série, comme illustré sur la Figure **Fig. II.12**, où une augmentation de la résistance série se traduit par une diminution de la pente de la courbe I-V dans la région où le module agit comme une source de tension, à droite du point de puissance maximale. La puissance maximale du module diminue avec l'augmentation de la résistance série. En outre, des études ont montré que l'augmentation de l'humidité entraîne une augmentation de la résistance série du module, ce qui réduit la puissance maximale du module. [24]

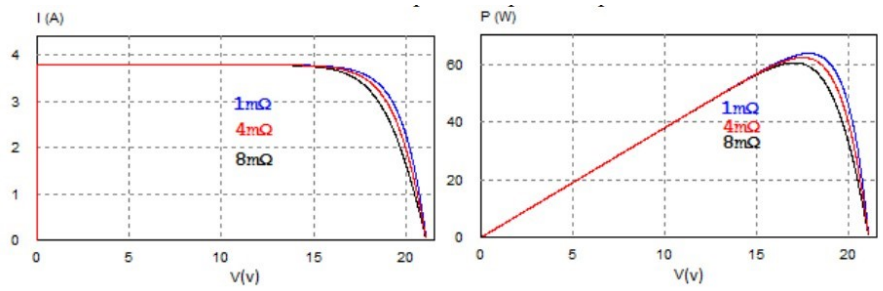

Fig. II.12 : Caractéristiques I-V et P-V d'un module PV pour différentes températures à ensoleillement constante [24]

II.7.4 Influence de la résistance parallèle

La résistance parallèle représente les courants de fuite qui se produisent entre les bornes d'une cellule photovoltaïque. La Figure **Fig. II.13** montre que son influence sur la caractéristique I-V du module se manifeste par une augmentation de la pente de cette dernière dans la zone correspondant au fonctionnement du module PV en tant que source de courant. Une diminution de la résistance shunt est souvent le signe de dégradations dans le module.

En effet, plus la résistance shunt est faible, plus le courant qui la traverse est important, ce qui conduit à une diminution de la production de courant par le module. [24]

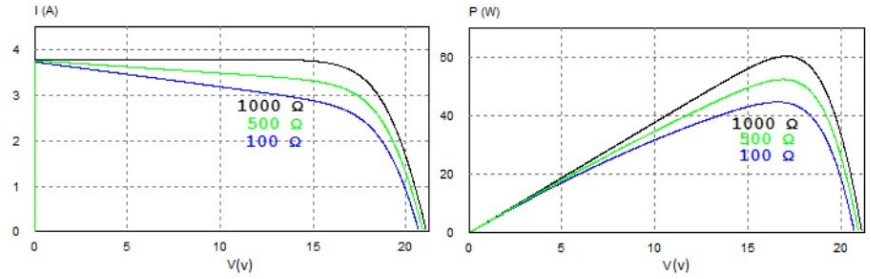

Fig. II.13 : Evolution des caractéristiques I-V et P-V d'un module PV en fonction de la résistance parallèle [24]

II.7.5 Effet de l'ombrage partiel sur le fonctionnement du module PV

L'ombrage partiel est un problème qui affecte la performance des centrales PV en créant une répartition non uniforme de l'éclairement. Il existe deux types d'ombrage : lointain causé par la disparition du soleil derrière l'horizon et proche causé par des obstacles tels que des lignes électriques, des arbres ou des bâtiments voisins. [25]

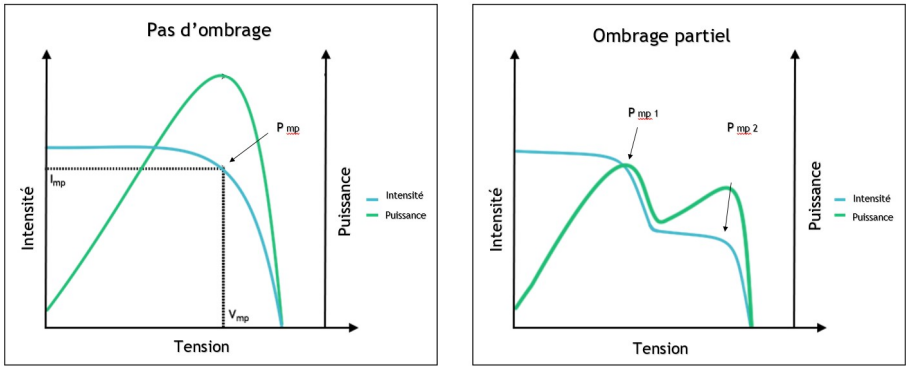

FIG. II.14 : Incidence de l'ombrage sur la cellule [25]

L'ombrage provoque des maximas locaux sur la courbe de puissance et perturbe le fonctionnement des cellules PV. Cela peut causer des problèmes de mismatch, où le courant total d'un champ PV est limité par le courant du module ombragé ainsi que des problèmes de hot spot où le module ombragé se comporte comme un récepteur d'énergie reçue par les autres modules PV pouvant entraîner sa destruction par échauffement. [25]

Il est important de trouver la tension de fonctionnement optimale pour extraire le maximum de puissance PV et augmenter l'efficacité du générateur PV. Cependant, en cas d'ombrage partiel, les modules PV doivent fonctionner avec plusieurs courants ce qui crée plusieurs points de puissance maximale locaux et affecte la production d'énergie PV et l'efficacité du système PV.[25]

II.8 Les protections électriques des installations photovoltaïques

Pour garantir la production d'énergie électrique sur une longue période, il est essentiel de protéger les modules photovoltaïques afin d'éviter des défaillances dommageables résultant de l'association en série et en parallèle des cellules. Pour cela, deux types de protections classiques sont couramment utilisés : [22]

- La diode anti-retour empêche la circulation d'un courant négatif dans les modules photovoltaïques lorsqu'ils sont connectés en parallèle. Cette diode est particulièrement utile lorsque les modules sont utilisés pour charger des batteries, afin d'éviter que ces dernières ne déchargent le module PV pendant la nuit. [22]
- Les diodes by-pass permettent d'isoler un groupe de cellules lorsque l'éclairement n'est pas uniforme afin d'éviter la formation de points chauds et la destruction des cellules sous-exposées. [22]

La figure **Fig. II.15** illustre l'architecture d'un panneau photovoltaïque avec les diodes de protection et met en évidence le courant de circulation dans le cas d'une cellule défectueuse.

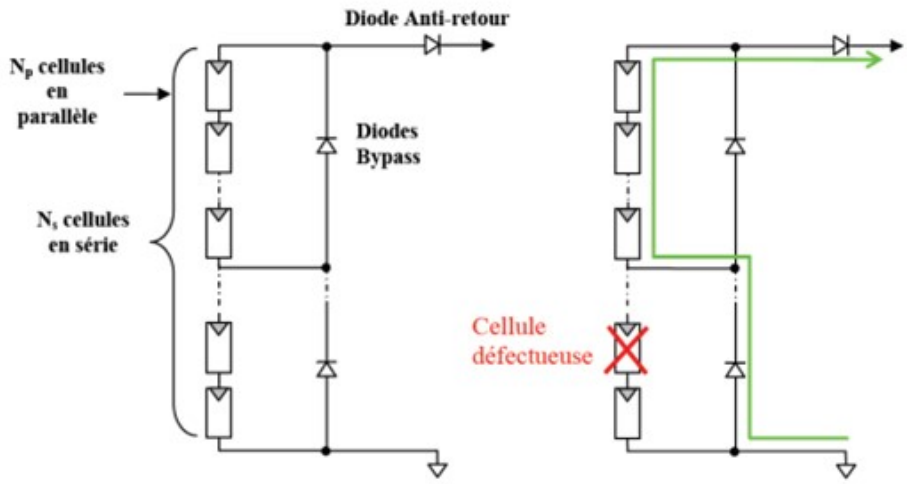

FIG. II.15 : Architecture d'un panneau photovoltaïque avec diodes de protection, et activation de la diode by-pass lors de la défaillance d'une cellule [22]

II.9 La puissance de sortie d'un module PV

L'équation **(II.17)** permet de calculer le courant de court-circuit I_{cc} et l'équation **(II.18)** permet de calculer la tension de circuit-ouvert V_{co} d'un module photovoltaïque à un instant donné **t**

$$I_{\mathrm{cc}}(t) = [I_{\mathrm{cc.stc}} + K_i(T_m(t) - 25)] \cdot \frac{G(t)}{1000} \tag{II.15}$$

et

$$V_{\mathrm{co}}(t) = V_{\mathrm{co,stc}} - K_v \cdot T_m(t) \tag{II.16}$$

Le courant de court-circuit dans les conditions standard de test est noté $I_{cc,stc}$ est exprimé en **A**. Le coefficient de température du courant de court-circuit est noté K_i **(exprimé en A/°C)**. L'ensoleillement sur le plan des modules PV est noté **G(t)** (exprimé **en W**/m^2). La tension de circuit-ouvert dans les conditions standard de test est notée $V_{co,stc}$ est exprimée en **V**.

Le coefficient de température de la tension de circuit-ouvert est noté K_v **(exprimé en V/°C)**. La température moyenne d'un module est notée $T_m(t)$ et est donnée par l'expression qui suit :

$$T_m(t) = T_{amb}(t) + \frac{T_{NOCT} - 20}{800} \cdot G(t) \tag{II.17}$$

Où T_{amb} **(exprimée en °C)** est la température ambiante et T_{NOCT} **(exprimée en °C)** est la température nominale des cellules en fonctionnement. La puissance de sortie d'un module photovoltaïque à l'instant **t** est donnée par l'équation **(II.20)** [24]

$$P_{\mathrm{pv}}(t) = V_{\mathrm{co}}(t) \cdot I_{\mathrm{cc}}(t) \cdot FF \tag{II.18}$$

L'énergie photovoltaïque présente de nombreux avantages tels que son caractère renouvelable et gratuit, sa non-pollution, la réduction de la vulnérabilité aux pannes d'électricité, la facilité d'extension des systèmes et la possibilité de revente du surplus de production. De plus, elle nécessite un entretien minimal et ne génère aucun bruit.

Cependant, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque présente également des inconvénients tels que la fabrication coûteuse des panneaux photovoltaïques nécessitant une haute technologie de recherche et développement, les rendements encore faibles des panneaux, la nécessité d'un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques ainsi que le coût d'investissement élevé pour une installation photovoltaïque.

II.10 Techniques MPPT pour les applications photovoltaïques

En effet, les panneaux PV ont un point de puissance maximale **(PPM)** spécifique où ils produisent le plus d'énergie. Cependant, ce **PPM** varie en fonction des conditions d'ensoleillement. Sans dispositif de suivi du point de puissance maximale, les panneaux PV fonctionneraient généralement à un point de fonctionnement sous-optimal ce qui entraînerait une production d'électricité réduite. Les **MPPT** permettent de surmonter cette limitation en ajustant continuellement la tension et le courant de sortie des panneaux pour s'aligner sur le **PPM**, maximisant ainsi l'efficacité énergétique et la performance globale du système photovoltaïque. [26]

Le calcul de la puissance de fonctionnement des panneaux PV est simple étant le produit de la tension et du courant. Cependant, la puissance de référence qui dépend de la température et de l'éclairement est plus complexe à déterminer en raison de sa nature non linéaire. Pour optimiser la puissance maximale à tout moment, un algorithme appelé **MPPT (Maximum Power Point Tracking)** est utilisé. [26]

II.10.1 Premiers types de commande MPPT

Les premières commandes **MPPT** ont été développées par BOEHRINGER en 1968. Ce premier algorithme **MPPT** était simple et pouvait être implanté numériquement. Il était destiné aux applications spatiales qui avaient moins de contraintes en termes de variation de température et d'éclairement que les applications terrestres. [27]

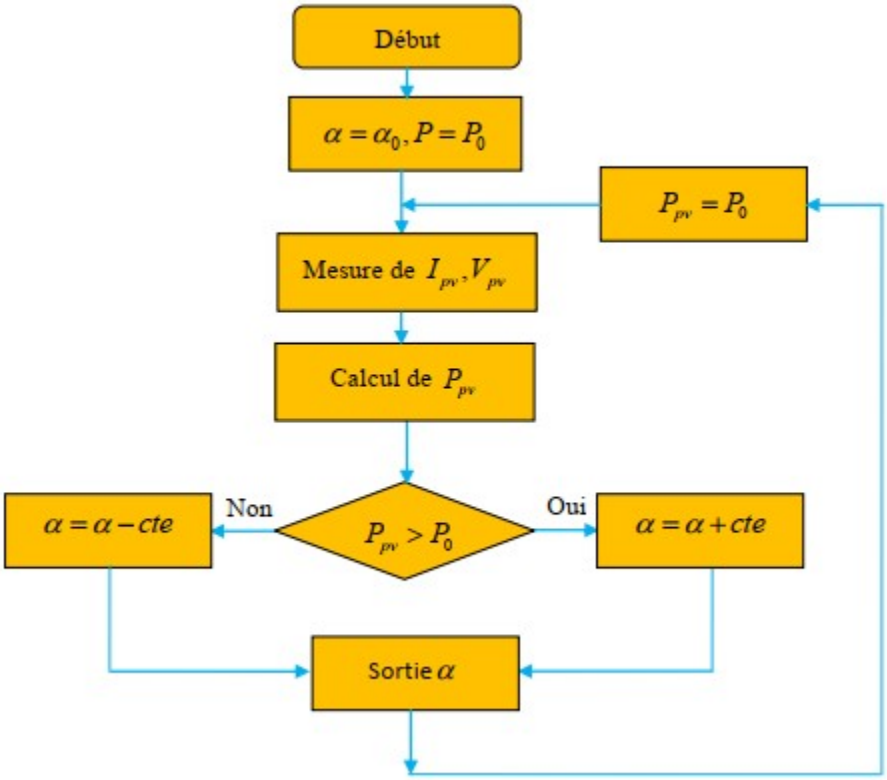

FIG. II.16 : Organigramme de la première commande MPPT [27]

II.10.2 Algorithme de Perturbation et Observation

La méthode de recherche de point de puissance maximale appelée algorithme de perturbation et observation **(PO)** utilise une approche de type **"hill climbing"**, consistant à incrémenter ou décrémenter la tension du point de fonctionnement pour observer l'effet sur la puissance délivrée par le GPV. Cette méthode est largement utilisée dans la littérature en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de sa rapidité de réaction.

Toutefois, elle peut causer des oscillations autour du point de puissance maximale dans des conditions de fonctionnement normales et une mauvaise convergence dans le cas de variations brutales de la température et/ou de l'ensoleillement. Pour remédier à ces problèmes, il est possible de choisir un petit pas d'incrémentation, mais cela peut ralentir le temps de convergence. Un compromis doit donc être fait entre la précision et la rapidité en choisissant le pas de mise à jour. La figure **Fig. II.17** récapitule les quatre cas de situation envisagés par l'algorithme PO (représenté dans la figure **Fig. II.18**) et Le tableau **Tab. II.10** résume les résultats de l'observation. [28]

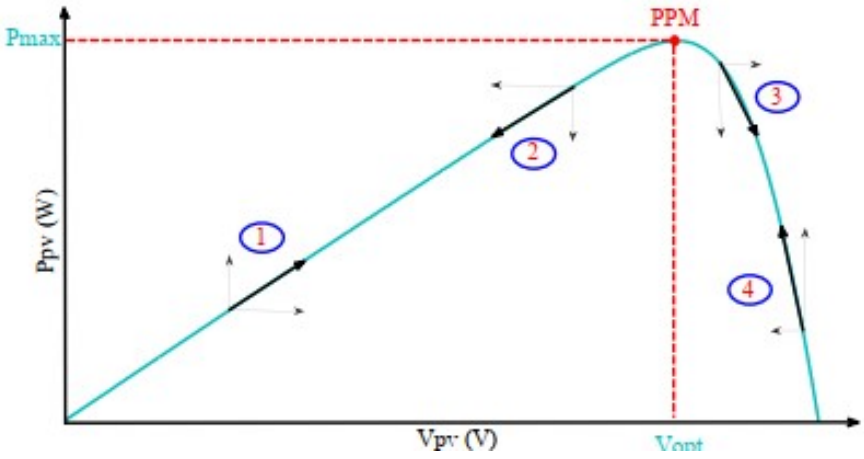

FIG. II.17 : Caractéristique de fonctionnement de la méthode PO [28]

Cas n^0	$\triangle V$	$\triangle P$	$\frac{\triangle P}{\triangle V}$	Sens de la poursuite	Action de contrôle
1	+	+	+	Bon	Incrémenter V$_{ref} = V_{ref} + \triangle V$
2	-	-	+	Mauvais	Incrémenter V$_{ref} = V_{ref} + \triangle V$
3	+	-	-	Mauvais	Décrémenter V$_{ref} = V_{ref} - \triangle V$
4	-	+	-	Bon	Décrémenter V$_{ref} = V_{ref} - \triangle V$

TAB. II.1 : Principe de l'algorithme PO [28].

En somme, cette méthode permet de déterminer le point de puissance maximale pour un niveau d'ensoleillement, une température ou un niveau de dégradation des caractéristiques donné.

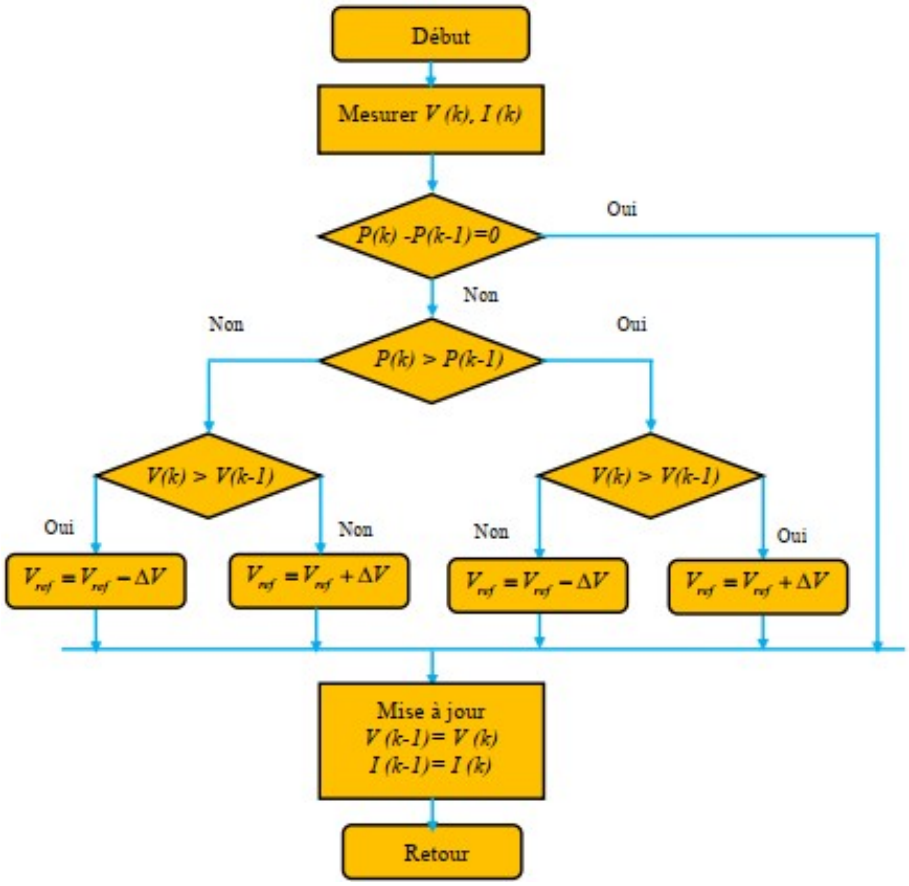

Fig. II.18 : Organigramme de la méthode PO[28]

II.11 Interface d'électronique de puissance pour PV

II.11.1 Connexion GPV-charge

II.11.1.1 Connexion directe

La méthode la moins coûteuse et la plus courante pour faire fonctionner un panneau solaire photovoltaïque est de le connecter directement à une charge. Le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté, ce qui est déterminé par l'intersection entre la caractéristique I-V du GPV et la caractéristique I-V de la charge. Pour empêcher le courant de retour vers le GPV, il est nécessaire de placer une diode anti-retour, comme indiqué dans la figure **Fig. II.19** [29]

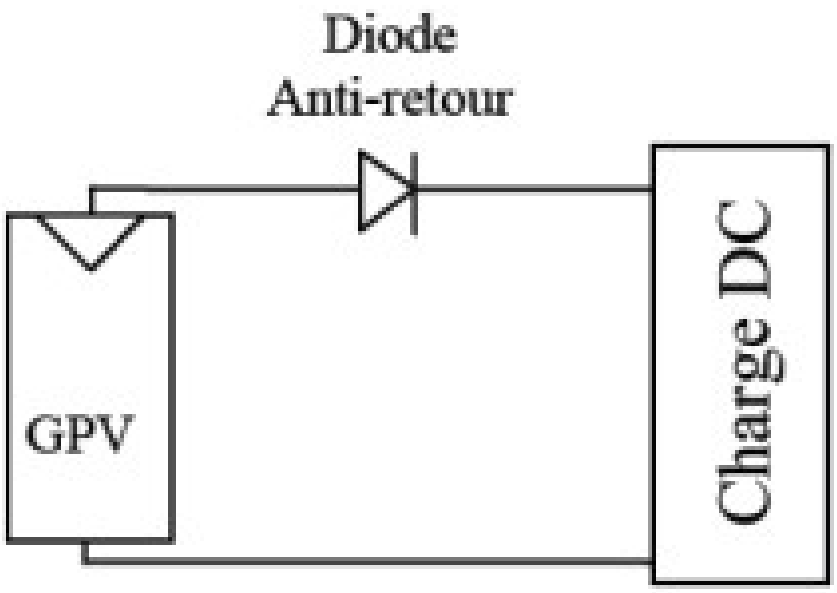

Fig. II.19 : Connexion directe GPV-Charge [29]

Cette configuration ne permet pas de limiter ou de réguler la tension de la charge. Elle ne garantit pas non plus le transfert de la puissance maximale disponible du GPV vers la charge, comme le montre la figure **FIG. II.20** [29]

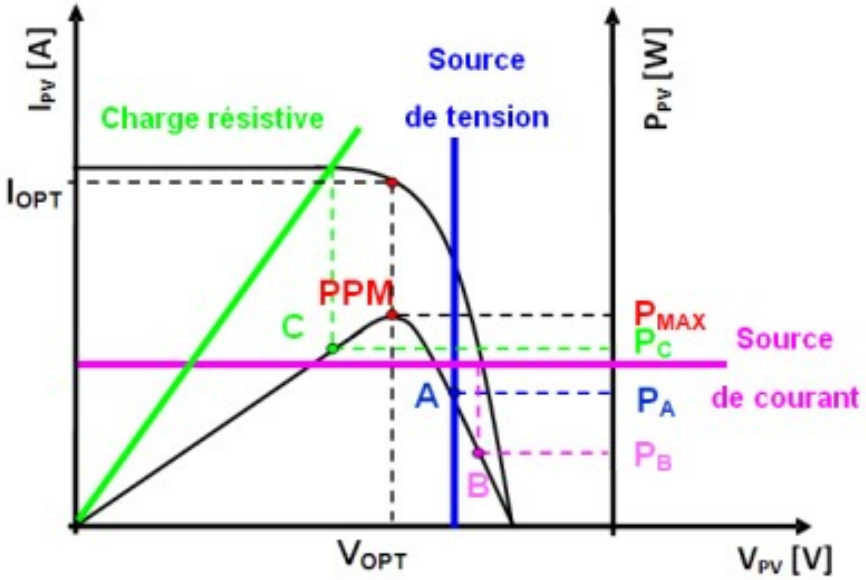

Fig. II.20 : Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge en connexion directe [29]

Selon la figure **FIG. II.20** , il est possible de connecter directement trois types de charges à un GPV :

- Une charge de type source de tension continue

- Une charge de type source de courant continu
- Une charge purement résistive

Aux points de fonctionnement A, B et C, la puissance fournie par le générateur est respectivement P_A, P_B et P_C, mais ces valeurs sont inférieures à la puissance maximale P_MAX. La différence de puissance sera donc perdue et dissipée dans le générateur sous forme de chaleur.[29]

Cependant, certains types de charges nécessitent une source de tension alternative, tandis que le GPV fournit un courant continu. Dans ce cas, une connexion directe est impossible.

L'utilisation de la connexion directe est donc limitée en raison des pertes de production qu'elle entraîne et des limites de ses applications à des récepteurs fonctionnant en courant continu.[29]

II.11.1.2 Connexion via un étage d'adaptation

Comme mentionné précédemment, les courbes I(V) d'un générateur photovoltaïque (GPV) présentent des points de puissance maximum non linéaires. Ces caractéristiques varient en fonction de l'éclairement et de la température de la cellule. Pour maximiser la puissance disponible aux bornes du GPV et la transférer à la charge, il est donc nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation, comme illustré dans la figure **Fig. II.21**.

Cet étage joue le rôle d'une interface entre les deux éléments en utilisant un système de contrôle pour extraire le maximum de puissance fourni par le générateur.[30]

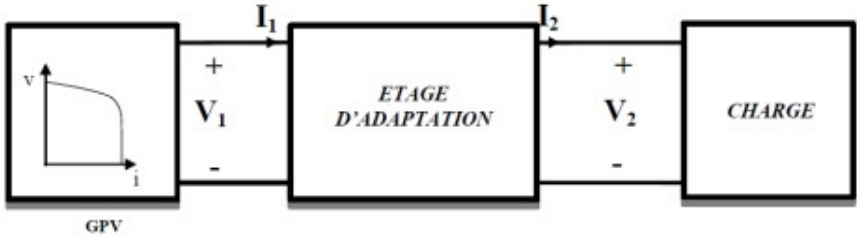

Fig. II.21 : Connexion d'un GPV à une charge à travers un étage d'adaptation [30]

II.11.2 Constitution d'un système photovoltaïque

II.11.2.1 Convertisseur DC/DC

Les régulateurs de commutation, appelés convertisseurs **DC/DC**, utilisent des interrupteurs électroniques tels que le thyristor, le transistor de puissance ou l'IGBT, qui produisent peu de pertes de puissance lors de la transition d'un état à l'autre. Ces convertisseurs ont des rendements élevés de conversion d'énergie et peuvent fonctionner à des fréquences élevées, ce qui améliore leurs caractéristiques dynamiques. [31]

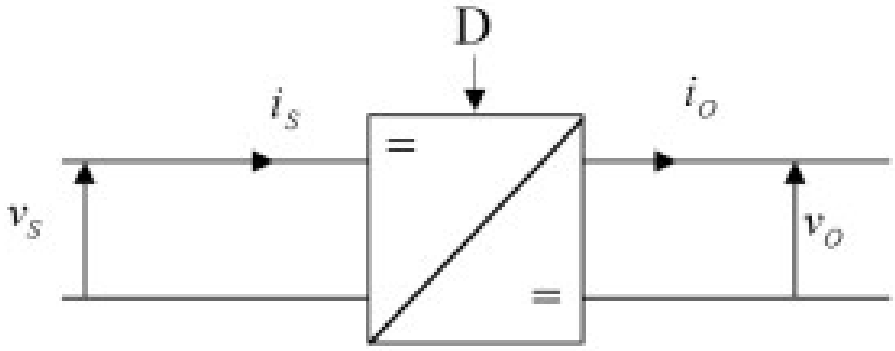

Fig. II.22 : Symbole d'un hacheur DC/DC [31]

Le rapport cyclique est représenté par la lettre D. Le convertisseur **DC/DC**, qui relie la source de tension continue à la charge, est illustré dans la Figure 23 et est considéré comme un transformateur de grandeurs électriques continues. Les performances du convertisseur **DC/DC** lui permettent de réguler la tension de sortie **DC** malgré les variations de charge et de ligne, tout en réduisant les harmoniques de la tension de sortie **DC** en dessous du niveau toléré. Plusieurs types de convertisseurs **DC/DC** sont disponibles sur le marché.

Convertisseur abaisseur (Buck) Le convertisseur abaisseur **DC/DC**, présenté dans **FIG. II.23**, permet de réduire la tension d'entrée V_s en une tension plus faible V_o.

Il est composé d'un interrupteur **S**, d'une diode **D** pour protéger l'interrupteur, et d'un filtre inductif **L**. La tension et le courant de sortie sont déterminés par le rapport cyclique et la fréquence de commutation. [32]

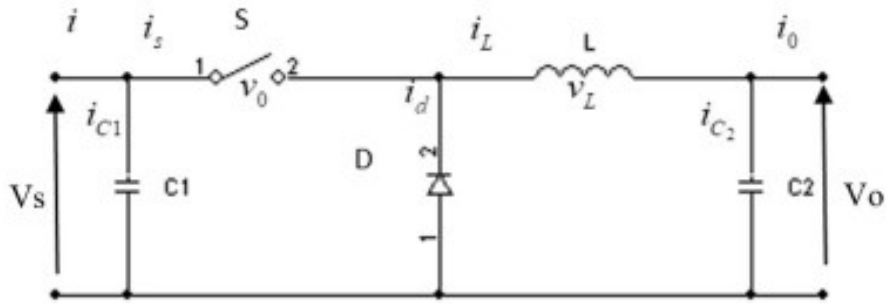

Fig. II.23 : Circuit électrique de Hacheur abaisseur(buck) [32]

$$M(D) = \frac{V_0}{V_S} = D \tag{II.19}$$

et

$$M(D) = V_0/V_s \tag{II.20}$$

Convertisseur élévateur (Boost) Le schéma du convertisseur élévateur **« Boost »** est montré dans la figure **Fig. II.24**.

Ce dispositif permet de convertir une tension continue d'entrée en une tension de sortie plus élevée. Il est constitué d'un interrupteur **(S)**, d'une inductance **(L)**, d'une diode pour protéger l'interrupteur en empêchant le retour du courant, et d'un condensateur **C2** qui sert à lisser la tension de sortie. [33]

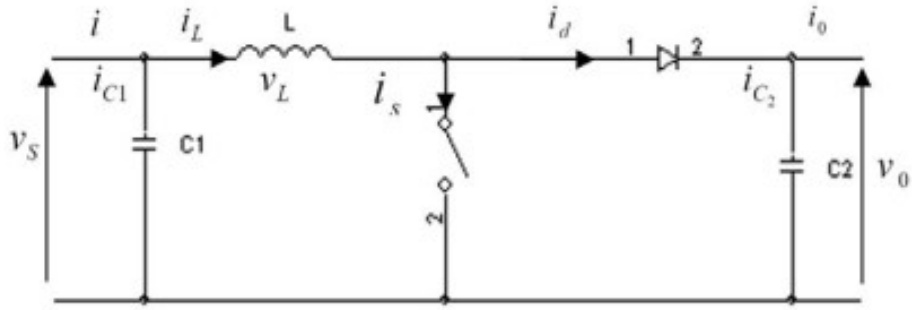

Fig. II.24 : Circuit électrique de Hacheur élévateur (Boost) [33]

Le rapport de conversion M(D) est exprimé comme suit :

$$M(D) = \frac{V_0}{V_S} = \frac{1}{1-D} \tag{II.21}$$

Convertisseur élévateur - abaisseur (Buck-Boost) Le dispositif illustré dans la figure **FIG. II.25**, connu sous le nom de convertisseur dévolteur-survolteur, est capable de transformer une tension continue d'entrée en une tension de sortie spécifique en combinant les fonctionnalités des deux types de convertisseurs précédemment décrits. [34]

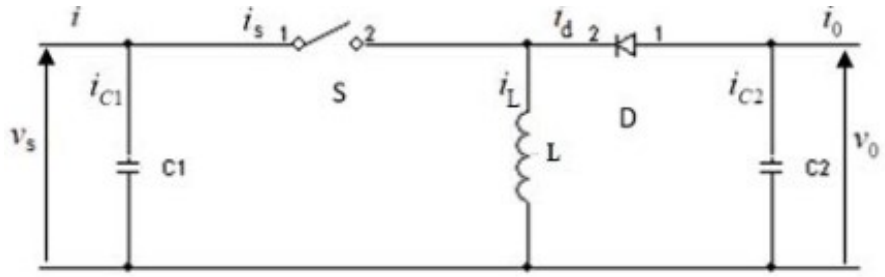

Fig. II.25 : Circuit équivalent du convertisseur Buck-Boost [34]

Récapitulatif d'analyse et choix du convertisseur Lorsqu'il s'agit de convertir l'électricité produite par un panneau solaire PV qui est de basse tension et continue il est recommandé d'utiliser un convertisseur élévateur de tension pour adapter l'impédance entre la source et la charge. Le convertisseur Buck-Boost peut être utilisé pour remplir cette fonction d'élévation de tension, à condition que leur rapport cyclique soit supérieur à la moitié. Bien que la topologie Boost soit la plus simple en termes de complexité, les contraintes en tension et en courant sur les interrupteurs et les diodes sont similaires pour toutes les topologies d'élévation de tension. [34]

II.11.2.2 Onduleur PV

L'onduleur **DC/AC** aussi appelé convertisseur, il permet de convertir la puissance continue générée par les panneaux solaires en puissance alternative pouvant être injectée dans le réseau électrique. Il se compose d'un contrôleur **MPPT** qui suit le point de fonctionnement optimal des panneaux PV, d'un pont qui convertit l'électricité continue en électricité alternative, et d'un transformateur. L'onduleur garantit une fréquence de sortie prédéfinie de **50 Hz ou 60 Hz**.[35] En fonction de la configuration du champ photovoltaïque, l'onduleur PV peut être conçu selon plusieurs topologies, comme illustré dans la Figure **FIG. II.26** :

- L'onduleur intégré (modulaire), qui est utilisé pour de très petites configurations de champ (un module) dont la puissance est de l'ordre de **50-400 W**.
- Les onduleurs à branches, utilisés dans des petites configurations de champ de **0,4-2 kW**.
- Les onduleurs à multi-branches, conçus pour des configurations de champ de taille moyenne de **1,5-6 kW**.
- L'onduleur mini-central, utilisé dans les installations dont la puissance dépasse **6 kW** avec une topologie triphasée.
- L'onduleur central, de topologie triphasée conçu pour les grands champs photovoltaïques d'une puissance allant de 100 à 1000 kW . [35]

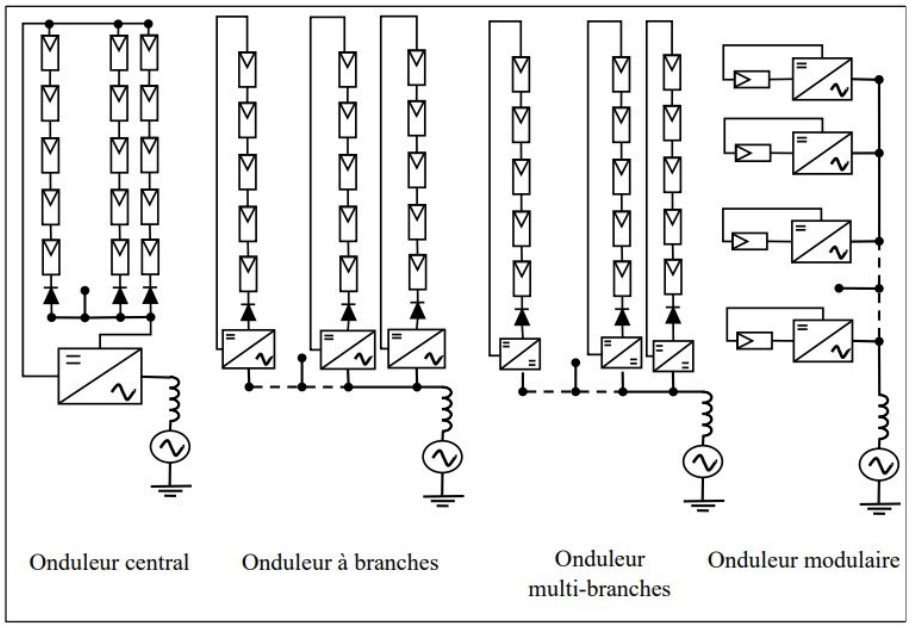

Fig. II.26 : Topologie des onduleurs PV [35]

II.11.2.3 Onduleurs triphasés

La plupart des onduleurs PV triphasés utilisent une topologie à quarts de fils plutôt que trois fils, leur permettant ainsi de fonctionner comme trois onduleurs monophasés indépendants.

Cependant, la topologie à trois fils de l'onduleur triphasé pose un problème : pour obtenir une tension triphasée du réseau de **400 V**, la tension **DC** doit être relativement élevée, d'au moins **600 V**. En revanche, les onduleurs monophasés nécessitent une tension **DC** d'au moins **400 V**, offrant ainsi une plus grande flexibilité grâce à une large plage de variation. [36]

Onduleurs en pont triphasé avec convertisseur Boost La Figure **Fig. II.27** illustre que l'onduleur est doté de trois entrées indépendantes, chacune constituée d'un filtre pour éliminer les interférences électromagnétiques et d'un hacheur Boost. Bien que seule une entrée soit représentée dans la figure **Fig. II.27**, les trois convertisseurs Boost sont connectés en parallèle sur un pont triphasé (3 demi-ponts).

Ce pont convertit ensuite le courant continu **(DC)** fourni par le convertisseur **DC/DC** en courant alternatif **(AC)** en utilisant la technique **PWM** avec une fréquence fondamentale de **50 Hz**. Le point milieu (B) des condensateurs situés juste avant le pont triphasé est raccordé au neutre du réseau. Enfin, un filtre élimine les harmoniques à hautes fréquences pour obtenir une onde sinusoïdale. [36]

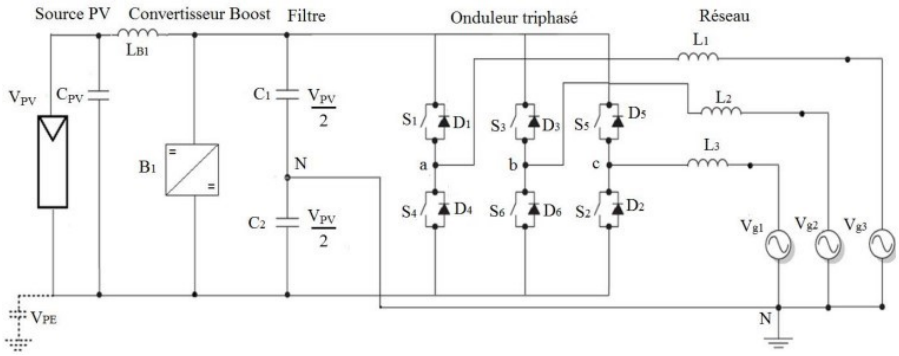

Fig. II.27 : Onduleur triphasé doté d'un convertisseur Boost à pont HB[36]

II.12 La machine asynchrone

La machine asynchrone à induction utilise un principe de champ tournant simple qui lui permet de fonctionner sans nécessiter de contacts électriques glissants. Cette caractéristique en fait une machine extrêmement robuste et facile à entretenir, ce qui la rend très adaptée aux applications nécessitant une variation de vitesse.

Notre étude se limite au fonctionnement moteur de la machine à induction. Celle-ci est composée de deux parties principales : le stator, qui est la partie fixe, et le rotor, qui est la partie en rotation.[37]

II.12.1 Composants du moteur asynchrone

II.12.1.1 Stator

Le stator des moteurs asynchrones triphasés est constitué d'un circuit magnétique en forme de couronne avec des encoches pour les conducteurs, créant ainsi le champ tournant nécessaire au fonctionnement du moteur.[37]

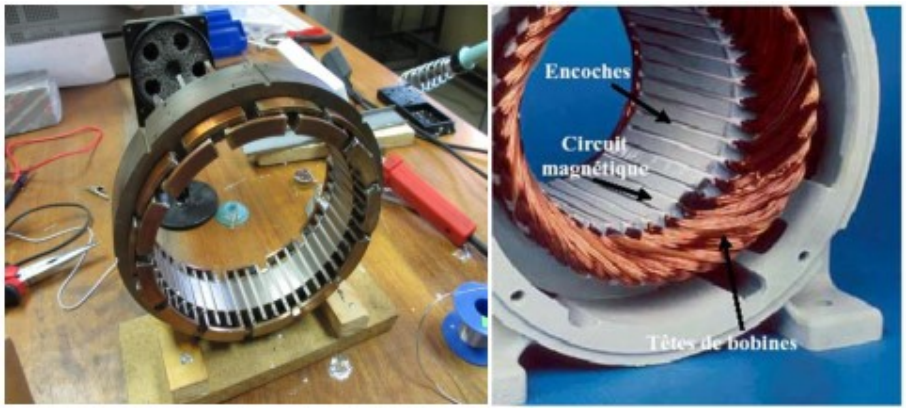

Fig. II.28 : Exemple de stator d'une Machine asynchrone [37]

II.12.1.2 Rotor

Les machines asynchrones utilisent deux types de rotors : la cage d'écureuil, composée de conducteurs courts-circuits en aluminium ou en cuivre, largement utilisée en tant que moteurs pour sa simplicité et son coût abordable et le rotor bobiné, avec un système de bobinage triphasé et des contacts glissants pour ajuster le couple de démarrage, la vitesse du moteur et réduire le courant de démarrage, mais à un coût plus élevé.[37]

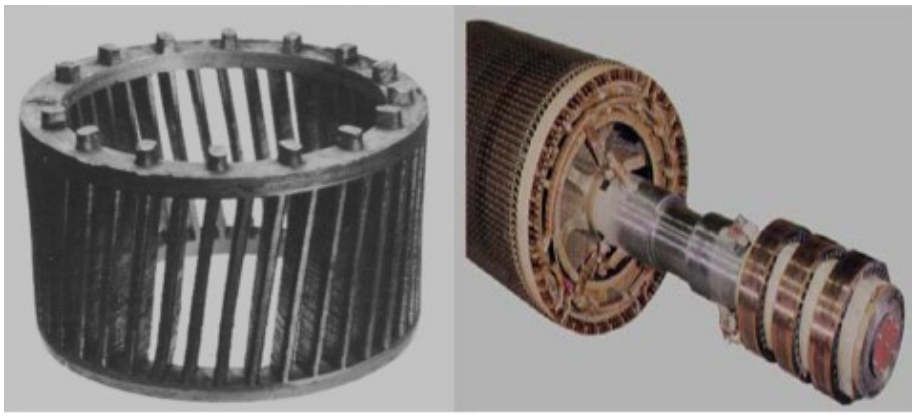

Fig. II.29 : Exemple de rotor d'une Machine asynchrone [37]

II.12.2 Principes de fonctionnement

Le stator alimenté par un réseau électrique de fréquence **f** génère un champ magnétique tournant B_s avec une vitesse N_s où N_s = f/p, induisant des forces électromotrices dans les conducteurs du rotor immobile **(loi de Faraday e = dϕ/dt)**. Les courants rotoriques se forment, créant un couple de démarrage qui fait tourner le rotor **(loi de Lenz)**. Pour cela, les circuits du rotor doivent être fermés et la vitesse du rotor doit différer de la vitesse du champ magnétique du stator.[37]

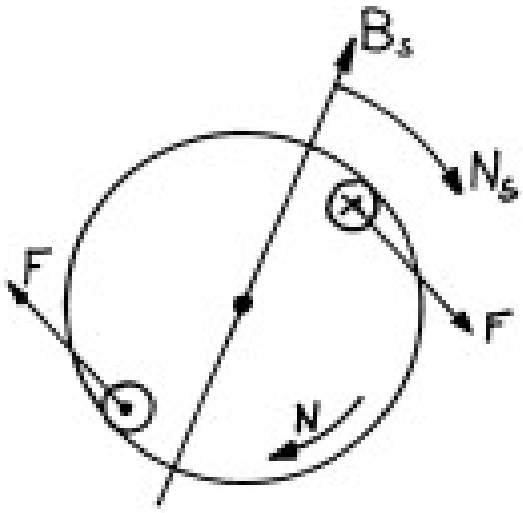

Fig. II.30 : Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone [37]

II.12.2.1 Glissement

Les courants rotoriques sont engendrés par la différence entre les vitesses N_s et N. Pour quantifier cette différence, on utilise une grandeur fondamentale appelée glissement g, qui est une valeur sans dimension.[37]

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \tag{II.22}$$

Notons que :
N=0 , g=1 démarrage
N=N_s , g=0 synchronisme
0<N , <N_s 0<g<1 moteur
N>N_s , g<0 génératrice

II.12.2.2 Fréquences rotoriques

La vitesse relative entre l'induction statorique et le rotor peut être exprimée comme suit :

$$N_s - N = g.N_s \tag{II.23}$$

En conséquence, le rotor ayant p paires de pôles, la fréquence des forces électromotrices (f.é.m.) et des courants est donnée par :

$$f_R = p.(g.N_s) \tag{II.24}$$

et comme

$$N_s = f/p, \tag{II.25}$$

Alors

$$f_R = g.f \tag{II.26}$$

La fréquence des grandeurs électriques du rotor est directement proportionnelle au glissement. En général, lorsque le glissement est faible, la fréquence des grandeurs rotoriques est également faible, se situant dans la plage de quelques hertz.[39]

$$\left(\frac{f_R}{p}\right) = \left(\frac{g \cdot f}{p}\right) = g \cdot N_S \tag{II.27}$$

Par conséquent, l'induction rotorique tourne également à la vitesse N_s par rapport au stator :

$$g \cdot N_S + N = N_S \tag{II.28}$$

Indépendamment de la vitesse du rotor, les inductions statoriques et rotoriques ont toujours la même vitesse N_s. Le couple électromagnétique est ainsi généré à la vitesse N_s, tout comme dans une machine synchrone, et est transmis au rotor. Selon les lois de la dynamique, en régime permanent (N = constante), ce couple est égal au couple mécanique résistant Cm auquel le rotor est opposé.[37]

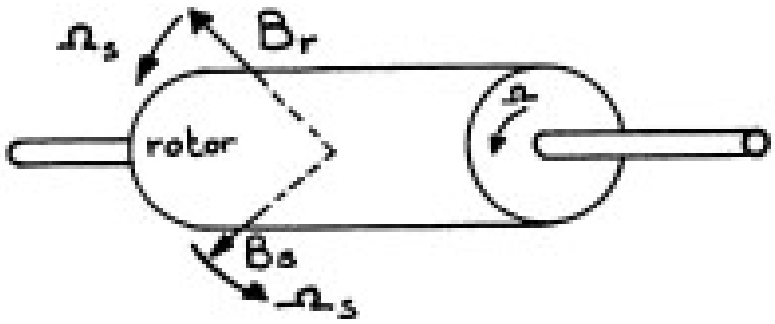

Fig. II.31 : Les champs rotoriques et statoriques d'une machine asynchrone tournent à la même vitesse [37]

II.13 La pompe

Une pompe est utilisée pour augmenter la pression d'un fluide en convertissant l'énergie mécanique fournie par un moteur en énergie hydraulique. Les pompes centrifuges et

volumétriques sont les types les plus couramment utilisés avec les pompes centrifuges préférées pour les systèmes de dessalement d'eau par osmose inverse.

Le choix entre les deux dépendent de l'application et du type de source d'eau avec les pompes centrifuges adaptées aux profondeurs constantes et les pompes volumétriques ayant un débit indépendant de la profondeur mais proportionnel à la vitesse de rotation. Pour notre application, nous préférons initialement opter pour une pompe centrifuge, qui est généralement la plus couramment utilisée, en particulier dans les systèmes de dessalement d'eau par osmose inverse **(RO)**. [38]

II.13.1 Pompe centrifuge dans le système de dessalement (RO)

Les pompes centrifuges sont le type de pompe le plus fréquemment utilisé dans différentes applications industrielles, y compris le traitement de l'eau et les solutions aqueuses .

Dans les systèmes de dessalement par osmose inverse **(RO)**, les pompes centrifuges conçues pour fonctionner à vitesse variable sont largement utilisées. Elles permettent de convertir la vitesse de rotation du moteur à induction en un débit d'eau à haute pression. La simplicité de leur construction, avec peu de pièces mobiles, les rend très fiables et robustes.[38]

II.13.2 Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge

Une pompe centrifuge utilise une roue ou un rotor pour déplacer le liquide de l'aspiration vers le refoulement. Lorsque le liquide entre en contact avec les aubes, l'énergie mécanique se transforme en énergie hydraulique, principalement sous forme d'augmentation du moment cinétique. La pompe est composée d'une roue, d'un diffuseur et de canaux de retour. En tournant à grande vitesse, la roue expulse le liquide vers le diffuseur grâce à la force centrifuge, évacuant ainsi le liquide et aspirant automatiquement les particules fluides à l'aspiration.[38]

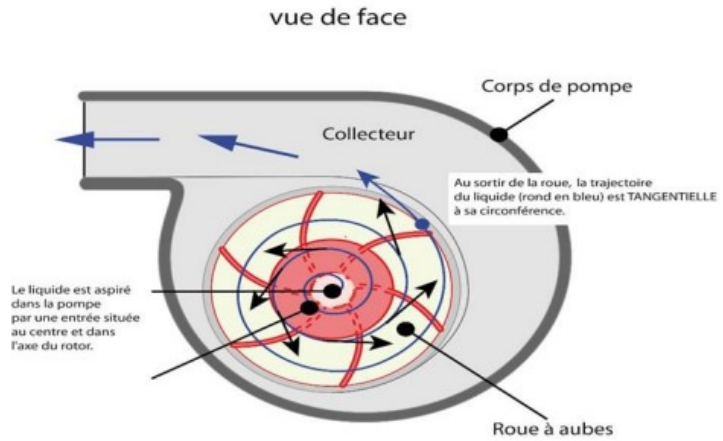

Fig. II.32 : Constitution d'une pompe centrifuge [38]

II.13.3 Sous système moteur-pompe

La pompe centrifuge à vitesse variable est largement préférée dans de nombreuses applications industrielles, telles que le traitement de l'eau et les solutions aqueuses .

Elle permet de convertir la vitesse de rotation du moteur à induction en un débit d'eau à haute pression. Grâce à sa conception simple et à son faible nombre de pièces mobiles, elle présente une grande fiabilité et une robustesse notable.[38]

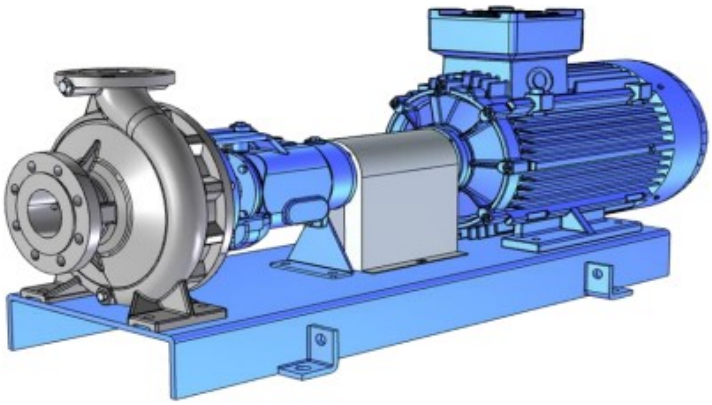

Fig. II.33 : Pompe centrifuge [38]

II.14 Conclusion

Ce chapitre a exploré le potentiel solaire, la conversion photovoltaïque et les caractéristiques du générateur photovoltaïque (GPV). Nous avons également examiné l'impact de certains paramètres sur les performances du GPV.

Pour un fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque, un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge est essentiel. Le prochain chapitre se concentrera sur cet aspect, en mettant en évidence les différents algorithmes de suivi du point de puissance maximale **(MPPT)**.

L'onduleur joue un rôle clé en tant que deuxième étage d'adaptation, convertissant la tension continue en tension alternative pour alimenter les charges, telles que les machines asynchrones utilisées comme moteurs de pompes.

En résumé, ce chapitre en mettant en évidence l'importance de l'étage d'adaptation, des algorithmes **MPPT**, de l'onduleur et des machines asynchrones, le chapitre a posé les bases pour comprendre le fonctionnement d'un système photovoltaïque et a souligné l'importance de l'étage d'adaptation, des algorithmes **MPPT**, et de l'onduleur. Ces éléments sont essentiels pour optimiser la conversion de l'énergie solaire. Les chapitres suivants approfondiront ces sujets pour une meilleure compréhension et une amélioration des performances des systèmes photovoltaïques.

Chapitre III

Fonctionnement et dimensionnement de la station renouvelable

III.1 Introduction

Le dessalement de l'eau de mer est devenu une solution cruciale pour répondre à la demande croissante en eau douce dans le monde. Parmi les technologies de dessalement disponibles, l'osmose inverse alimentée par l'énergie solaire photovoltaïque se présente comme une approche durable et prometteuse. Cette introduction se concentre sur le fonctionnement d'une station de dessalement par osmose inverse alimentée par photovoltaïque, ainsi que sur le dimensionnement du système photovoltaïque nécessaire pour assurer son fonctionnement efficace.

L'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque dans le fonctionnement d'une station de dessalement par osmose inverse présente de nombreux avantages. Les panneaux solaires convertissent l'énergie solaire en électricité fournissant une source d'énergie renouvelable pour le dessalement. Cela permet de réduire la dépendance aux combustibles fossiles, de minimiser les émissions de gaz à effet de serre et de rendre le processus plus respectueux de l'environnement.

Le dimensionnement précis du système photovoltaïque est essentiel pour assurer le fonctionnement efficace de la station de dessalement par osmose inverse alimentée par l'énergie solaire. Cela comprend l'évaluation des besoins énergétiques, la capacité de production d'eau douce requise et la disponibilité d'énergie solaire dans la région. Les variations saisonnières et diurnes de l'ensoleillement doivent également être prises en compte pour garantir une production d'énergie adéquate.

Ce chapitre se propose donc de fournir une description détaillée du fonctionnement d'une station de dessalement par osmose inverse alimentée par l'énergie solaire photovoltaïque, ainsi que des étapes nécessaires pour dimensionner le système photovoltaïque correspondant. Nous examinerons les composants clés de la station. De plus, nous discuterons des méthodes et des calculs utilisés pour dimensionner le système photovoltaïque en fonction des besoins spécifiques de la station de dessalement.

III.2 Description de l'installation du site UTE Desaladora de Skikda

La station de dessalement d'eau de mer **UTE Desaladora de Skikda**, construite en 2008 par le groupe espagnol **GEIDA à DIARE CHITANE**, a une capacité de production de **100 000** m^3 par jour grâce à l'osmose inverse. Son principal client est **SONATRACH**, via l'algérienne des eaux (ADE). L'énergie électrique est fournie par **SONELGAZ**, avec une consommation de **3,56 kWh par** m^3. Le prix de vente de l'eau est de **0,70 USD par** m^3.[39]

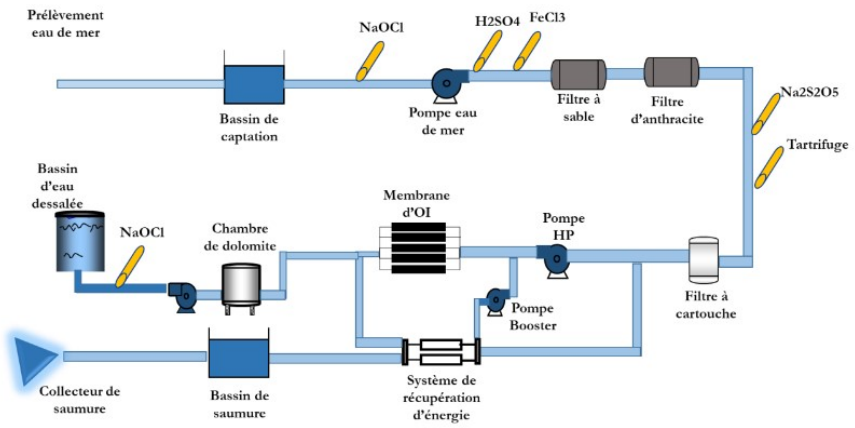

FIG. III.1 : Schéma de la station de dessalement de Skikda [39].

La station de dessalement d'eau de mer de Skikda comprend plusieurs éléments importants :

1. Une tour de captation d'eau de mer située à **1200 mètres** du rivage.
2. Une section de pompage d'eau de mer comprenant deux batardeaux de mer, deux filtres rotatifs, un bassin de pompage et six pompes d'eau de mer, chacune ayant une capacité de **1800** m^3**/h**.
3. Une première filtration comprenant vingt-cinq filtres à sable, chacun ayant une capacité de **100** m^3.
4. Une deuxième filtration comprenant quinze filtres à anthracite (sable et charbon), chacun ayant une capacité de **100** m^3.
5. Une dernière filtration nanométrique comprenant dix filtres à cartouches, chaque filtre étant composé de **270 cartouches**.
6. Cinq châssis pour l'osmose inverse, où a lieu la séparation entre le sel et l'eau. Chaque châssis a une capacité de production de **20 000** m^3 par jour ce qui donne une capacité de production totale de **100 000** m^3 par jour pour les cinq châssis.
7. Une série de dix tours de dolomite (calcite) pour la reminéralisation de l'eau. [39]

La Figure **Fig. III.2** représente les principaux éléments d'une installation d'osmose inverse, qui comprennent :

- Les modules.
- La membrane semi-perméable.
- Les pompes.
- Le système de prétraitement.
- Un système de récupération d'énergie.
- Le poste traitement.

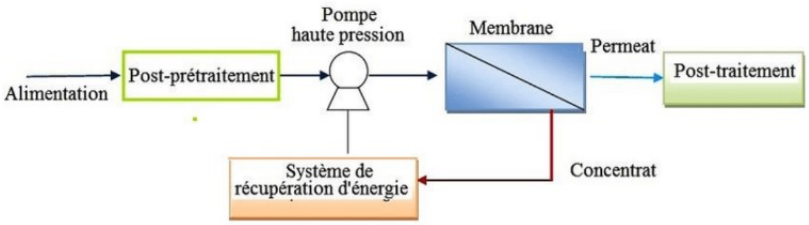

Fig. III.2 : Schéma d'une unité d'osmose inverse [39].

III.3 L'osmose inverse alimentée par énergie solaire (PV-RO)

La technologie d'osmose inverse alimentée par énergie PV (PV-RO) est devenue une technologie mature et commercialement disponible avec les tout premiers projets combinant les deux technologies ayant vu le jour dans les années 1980. Une vue schématique d'un système PV-RO est présentée dans la figure **Fig. III.3**.

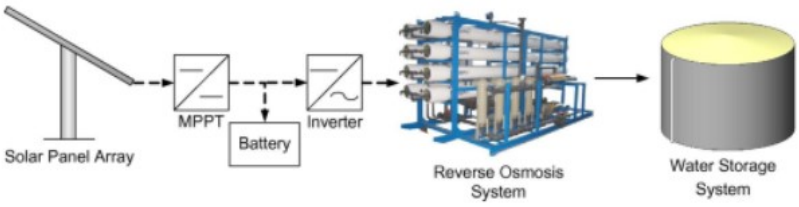

Fig. III.3 : Schéma d'un système d'OI actionné par des panneaux solaires [39].

La faisabilité des systèmes **PV-RO** dépend non seulement de la variation de l'irradiation solaire mais aussi du type d'eau utilisée, de la taille du système et des politiques gouvernementales. Cependant, l'applicabilité plus large de la technologie **PV-RO** à grande échelle et à petite échelle reste limitée par les coûts élevés de l'énergie qui doivent être résolus en améliorant l'efficacité énergétique des systèmes **PV-RO**. [40]

Les défis et les opportunités des systèmes de purification d'eau alimentés par PV sont récemment discutés et un concept de combinaison d'une usine de filtration par membrane avec une alimentation électrique PV est décrit. Une étude de faisabilité technico-économique de trois conceptions alternatives d'une unité de dessalement PV-RO pour fournir 20 m^3/jour pour les zones isolées des Émirats arabes unis a récemment été réalisée. Les résultats ont montré que l'unité fonctionnant uniquement avec des panneaux solaires sans batterie de secours est très compétitive.[40]

III.4 Présentation du central d'Oued el Kebrit

La Central **d'Oued el Kebrit** est une centrale photovoltaïque située au sud de la wilaya de **Souk Ahrass**, à environ **160 km d'Annaba**.

Construite par une société chinoise, elle représente un investissement de **288 millions de dinars algériens**. Cette installation fait partie du projet SKTM visant à atteindre une capacité totale de **400 MW**.

La centrale est composée de 60 060 panneaux photovoltaïques, répartis sur **30 hectares**, et elle produit une puissance de 15 MW_c. Avec un rendement de seulement **15%**, cela se traduit par :

- **4 004 panneaux polycristallins** dans chaque sous-champ, inclinés à **32,5 degrés**.
- **91 matrices**, chacune comprenant 44 panneaux, avec une tension de **655,6 V** et un courant de **16,78 A**.
- Les **22 panneaux** sont connectés en série, fournissant une tension totale de **655,6 V**.
- La centrale dispose de **15 onduleurs** qui convertissent la tension d'entrée de **655 V** en une tension de sortie de **315 V**
- Elle est également équipée de 15 transformateurs qui élèvent la tension de sortie à **30 kV**.

III.5 Approche d'alimentation photovoltaïque pour un module de dessalement à la station de Skikda, alimentée par une centrale photovoltaïque externe

III.5.1 Hypothèses de travail

- **Module de dessalement sélectionné :** Un module spécifique de la station de Skikda ayant une capacité de production de **20 000** m^3**/jour**.
- **Pompes incluses :** Le module est équipé de quatre pompes essentielles : pompe haute pression **(HP)**, pompe basse pression **(BP)**, pompe booster et pompe de nettoyage chimique.
- **Exclusion de certaines consommations :** Les autres consommations de la station telles que l'éclairage, l'administration, la salle de contrôle, l'armoire électrique, ne sont pas prises en compte dans cette étude.
- **Source d'alimentation photovoltaïque :** Une centrale photovoltaïque externe, telle que la centrale d'Oued el Kebrit.

III.5.2 Description du système proposé

L'approche consiste à utiliser une centrale photovoltaïque externe pour alimenter les besoins énergétiques du module de dessalement spécifique à la station de Skikda. Le système photovoltaïque sera conçu pour alimenter uniquement les pompes essentielles du module de dessalement, à savoir la pompe haute pression **(HP)**, la pompe basse pression **(BP)**, la pompe booster et la pompe de nettoyage chimique.

Le système photovoltaïque sera composé de panneaux PV, d'onduleurs, des composants de conversion et de distribution de l'énergie électrique. Les panneaux solaires convertiront l'énergie solaire en électricité, qui sera utilisée pour alimenter directement le module de dessalement.

Les hypothèses de travail, telles que la capacité du module, les pompes sélectionnées et l'exclusion des autres consommations de la station, ont été établies pour simplifier l'étude et se concentrer sur les besoins énergétiques spécifiques du module de dessalement. Ces hypothèses peuvent être ajustées ou complétées en fonction des spécifications réelles du système et des contraintes techniques et opérationnelles de la station.

Des études plus détaillées seront nécessaires pour déterminer les caractéristiques spécifiques du système photovoltaïque.

III.5.3 Paramètres du système proposé

La station de dessalement d'eau de mer par osmose inverse alimentée par l'énergie solaire photovoltaïque est une installation qui utilise le pouvoir du soleil pour produire de l'eau douce à partir de l'eau de mer. Elle se compose de différents composants clés :

Système photovoltaïque Tout d'abord, le système photovoltaïque est installé pour capturer l'énergie solaire et la convertir en électricité qui est constitué de :

- Panneaux PV.
- Régulateur de charge (MPPT).
- Onduleur.
- Câbles et connecteurs.
- Structures de montage.

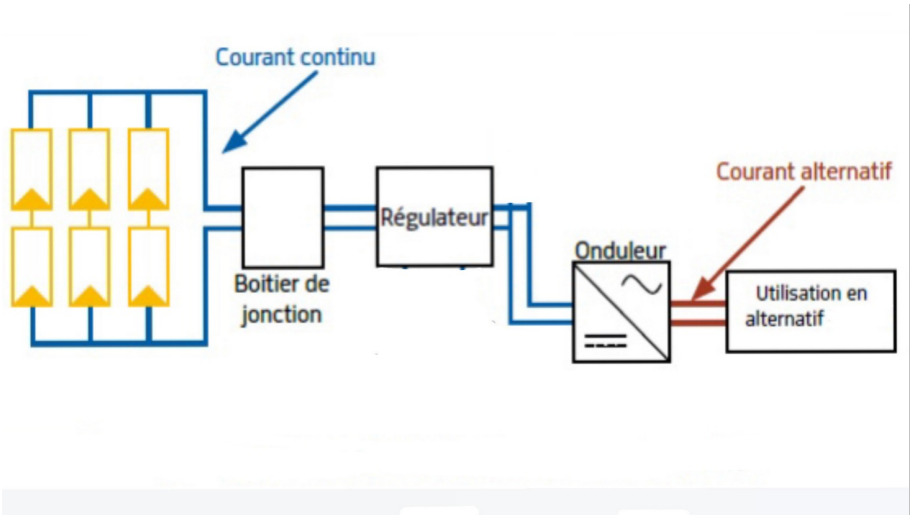

FIG. III.4 : Synoptique d'une installation photovoltaïque autonome

Système de pompage La station comprend une pompe basse pression **(BP)** est utilisée pour fournir de l'eau brute, c'est-à-dire de l'eau de mer non traitée à la station. Cette pompe achemine l'eau de mer vers la pompe haute pression.

Puissance du moteur	400 kW
Tension	3.6 kV
Courant nominal	78A
Facteur de puissance	0.82
Rendement	87 %

TAB. III.1 : Caractéristique de la pompe (BP)

Unité d'osmose inverse Une pompe haute pression **(HP)** qui est responsables de la pressurisation de l'eau de mer. Cette pressurisation facilite le processus d'osmose inverse au cours duquel l'eau de mer est forcée à travers une membrane semi-perméable permettant de séparer les impuretés et le sel de l'eau produisant ainsi de l'eau douce.[39]

Puissance du moteur	2000 kW
Tension	3.6 kV
Courant nominal	391 A
Facteur de puissance	0.82
Rendement	86 %

TAB. III.2 : Caractéristique de la pompe (HP)

Une pompe booster dans le but d'augmenter la pression de l'eau de mer pour permettre son passage à travers la membrane d'osmose inverse facilitant ainsi la séparation des impuretés et la production d'eau douce.

Puissance du moteur	186 kW
Tension	3.6 kV
Courant nominal	36 A
Facteur de puissance	0.82
Rendement	86 %

Tab. III.3 : Caractéristique de la pompe booster

Une pompe de nettoyage chimique est utilisée pour injecter des produits chimiques de nettoyage dans le système afin de dissoudre et d'éliminer les dépôts et les contaminants accumulés sur la membrane, assurant ainsi le bon fonctionnement et la longévité du système.[39]

Puissance du moteur	400 kW
Tension	3.6 kV
Courant nominal	78A
Facteur de puissance	0.82
Rendement	87 %

Tab. III.4 : Caractéristique de la pompe de nettoyage

Membranes d'osmose inverse : Les membranes d'osmose inverse sont le cœur de l'unité d'OI. Elles sont responsables de la séparation de l'eau de mer en deux flux : le flux d'eau douce (perméat) et le flux de saumure (concentrat).

Un élément important de la station est l'échangeur de pression. Cet appareil permet de récupérer l'énergie potentielle de l'eau sous haute pression après son passage à travers les membranes d'osmose inverse. [39]

III.6 Fonctionnement de la station renouvelable proposé

La station de dessalement proposé fonctionne de manière renouvelable en utilisant un système d'alimentation photovoltaïque. Ce système est conçu pour répondre aux besoins énergétiques spécifiques du module de dessalement en se concentrant sur les pompes essentielles du processus.

Le fonctionnement de la station est le suivant : lorsqu'il y a suffisamment de luminosité solaire, les panneaux solaires convertissent cette énergie en électricité. Cette électricité est ensuite utilisée pour alimenter les pompes du module de dessalement, à savoir la pompe haute pression **(HP)**, la pompe basse pression **(BP)**, la pompe booster et la pompe de nettoyage chimique.

Pendant les heures de fonctionnement normales du champ PV, qui sont de 8 heures par jour, si la puissance produite par les panneaux solaires dépasse la puissance consommée

par les pompes, un surplus d'énergie est récupéré. Dans ce cas, ce surplus de puissance est injecté dans le réseau électrique, ce qui permet de contribuer à l'alimentation électrique globale de la région.

D'autre part, si la puissance récupérée d'après le champ photovoltaïque est inférieure à la puissance requise pour faire fonctionner les pompes et ne suffit donc pas à couvrir les besoins énergétiques, la puissance produite par les panneaux PV est également injectée dans le réseau. Cela permet de compenser partiellement la consommation d'électricité provenant d'autres sources et contribue à l'efficacité énergétique de la station.

Il convient de noter que la durée d'ensoleillement du système proposé est dimensionnée pour fonctionner pendant 8 heures par jour, conformément aux heures de fonctionnement normales de la station produisant environ de 6400 m^3 par jour de l'eau douce qu'est plus deux fois supérieur à celle de la station de déssalement de **Tigzit** Wilaya **Tizi Ouzou** avec une capacité de 5000 m^3 Toutefois, les jours où l'ensoleillement est supérieur à 8 heures, deux options peuvent être envisagées :

1. Injection dans le réseau électrique : Les heures d'ensoleillement supplémentaires, qui se situent au-delà de la période de fonctionnement normal de **8 heures**, permettent de générer un surplus d'énergie. Ce surplus peut être injecté dans le réseau électrique pour bénéficier à d'autres consommateurs de la région.

2. Continuité de la production d'eau douce : Une autre possibilité consiste à utiliser l'énergie excédentaire pour continuer la production d'eau douce. Dans ce cas, la quantité d'eau produite pendant les heures supplémentaires peut être distribuée en plus de la quantité visée ou stockée dans un réservoir de stockage. La décision entre ces deux options dépend de la taille du réservoir de stockage et des besoins en eau de la région

L'absence de batteries dans le système d'alimentation photovoltaïque de la station de dessalement s'explique par la planification de la production d'eau douce pendant une période de fonctionnement définie, l'injection de l'énergie excédentaire dans le réseau électrique et la possibilité de stocker l'excès d'eau produite pour les jours de faible ensoleillement. Ces facteurs permettent de s'affranchir de la nécessité de batteries, simplifiant ainsi le système et réduisant les coûts d'installation et de maintenance.

En conclusion, la station de dessalement proposé fonctionne grâce à un système d'alimentation photovoltaïque qui utilise l'énergie PV pour alimenter les pompes essentielles du module de dessalement. Tout excédent de puissance est soit injecté dans le réseau électrique contribuant ainsi à l'approvisionnement énergétique global, soit utilisé pour prolonger la production d'eau douce en cas d'ensoleillement prolongé. Ces fonctionnalités permettent d'optimiser l'utilisation des ressources renouvelables et de garantir un fonctionnement efficace de la station de dessalement.

III.7 Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque est une étape cruciale dans la conception du système. Il englobe l'ensemble des opérations nécessaires pour déterminer les dimensions optimales du générateur photovoltaïque tout en garantissant la satisfaction des besoins en consommation. Deux paramètres essentiels doivent être pris en compte : le rayonnement solaire incident sur le système et la consommation électrique précise. Des calculs approximatifs peuvent être effectués pour déterminer les dimensions des panneaux PV nécessaires pour couvrir les besoins d'une localité spécifique.[41]

III.7.1 Paramètres d'entrée pour le dimensionnement

En général, plusieurs paramètres doivent être pris en compte pour concevoir et dimensionner un système photovoltaïque, notamment :

- Le lieu d'installation du générateur photovoltaïque.
- Les composants du système photovoltaïque tels que les modules solaires, le régulateur, l'onduleur
- La charge électrique.

III.7.2 Présentation du site d'étude

Wilaya : Annaba
Latitude : 36°50 Nord
Longitude : 7°48 Est

Le tableau ci dessous représente la moyenne mensuelles de l'éclairement et la température de 2017 jusqu'à 2021 d'après le site de NAZA power

Mois	Moyenne de l'éclairement de (2017 jusqu'à 2021) (W/m^2)	Moyenne de la température de (2017 jusqu'à 2021) (°C)
Janvier	312	12.77
Février	444.25	13.27
Mars	562.75	14.44
Avril	690.50	16.28
Mai	812	19.25
Juin	916.75	23.6
Juillet	943.75	26.89
Aout	817	27.7
Septembre	618.5	25.05
Octobre	498	21.28
Novembre	333	17.18
Décembre	291	14.3

TAB. III.5 : la moyenne des 5 années de l'éclairement et de la température de la région d'Annaba pendant 12 mois

La figure ci dessous représente la durée d'ensoleillement moyene par mois en 2022

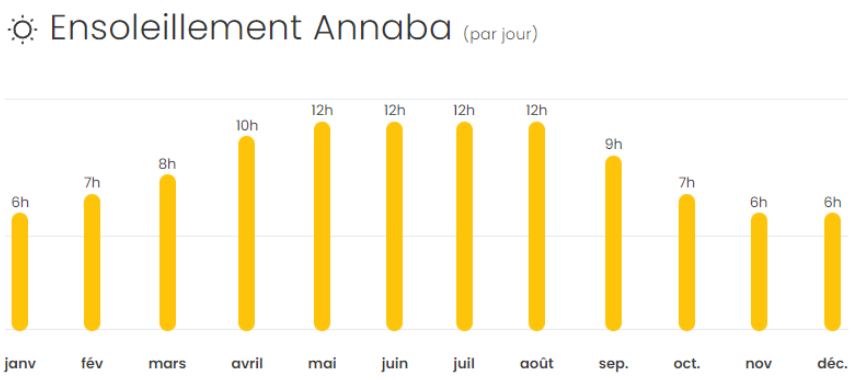

FIG. III.5 : La variation de l'Ensoleillement région Annaba [42]

En effet, nous considérons une durée moyenne d'ensoleillement de 8 heures par jour pour la région d'Annaba.

Le tableau ci dessou montre la puissance récupérer par panneau pour chaque mois en fonction de l'irradation et de température extraite de tableau **Tab. III.5**

Mois	Puissance (W)
Janvier	85.18
Février	122.37
Mars	154.217921
Avril	186.64
Mai	214.03
Juin	232.45
Juillet	232.85
Aout	201.41
Septembre	156.48
Octobre	129.64
Novembre	88.36
Décembre	78.28

TAB. III.6 : la puissance récupérée par chaque panneau pendant les 12 mois dans les conditions climatique de la région d'annaba

III.8 Application numérique

III.8.1 Caractéristique P-V du module PV sous les conditions moyennes d'Annaba

Nous allons calculer la puissance d'un panneau photovoltaïque pour la région d'Annaba en utilisant un modèle spécifique. Ce modèle développe une puissance de **250** W_c. Pour ce faire, nous utiliserons des données sur le rayonnement solaire moyen et la température moyenne mensuelle d'Annaba sur une période de **5 ans (2017-2021)** mentionnées ci-dessus. Données :

- Puissance du panneau photovoltaïque : **P = 250** W_c**,** V_{mp} **= 30.4 V,** I_{mp} **= 8.24 A.**
- Rayonnement solaire moyen mensuelle à Annaba **(2017-2021) : 603.29 W/**m^2**.**
- Température moyenne mensuelle à Annaba **(2017-2021) : 19,35 °C.**
- Temps d'ensoleillement moyen **(2022) : 8h/j.**

En utilisant une simulation sur Matlab avec les données de rayonnement solaire et de température mentionnées précédemment, nous avons obtenu la courbe P-V du module PV.

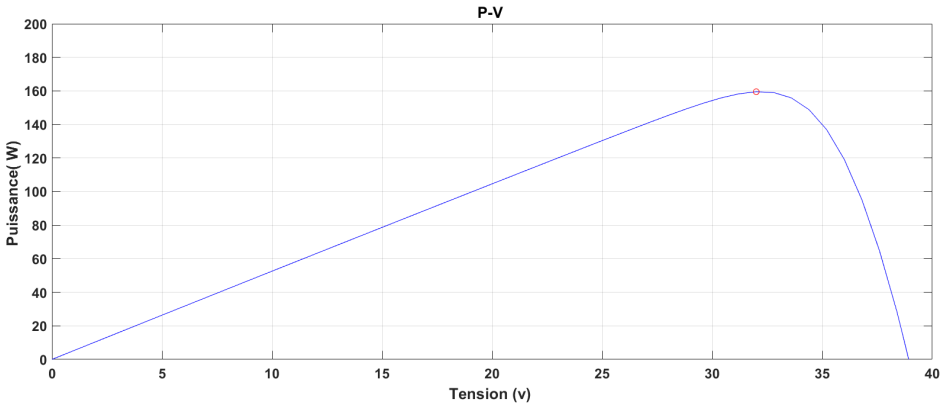

Fig. III.6 : Caractéristique de la courbe P-V dans les conditions moyenne de la région d'Annaba

D'après la courbe P-V obtenue, nous constatons que la puissance récupérée par un seul panneau PV dans des conditions moyennes est de **159.52 W.**

III.8.2 Les parametres d'un sous champs de Oued Kebrit

Le sous-champ situé à **Oued Kebrit** est équipé **de 4004 panneaux solaires**, disposés en configuration de **182 panneaux en parallèle et 22 panneaux en série**.

Dans des conditions standardisées **(STC)** qui incluent un rayonnement solaire de **1000 W/m^2** et une température de **25°C**, ce système génère une puissance crête de **1 MWc (mégawatt-crête)**. Ces données témoignent de la capacité de production significative de ce sous-champ solaire démontrant son potentiel à fournir une quantité considérable d'énergie renouvelable dans des conditions optimales.

Voici après simulation MATLAB représentant la puissance, le courant et la tension du point de puissance de suivi **(MPPT)** du sous-champ de **Oued Kebrit** dans les conditions **STC (1000 W/m^2, 25°C).**

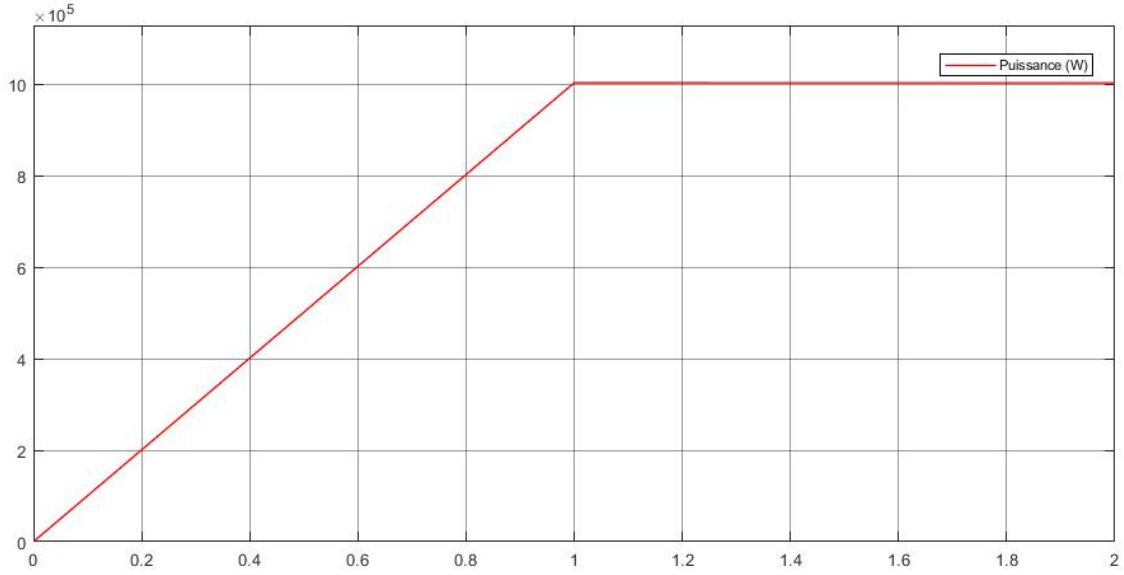

Fig. III.7 : Variation de la puissance MPPT d'un seul sous-champs en fonction du temps dans les conditions STC.

Le graphe de puissance **MPPT** met en évidence une production élevée de **1 MW** dans des conditions optimales de **1000 W/m^2 et 25°C**. Cette performance remarquable confirme la capacité du système à générer une quantité significative d'énergie. Cependant, il est important de noter que bien que cette puissance soit possible théoriquement avec un ensoleillement de **1000 W/m^2**, d'autres facteurs peuvent limiter la production réelle. Des conditions météorologiques variables, des pertes de conversion et d'autres paramètres peuvent influencer la puissance effective du système. Néanmoins, les résultats obtenus démontrent le potentiel solaire prometteur de ces conditions idéales offrant une solution efficace et durable pour répondre aux besoins

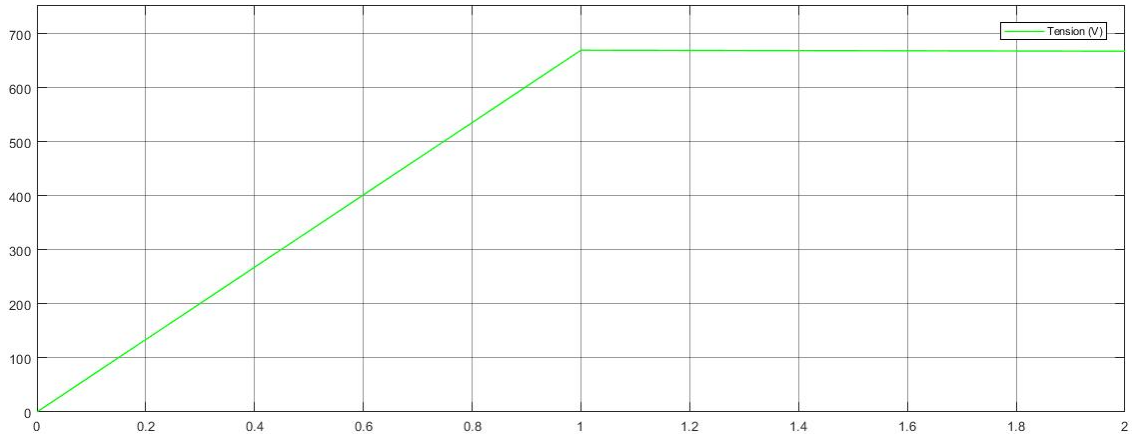

Fig. III.8 : Variation de la tension MPPT d'un seul sous-champs en fonction du temps dans les conditions STC.

Le graphe de tension **MPPT** met en évidence une valeur stable de **670,72 V** dans des conditions **STC (1000 W/m^2)** et à une température de **25°C**

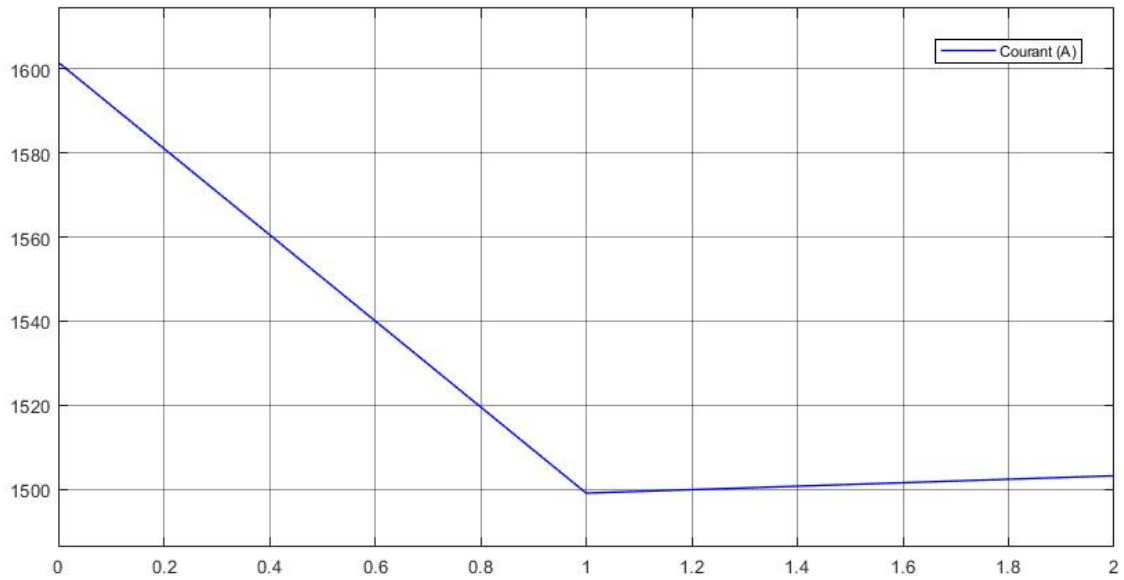

FIG. III.9 : Variation du courant MPPT d'un seul sous-champs en fonction du temps dans les conditions STC.

Le graphe de courant **MPPT** met en évidence une valeur remarquable de **1495,79 A** dans des conditions **STC (1000 W/m^2)** et à une température de **25°C** . Cette intensité de courant élevée démontre la capacité impressionnante du système à générer une quantité considérable d'énergie électrique.

Nous observons ensuite les différentes grandeurs de sortie du hacheur, notamment le courant, la tension et la puissance.

Voici après simulation MATLAB représentant la puissance, le courant et la tension après le premier étage d'adaptation (le hacheur) du sous-champ de **Oued Kebrit** dans les conditions **STC (1000 W/m^2, 25°C)**.

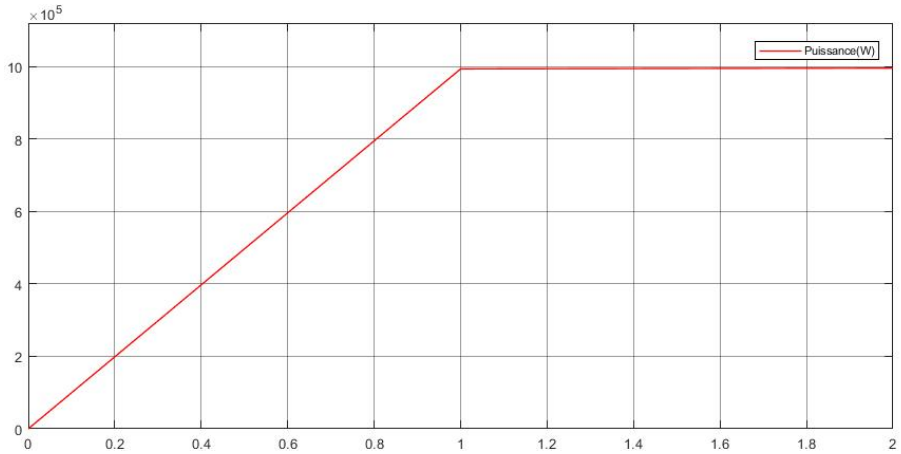

FIG. III.10 : Variation de la puissance de sortie du hacheur d'un seul sous-champs en fonction du temps dans les conditions STC.

Le graphe de puissance indique une valeur de **991,5 kW**, montrant une légère baisse par rapport à la puissance **MPPT** récupérée. Cette diminution est due aux pertes inévitables au niveau du hacheur lors de la conversion de l'énergie. Néanmoins, le système

parvient toujours à fournir une puissance significative, démontrant ainsi son efficacité globale. Il est crucial de prendre en compte ces pertes lors de la conception et de l'optimisation du système afin de maximiser son efficacité énergétique. Malgré cette diminution, le système demeure une source fiable et performante d'énergie solaire, contribuant à la production d'électricité renouvelable.

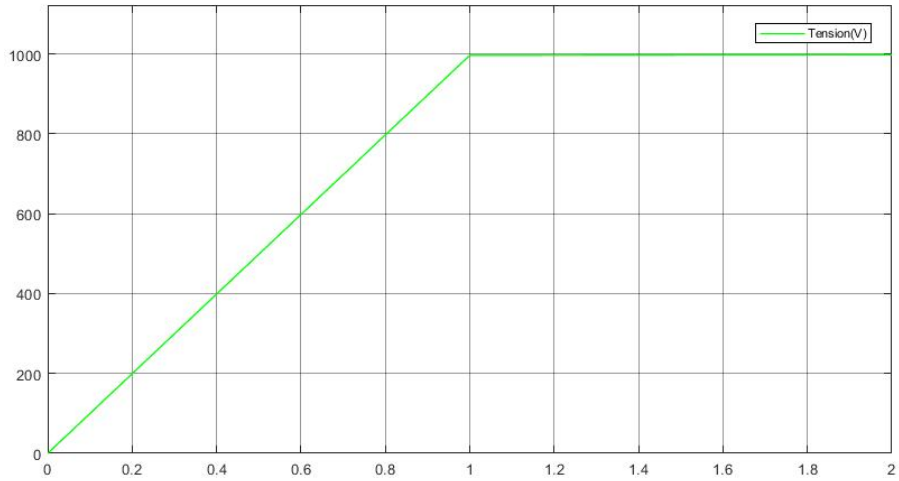

Fig. III.11 : Variation de la tension de sortie du hacheur d'un seul sous-champs en fonction du temps dans les conditions STC.

Le graphe de tension met en évidence une valeur de **995,76 V**, indiquant une élévation de la tension par rapport à la tension **MPPT (Maximum Power Point Tracking)** récupérée. Cette augmentation de tension est principalement due à l'effet du hacheur qui agit comme un convertisseur élévateur de tension dans le système.

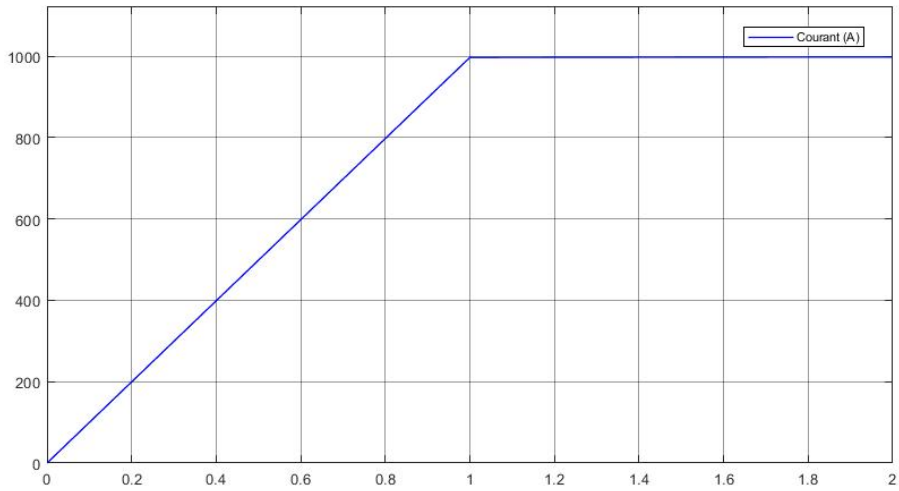

Fig. III.12 : Variation du courant de sortie du hacheur d'un seul sous-champs en fonction du temps dans les conditions STC.

La variation du courant de sortie du hacheur atteignant **995.76A**, peut être expliquée par l'utilisation d'un hacheur boost. Le hacheur boost est un convertisseur de tension qui augmente la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée. Cette augmentation

de tension a pour effet de réduire le courant de sortie tout en maintenant la puissance constante.

Dans le cas présent, le hacheur boost permet d'adapter la tension de sortie du paneaux PV pour optimiser la puissance de fonctionnement du système.

III.8.3 Les parametres d'un sous champs de Oued kebrit avec les conditions Moyenne de la région d'Annaba

En gardant les mêmes paramètres du sous-champ de **Oued Kebrit** qui comprend **4004 panneaux solaires** disposés en configuration de **182 panneaux en parallèle et 22 panneaux en série**, nous examinons maintenant la puissance produite dans les conditions moyennes de la région **d'Annaba**. Avec un rayonnement solaire moyen de **603,29 W/m^2** et une température moyenne **de 19,5°C** pour un seul sous-champs.

Voici après simulation MATLAB représentant la puissance, le courant et la tension du point de puissance de suivi **(MPPT)** du sous-champ de **Oued Kebrit** dans les conditions **(603,29 W/m^2, 19,35°C).**

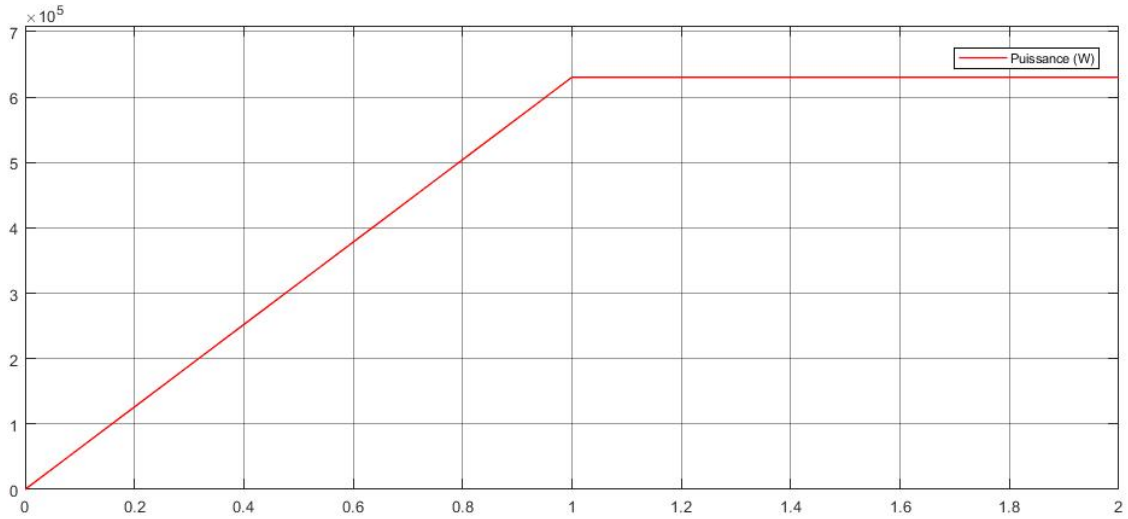

Fig. III.13 : Variation de la puissance MPPT d'un seul sous-champs en fonction du temps dans les conditions de la région d'Annaba (603,29 W/m^2, 19,35°C)

Le graphe de puissance **MPPT** présente une valeur de **630,3 kW**

On observe une diminution significative par rapport à la puissance **MPPT** récupérée dans les conditions **STC** qui étaient de 1 MW. Cette diminution de puissance peut être attribuée à plusieurs facteurs tels que la réduction du rayonnement solaire moyen et l'effet de la température sur les performances des panneaux solaires.

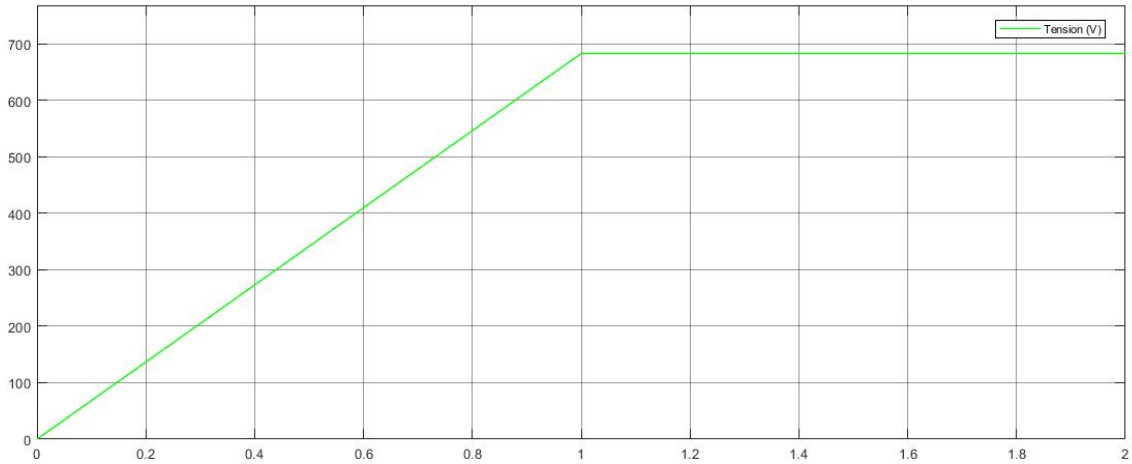

Fig. III.14 : Variation de la Tension MPPT d'un seul sous-champs en fonction du temps dans les conditions de la région d'Annaba (603,29 W/m^2, 19,35°C)

Le graphe de tension **MPPT** met en évidence une valeur stable de **682.75 V** dans des conditions Moyenne de la région **d'Annaba (603,29 W/m^2, 19,35°C)**.

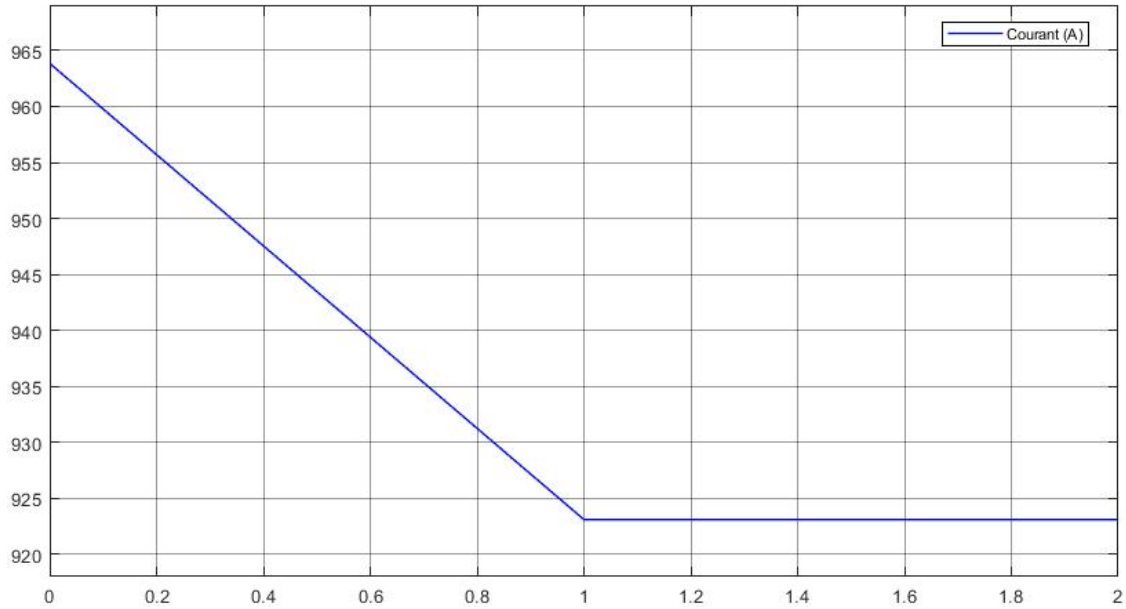

Fig. III.15 : Variation du courant MPPT d'un seul sous-champs en fonction du temps dans les conditions de la région d'Annaba (603,29 W/m^2, 19,35°C)

Le graphe de courant **MPPT** met en évidence une valeur remarquable de **923.11 A** dans des conditions moyenne de la région d'Annaba **(603,29 W/m^2, 19,25°C).**

Ensuite nous observons les différentes grandeurs de sortie du hacheur telles que le courant, la tension et la puissance

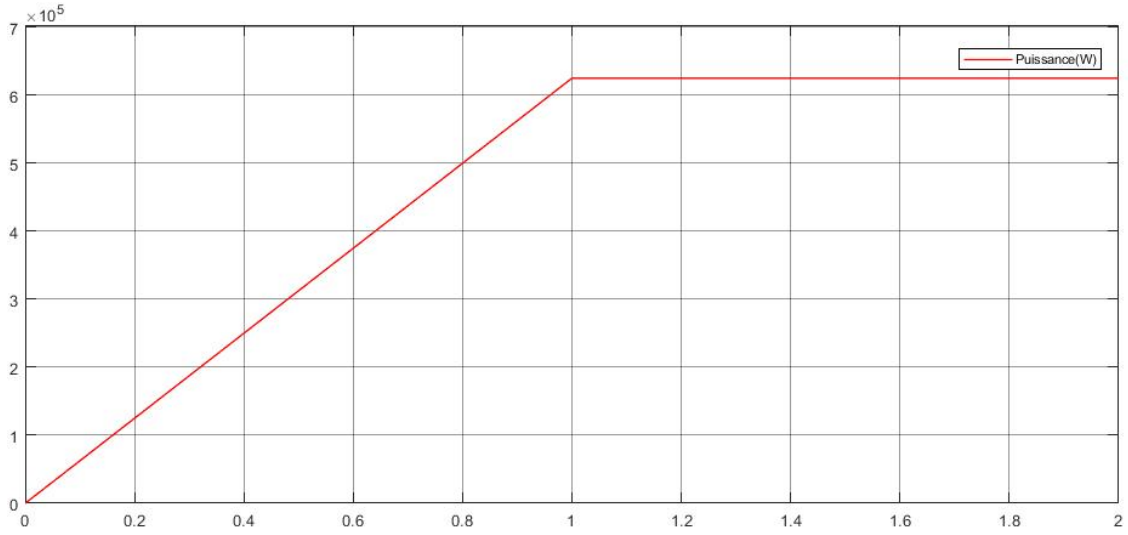

FIG. III.16 : Variation de la puissance de sortie du hacheur d'un seul sous-champs en fonction du temps dans les conditions de la région d'Annaba (603,29 W/m^2, 19,35°C) .

Le graphe de puissance montre une valeur de **624,6 kW**, ce qui représente une diminution par rapport à la puissance **MPPT** récupérée.

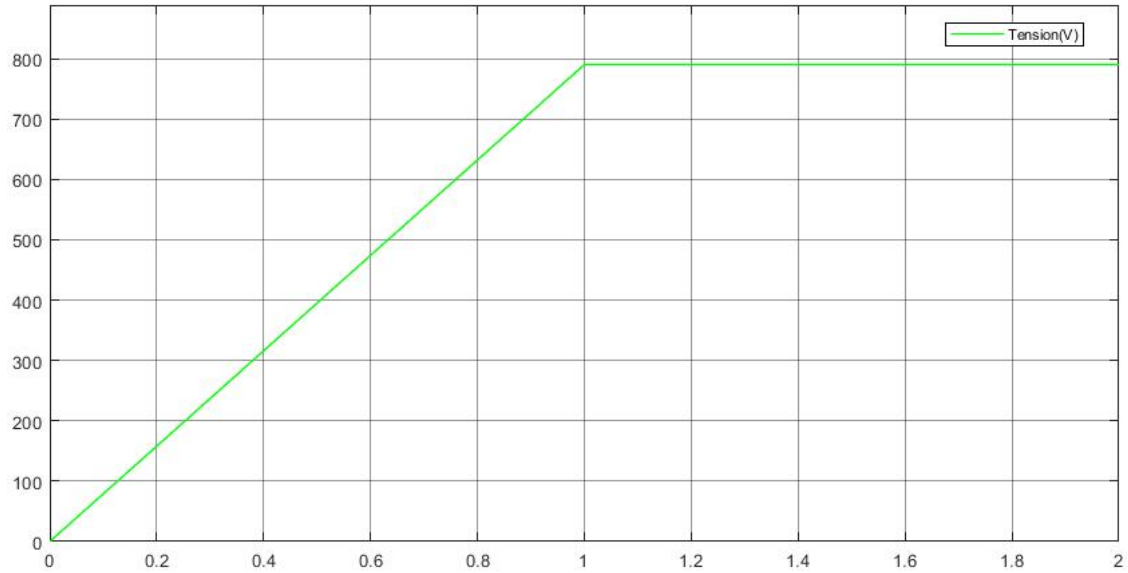

FIG. III.17 : Variation de la tension de sortie du hacheur d'un seul sous-champs en fonction du temps dans les conditions de la région d'Annaba (603,29 W/m^2, 19,35°C).

Le graphe de tension présente une valeur de **790,34 V**, ce qui indique une augmentation par rapport à la tension **MPPT** récupérée.

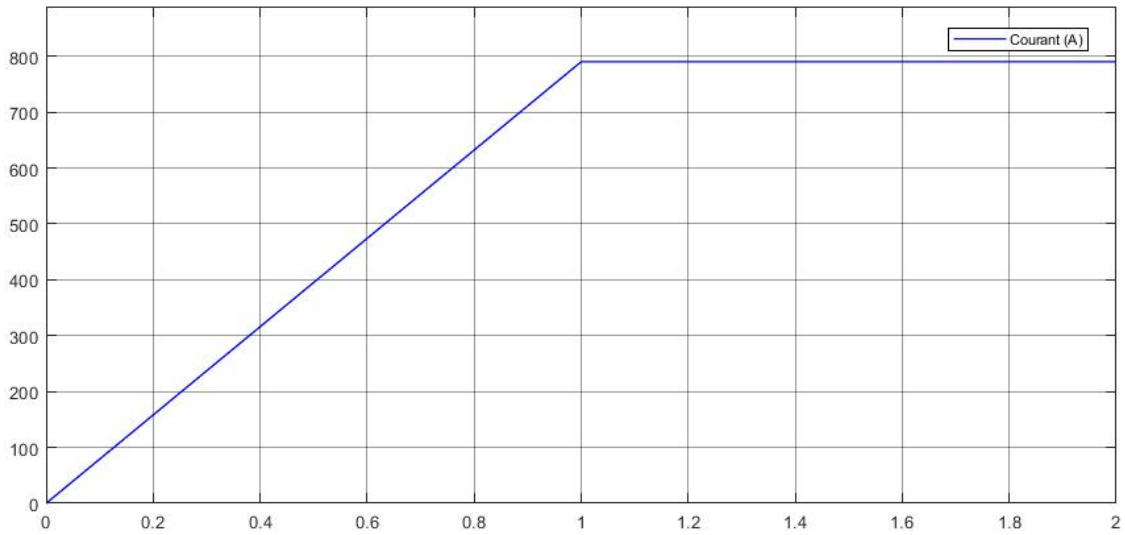

FIG. III.18 : Variation du courant de sortie du hacheur d'un seul sous-champs en fonction du temps dans les conditions de la région d'Annaba (603,29 W/m^2, 19,35°C).

Le courant de sortie du hacheur, mesuré à **790.34 A** présente une diminution par rapport à le courant **MPPT** récupérée.

III.8.4 Le besoin énergétique de la station de déssalement proposé

D'après la courbe la puissance obtenue, nous constatons que la puissance récupérée par un seul sous-champs de PV dans des conditions moyennes de la région d'Annaba est de **600 KW= 0.6 MW.**

Notre station de dessalement est équipée de quatre pompes ayant des fonctions et des puissances différentes, les puissances de ces pompes représentent notre besoin énergétique en termes de puissance. Chaque pompe joue un rôle spécifique dans le processus de dessalement, contribuant ainsi à la production d'eau douce à partir de l'eau de mer.

III.8.4.1 Application numérique

P (pompes)= 2000 + 400 + 400 + 186 = 2986 kW
Nombre totale du panneaux = 20020 panneaux Cela veut dire : Le besoin énergétique de notre station est de l'ordre de **3MW** Maintenant, nous cherchons à déterminer le nombre de sous-champs nécessaires pour répondre à notre besoin énergétique.

$$Nombredesouschamps = \frac{BesoinTotalDeLaStation}{PuissanceRcuprerParUnSous - Champ} = \frac{3}{0.6} = 5Sous{-}Champ \tag{III.1}$$

III.8.4.2 Nombre total des panneaux

1 sous-champs$\longrightarrow$ $4004Panneau$

5 sous-champs$\longrightarrow XPanneau$

III.8.4.3 Surface occupée par les sous-champs

La centrale **Oued Keberit occupe 30-hectare avec 15 sous-champs**

15 sous-champs$\longrightarrow 30hectare$

5 sous-champs$\longrightarrow X$

La surface occupée par les 5 sous-champs $= \frac{5X30}{15} = 10hectare$

III.8.4.4 Raccordement des 5 sous-champs

Le courant nominal global des **4 pompes = 78+78+36+391 = 583 A**
La tension nominal du fonctionnement des pompes = **3,6 kV**
Afin d'atteindre le courant suffisant pour alimenter nos pompes, il est donc nécessaire de raccorder les cinq sous-champs en parallèle.

III.8.4.5 Simulations des 5 sous-champs

Nous avons effectué le raccordement de cinq sous-champs sur MATLAB et observé la puissance, la tension et le courant **MPPT**. Cette approche nous a permis d'analyser la performance combinée de ces sous-champs en termes de production d'énergie électrique. En examinant les variations de puissance, nous avons pu évaluer l'efficacité du système global dans l'optimisation de la production d'énergie solaire. Ces résultats sont essentiels pour comprendre le fonctionnement et l'interaction des sous-champs connectés, et pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire dans le système global.

Voici après simulation MATLAB des **5 sous-champs** représentant la puissance, le courant et la tension du point de puissance de suivi **(MPPT) Oued Kebrit** dans les conditions **(603,29 W/m^2, 19,35°C)**.

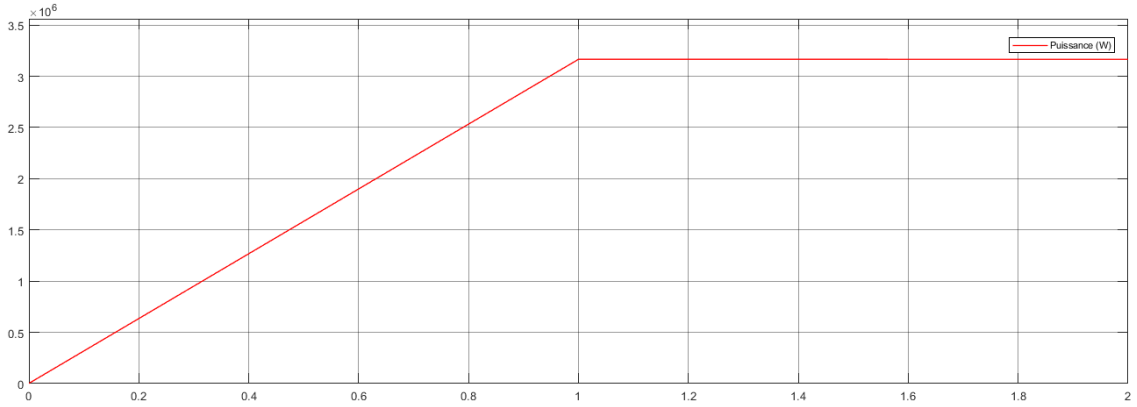

Fig. III.19 : Variation de la puissance MPPT des 5 sous-champs en fonction du temps dans les conditions de la région d'Annaba (603,29, 19,35°C)

Le graphe de puissance **MPPT** pour les **5 sous champs** raccordés en parallèle affiche une valeur de **3,17 MW**.

Cette puissance représente la somme totale de la puissance produite par les **5 sous champs photovoltaïques** lorsque leurs sorties sont combinées.

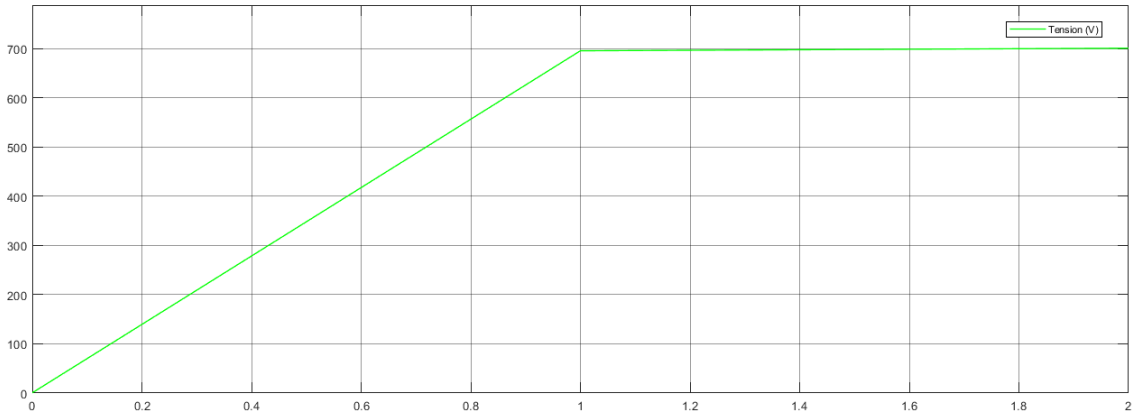

Fig. III.20 : Variation de la Tension MPPT des 5 sous-champs en fonction du temps dans les conditions de la région d'Annaba (603,29, 19,35°C)

Le graphe de tension **MPPT** pour les **5 sous champs** raccordés en parallèle affiche une valeur de **695,82 V**.

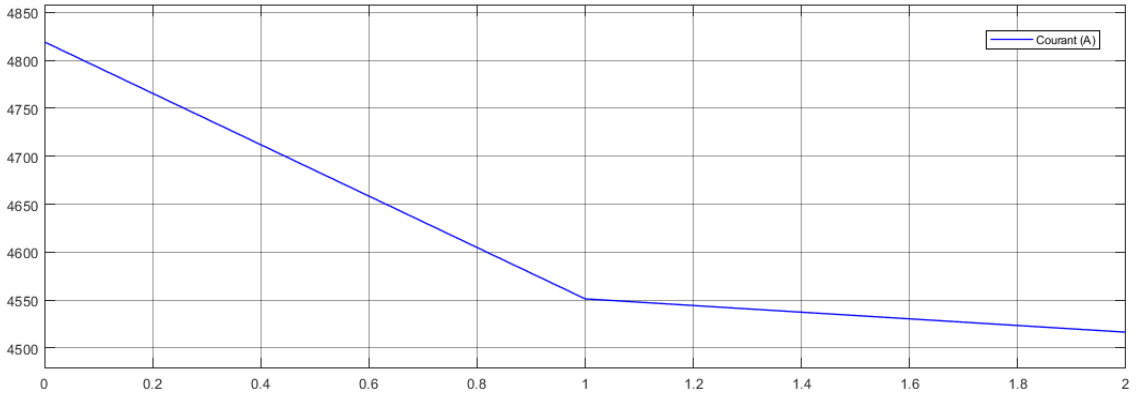

Fig. III.21 : Variation du courant MPPT des 5 sous-champs en fonction du temps dans les conditions de la région d'Annaba (603,29, 19,35°C)

Le graphe de courant **MPPT** pour les **5 sous champs** raccordés en parallèle affiche une valeur de **4549,73 A**. Lorsque les champs sont raccordés en parallèle, le courant total est la somme des courants individuels de chaque champ. Par conséquent, le raccordement en parallèle permet d'augmenter le courant global fourni par les panneaux solaires.

Ensuite nous observons les différentes grandeurs de sortie de l'hacheur telles que le courant, la tension et la puissance.

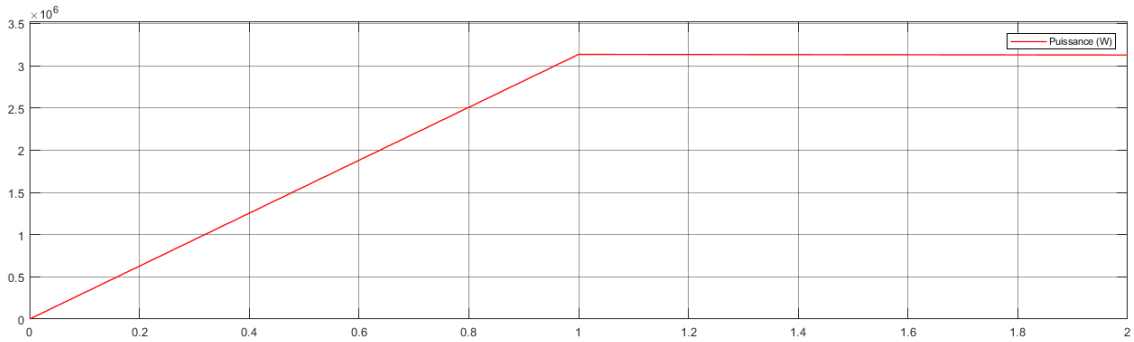

Fig. III.22 : Variation de la puissance de sortie du hacheur des 5 sous-champs en fonction du temps dans les conditions de la région d'Annaba.

Le graphe de puissance de sortie du hacheur affiche une valeur de **3.13 MW**. Cette puissance est légèrement inférieure à la puissance **MPPT** récupérée.

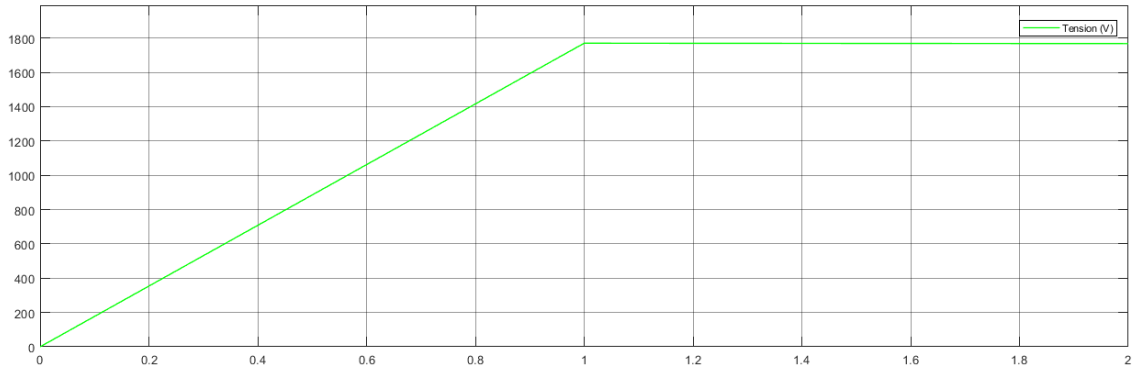

Fig. III.23 : Variation de la tension de sortie du hacheur des 5 sous-champs en fonction du temps dans les conditions de la région d'Annaba.

Le graphe de tension de sortie du hacheur affiche une valeur de **1769.80 V** ce qui représente une augmentation par rapport à la tension **MPPT** récupérée.

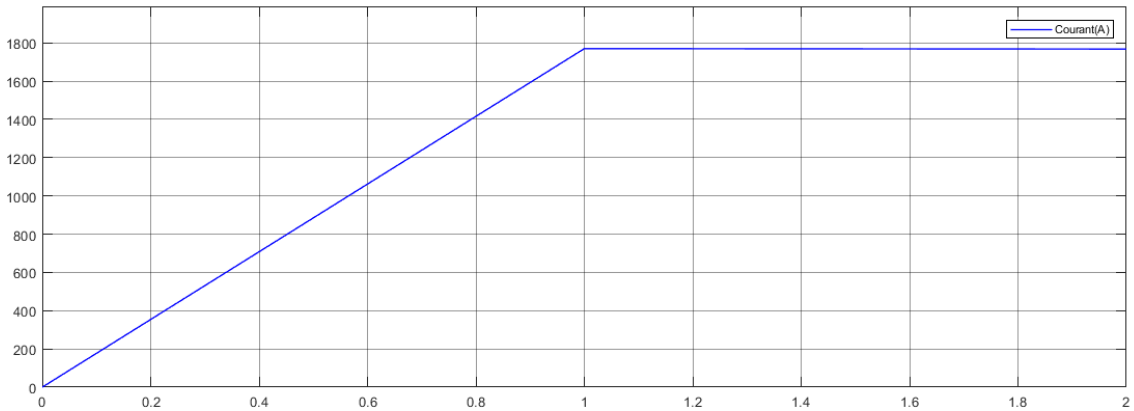

Fig. III.24 : Variation du courant de sortie du hacheur des 5 sous-champs en fonction du temps dans les conditions de la région d'Annaba.

Le courant de sortie du hacheur, mesuré à **1769.80 A** affiche une réduction par rapport à la puissance **MPPT** obtenue.

III.8.5 Les conditions climatique annuelles la région d'Annaba

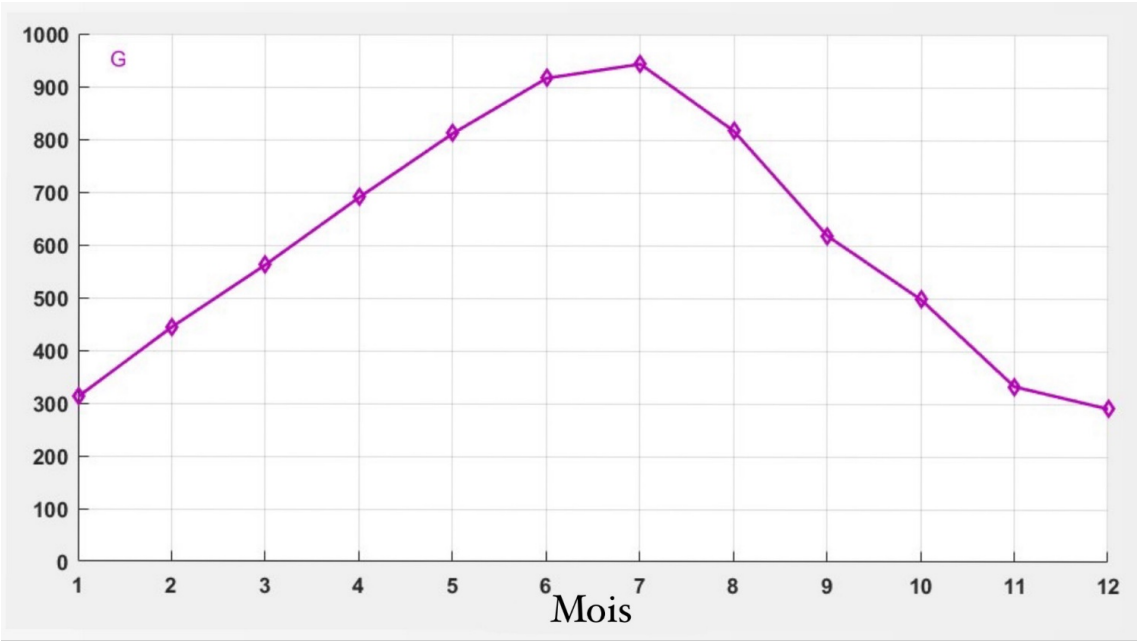

Fig. III.25 : Signal représente l'irradiation de toute l'année pour la région d'Annaba.

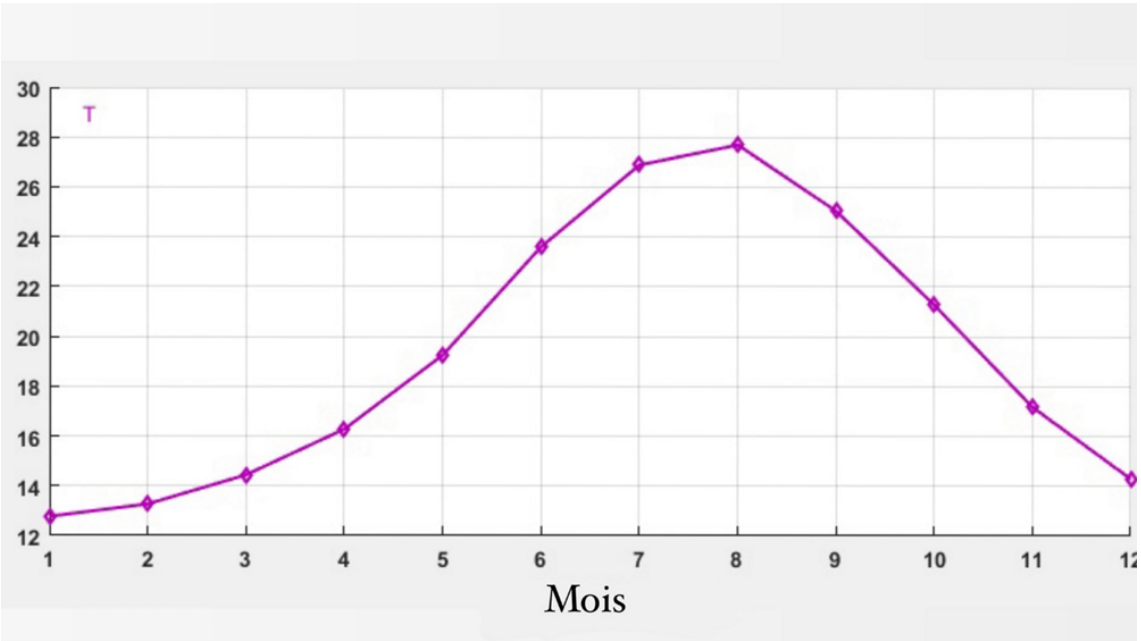

Fig. III.26 : Signal représente la température de toute l'année pour la région d'Annaba.

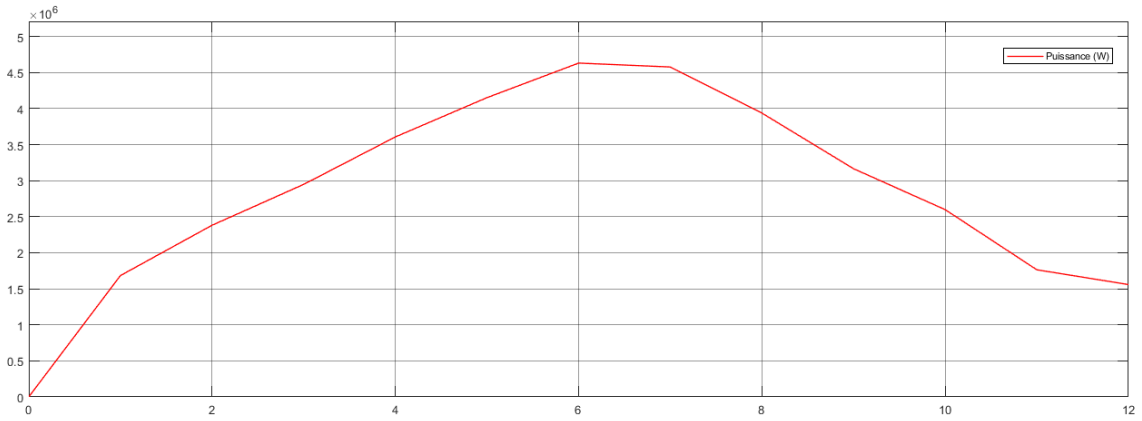

Fig. III.27 : Variation de la puissance MPPT des 5 sous-champs pendant les 12 mois en fonction du temps dans les conditions de la région d'Annaba

Le graphe de variation de la puissance **MPPT** récupérée pour les **5 sous champs** montre les fluctuations mensuelles de la puissance produite en fonction des saisons.

Les mois d'été présentent des pics de puissance, tandis que les mois d'hiver montrent des valeurs plus basses. Cela souligne l'importance de tenir compte des variations saisonnières lors de la planification des systèmes photovoltaïques.

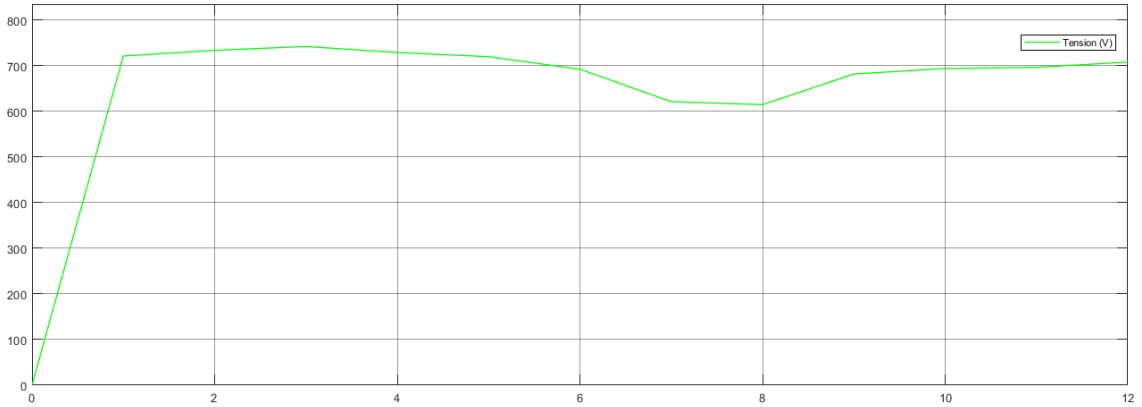

Fig. III.28 : Variation de tension MPPT des 5 sous-champs pendant les 12 mois en fonction du temps dans les conditions de la région d'Annaba

Le graphe de variation de la tension **MPPT** récupérée pour les **5 sous champs** illustre les changements mensuels de la tension produite par le système photovoltaïque.

Il met en évidence les fluctuations de tension en fonction des saisons et des conditions météorologiques. Ces variations saisonnières peuvent influencer les performances du système et nécessitent une attention particulière lors de la planification et de l'exploitation des installations solaires.

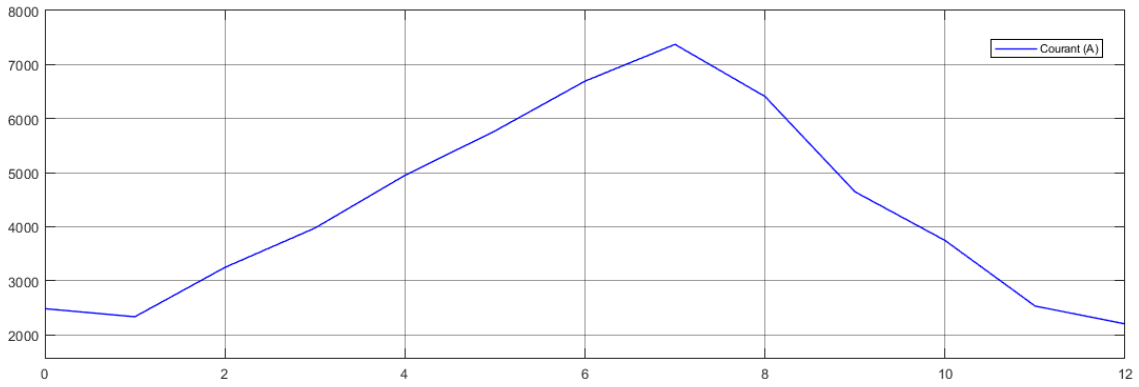

FIG. III.29 : Variation du courant MPPT des 5 sous-champs pendant les 12 mois en fonction du temps dans les conditions de la région d'Annaba

Le graphe de variation du courant **MPPT** récupéré pour les **5 sous champs** illustre les fluctuations mensuelles du courant généré par le système photovoltaïque.

Ces variations de courant sont dues aux changements saisonniers de l'ensoleillement et des conditions météorologiques ce qui peut impacter les performances et la production d'énergie du système. L'analyse de ces variations est essentielle pour une meilleure compréhension des performances du système solaire et pour optimiser son fonctionnement. Les différentes variables de sortie telles que le courant, la tension et la puissance, sont observées pour les **5 sous-champ.** Cette étape est réalisée en prenant en compte les conditions spécifiques de la région **d'Annaba** tout au long **des 12 mois.**

Ensuite nous observons les différentes grandeurs de sortie de l'hacheur telles que le courant, la tension et la puissance.

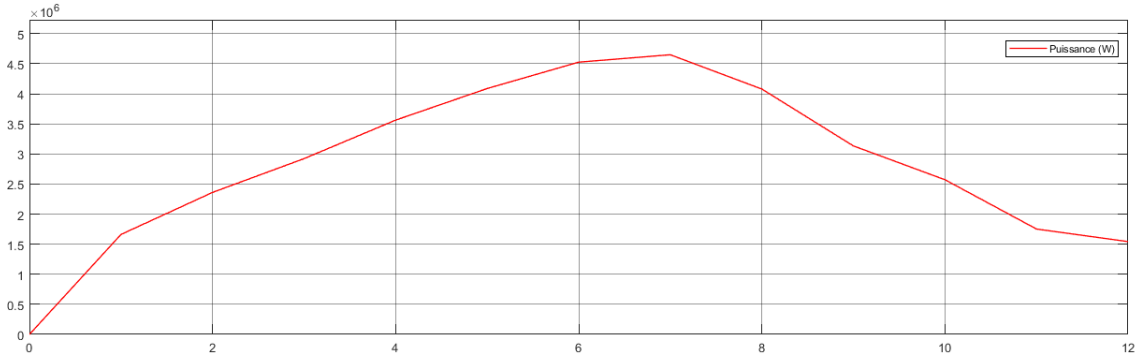

FIG. III.30 : Variation de la puissance de la sortie du hacheur des 5 sous-champs pendant les 12 mois en fonction du temps dans les conditions de la région d'Annaba.

Le graphe de la variation de la puissance de sortie du hacheur récupérée pour les **5 sous champs** montre une corrélation étroite avec la variation de la puissance MPPT.

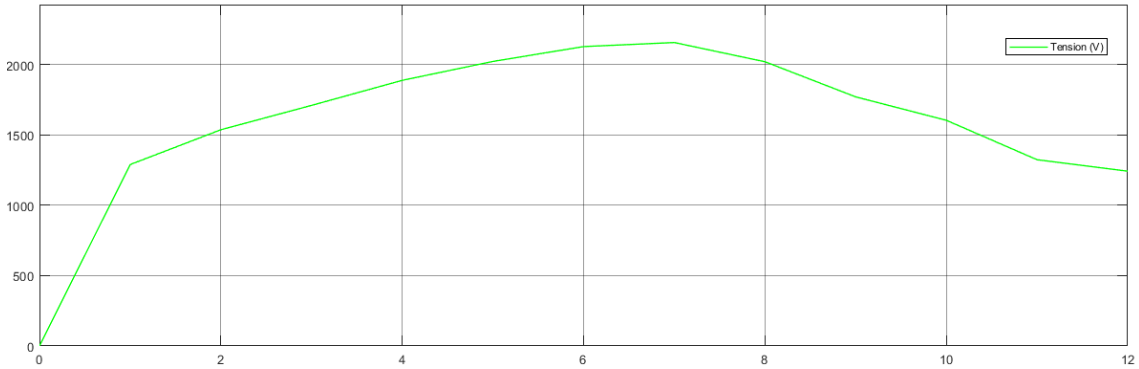

FIG. III.31 : Variation de la tension de la sortie du hacheur des 5 sous-champs pendant les 12 mois en fonction du temps dans les conditions de la région d'Annaba.

Le graphe de la variation de la tension de sortie du hacheur récupérée pour les **5 sous champs** met en évidence une augmentation remarquable par rapport à celle de la tension **MPPT.**

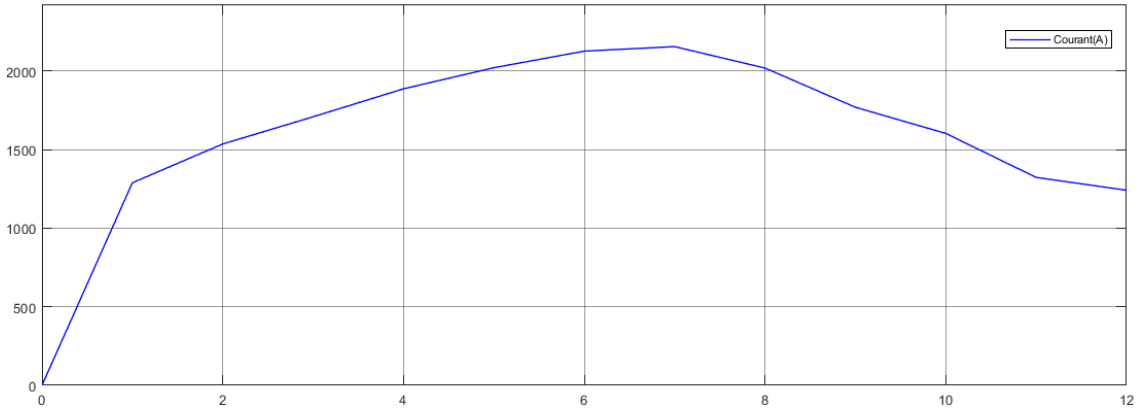

FIG. III.32 : Variation du courant de la sortie du hacheur des 5 sous-champs pendant les 12 mois en fonction du temps dans les conditions de la région d'Annaba.

Le graphe de variation du courant de sortie du hacheur pour les 5 sous-champ montre une diminution par rapport au courant **MPPT** récupéré.

Après avoir réalisé le premier étage d'adaptation il est nécessaire de passer à un deuxième étage d'adaptation. Ce deuxième étage consiste à convertir la tension **DC en AC** en utilisant un onduleur afin d'alimenter notre charge qui est constituée de pompes, c'est-à-dire une machine asynchrone **(charge AC).**

La tension de sortie du hacheur varie en fonction de l'éclairement. Afin de fournir une tension constante à l'onduleur, il est indispensable d'intégrer une boucle de régulation de tension. Cette boucle de régulation permettra de maintenir une valeur de tension fixe au niveau de l'onduleur.

Une fois que nous avons passé par notre deuxième étage d'adaptation, nous obtenons une tension AC dont la valeur est déterminée en fonction des capacités de l'onduleur utilisé. Pour pouvoir alimenter efficacement notre charge, il est nécessaire d'ajouter un transformateur de tension élévateur. Ce transformateur permettra d'obtenir une tension

de 3,6 kV, qui sera ensuite utilisée pour alimenter notre charge.

Ainsi, en combinant les différents étages d'adaptation, nous parvenons à convertir la tension **DC en AC** et à obtenir une tension appropriée pour alimenter nos pompes. Cette séquence d'adaptation est cruciale pour assurer un fonctionnement efficace et stable de notre système.

III.9 Conclusion

Nous avons observé une tendance intéressante dans notre système de dessalement en ce qui concerne la puissance requise pour son fonctionnement. Nous constatons que cette puissance nécessaire est généralement atteinte entre les mois de mars et septembre. Pendant cette période, nous avons même un excès de puissance qui nous permet d'intégrer l'excédent de notre production électrique au réseau.

Cela est rendu possible grâce aux règles de base de raccordement au réseau, qui nous permettent d'injecter l'électricité excédentaire dans le réseau. Cependant, pendant les mois d'octobre à février, nous ne parvenons pas à atteindre la puissance nécessaire pour faire fonctionner notre système de dessalement.

Durant cette période, toute notre production électrique est intégrée au réseau conformément aux règles de raccordement, sans être utilisée directement par notre système de dessalement. Cette observation souligne l'importance de bien planifier et gérer la production d'énergie en fonction des besoins saisonniers afin d'optimiser l'utilisation de notre système de dessalement tout en contribuant à la stabilité et à l'efficacité du réseau électrique.

Chapitre IV

Modélisation et commande vectorielle de moteur asynchrone

IV.1 Introduction

Ce chapitre se concentre sur la modélisation et la simulation du moteur asynchrone utilisé dans une station de dessalement alimentée par l'énergie photovoltaïque. L'objectif est de maintenir une vitesse constante du moteur pour assurer un débit d'eau stable dans le système de dessalement.

La machine asynchrone également appelée moteur asynchrone est largement utilisée en raison de sa simplicité de construction et de son coût abordable. Cependant, son fonctionnement asynchrone rend le contrôle de la vitesse plus complexe. La modélisation mathématique de la machine asynchrone sera développée fournissant les équations qui décrivent son comportement. La commande vectorielle commandée en tension sera également étudiée comme une technique permettant de contrôler indépendamment la vitesse et le couple du moteur.

En utilisant des simulations sur MATLAB, il sera possible d'analyser le comportement du moteur asynchrone dans le système de dessalement photovoltaïque. Les paramètres de commande pourront être ajustés pour maintenir une vitesse constante garantissant ainsi un débit d'eau stable et fiable.

Ce chapitre fournira une base solide pour la modélisation et la simulation du moteur asynchrone ainsi que pour la mise en œuvre de la commande vectorielle commandée en tension afin d'optimiser les performances du système de dessalement alimenté par l'énergie photovoltaïque.

IV.2 Modèle transitoire de la machine asynchrone

Nous avons besoin d'un modèle de la machine asynchrone qui peut simuler son fonctionnement pendant les transitions de régime et qui peut être utilisé pour développer une commande basée sur le contrôle vectoriel en orientant le flux du rotor.[43]

IV.3 Hypothèses de travail

Dans cette formulation, nous faisons l'hypothèse que le bobinage est réparti de manière à générer une f.m.m sinusoïdale lorsqu'il est alimenté par des courants sinusoïdaux.

Nous supposons également que nous opérons dans un régime non saturé et négligeons les effets d'hystérésis, les courants de Foucault et l'effet de peau.

De plus, le régime homopolaire est négligé car le neutre n'est pas connecté. Ces choix impliquent entre autres que les flux sont additifs, que les inductances propres sont constantes et que les inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques varient sinusoïdalement en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques. [43]

IV.4 Les équations de la machine asynchrone en régime quelconque

Les bobinages des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être illustrés comme montré dans la figure **Fig. IV.1**

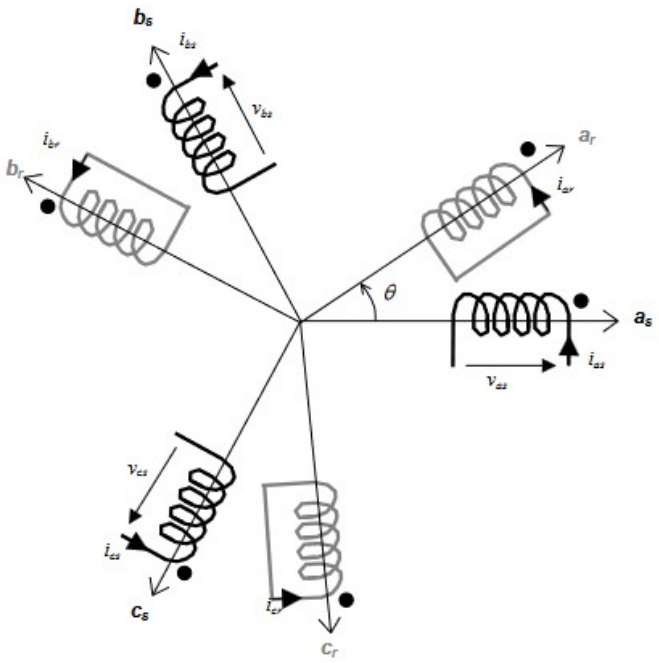

FIG. IV.1 : La représentation des trois phases statoriques et rotoriques dans l'éspace [43].

Les phases rotoriques sont en court-circuit entre elles. θ représente l'angle électrique entre l'axe de la phase a statorique et la phase a rotorique.
La loi de Faraday peut être formulée comme suit :

$$V = Ri + \frac{d\varphi}{dt} \tag{IV.1}$$

Pour les trois phases statoriques, on peut résumer cette expression en utilisant une écriture matricielle condensée :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} V_{abcs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{abcs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{abcs} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \end{cases} \tag{IV.2}$$

Étant donné que la résistance statorique est identique pour les trois phases, il n'est pas nécessaire de représenter une matrice de résistances distinctes.
De même pour le rotor :

$$[v_{\mathrm{abcr}}] = R_{\mathrm{r}}[i_{\mathrm{abcr}}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{\mathrm{abcr}}] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{IV.3}$$

Le fait que le rotor soit en court-circuit entraîne que les tensions du rotor sont nulles. Chaque flux interagit avec les courants de toutes les phases, y compris son propre courant. Équation matricielle des relations entre les flux et les courants :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \\ \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s & m_1 & m_3 & m_2 \\ m_s & l_s & m_s & m_2 & m_1 & m_3 \\ m_s & m_s & l_s & m_3 & m_2 & m_1 \\ m_1 & m_2 & m_3 & l_r & m_r & m_r \\ m_3 & m_1 & m_2 & m_r & l_r & m_r \\ m_2 & m_3 & m_1 & m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \tag{IV.4}$$

l_s représente l'inductance intrinsèque d'une phase du stator.
l_r désigne l'inductance intrinsèque d'une phase du rotor.
m_s représente l'inductance mutuelle entre deux phases du stator.
m_r représente l'inductance mutuelle entre deux phases du rotor.
Avec :

$$\begin{cases} m_1 = m_{sr} cos(\theta) \\ m_2 = m_{sr} cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ m_3 = m_{sr} cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \tag{IV.5}$$

m_{sr} indique la valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor.

Équation mécanique Lors de l'étude des régimes transitoires, les grandeurs mécaniques s'ajoutent aux grandeurs électriques. Afin de compléter le modèle, nous devons inclure l'équation mécanique dérivée de la loi fondamentale de la dynamique [44] :

$$C_{cm} - C_r - K_f \Omega_m = J \frac{d\Omega_m}{dt} \tag{IV.6}$$

Où :
C_{em} : Le couple électromagnétique de la MAS ;
C_r : Le couple résistant (statique) à l'arbre de la machine ;
J : Le moment d'inertie ;
K_f : Le coefficient de frottement ;
Ω_m : La vitesse angulaire mécanique du rotor.

IV.5 Modèle de Park de la machine asynchrone triphasée

On observe que le système d'équations n'est pas simple et que certaines matrices d'inductances dépendent de la position relative du rotor par rapport au stator. Cela pose

une difficulté pour résoudre le système d'équations en particulier lors de l'analyse des phénomènes transitoires.

Afin de surmonter cet obstacle, la transformation de Park est utilisée pour obtenir une formulation plus simple. Ainsi, les enroulements statoriques et rotoriques sont transformés en enroulements orthogonaux.

Nous avons jugé utile de représenter les enroulements triphasés du stator et du rotor par deux enroulements biphasés équivalents de la manière suivante :

- L'enroulement triphasé du stator s_a, s_b, s_c est associé à l'enroulement s_d, s_q qui tourne à une vitesse arbitraire $w_a = \mathrm{d}\theta_a/\mathrm{dt}$ par rapport au stator fixe.

- L'enroulement triphasé du rotor r_a, r_b, r_c est associé à l'enroulement r_d, r_q qui tourne à une vitesse $w_r = \mathrm{d}\theta_r/\mathrm{dt}$ par rapport au rotor, qui lui-même tourne à une vitesse angulaire de rotation w_m =$\mathrm{d}\theta/\mathrm{dt}$.

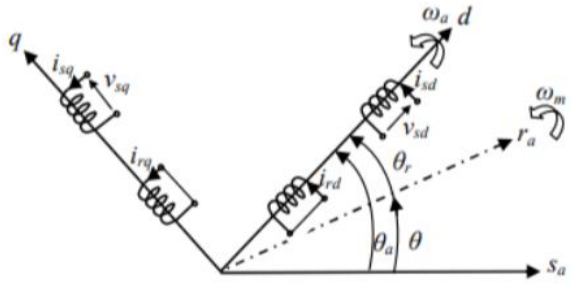

Fig. IV.2 : Représentation de la transformation de Park de la MAS [44]

IV.5.1 Choix du repère dq

Le choix du référentiel va dépendre de l'angle de la transformation

Lorsque $\theta_a = 0$ ou $\theta_a = \theta$, le référentiel sera respectivement lié au stator ou au rotor.

En revanche, lorsque $\theta_a = \theta_s$, le référentiel sera lié au synchronisme.

Étant donné que nous considérons que la machine est symétrique et équilibrée, la composante homopolaire peut être négligée. Ainsi, les grandeurs statoriques et rotoriques sont exprimées dans le même repère comme illustré dans la figure **Fig. IV.2**.

Il est possible de définir une matrice de Park [P(θ_a)] qui permet la conversion des composantes triphasées (a, b, c) en composantes biphasées (d, q). [44]

La matrice de transformation de Park [45] est définie par :

$$\left[P(\theta_a)\right] = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} cos\theta_a & cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & cos(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) \\ -sin\theta_a & -sin(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & -sin(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{IV.7}$$

Et la matrice inverse de Park est définis par :

$$\left[P(\theta)\right]^{-1} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} cos\theta_a & -sin\theta_a & \frac{1}{2} \\ cos(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & -sin(\theta_a - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \\ cos(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) & -sin(\theta_a - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{IV.8}$$

Equations des tensions Les expressions des tensions de la machine asynchrone triphasée dans le référentiel choisi (d, q) [45] sont formulées par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - w_a \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + w_a \varphi_{ds} \\ V_{dr} = 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (w_a - w_m)\varphi_{qr} \\ V_{qr} = 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (w_a - w_m)\varphi_{dr} \end{cases} \tag{IV.9}$$

Avec respectivement :
v_{ds}, v_{qs}, v_{dr} et v_{qr} : Les tensions statoriques et rotoriques directs et en quadrature ;
i_{ds}, i_{qs}, i_{dr} et i_{qr} : Les courants statoriques et rotoriques directs et en quadrature ;
φ_{ds}, φ_{qs}, φ_{dr} et φ_{qr} : Les flux statoriques et rotoriques directs et en quadrature.

Équations des flux Les valeurs des flux sont déduites du système d'équations ci-dessous :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \tag{IV.10}$$

Avec respectivement : L_s et L_r : Les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la MAS, respectivement.
M : L'inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor (inductance magnétisante).
Où :

$$\begin{cases} L_s = l_s - m_s \\ L_r = l_r - m_r \\ M = \frac{3}{2} M_0 \end{cases} \tag{IV.11}$$

Expression du couple électromagnétique Le couple peut être calculé en appliquant la transformation de Park.[44] Cela nous permet d'obtenir plusieurs expressions équivalentes du couple électromagnétique :

$$\begin{cases} C_{em} = p(\varphi_{qr} i_{dr} - \varphi_{dr} i_{qr}) \\ C_{em} = p(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \\ C_{em} = pM(i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \\ C_{em} = p\frac{M}{L_s}(\varphi_{ds} i_{qr} - \varphi_{qs} i_{dr}) \end{cases} \tag{IV.12}$$

IV.6 Modélisation et simulation du MAS sous l'environnement Matlab Simulink

En utilisant le logiciel Matlab Simulink, nous avons créé un modèle représentant le moteur asynchrone. Voici les étapes du processus de modélisation :

Transformation de Park Dans cette première étape, nous effectuons la transformation de Park qui permet de convertir les grandeurs triphasées du moteur asynchrone en grandeurs biphasées.

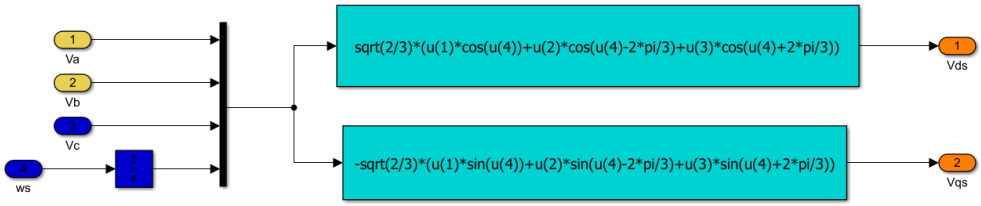

Fig. IV.3 : Transformation de park sur Matlab

Les équations des flux : Après avoir effectué la transformation de Park, nous créons un schéma bloc pour représenter les flux dans le moteur asynchrone. Ce schéma met en évidence les interactions entre les flux statoriques et les flux rotoriques permettant de visualiser le comportement du système.

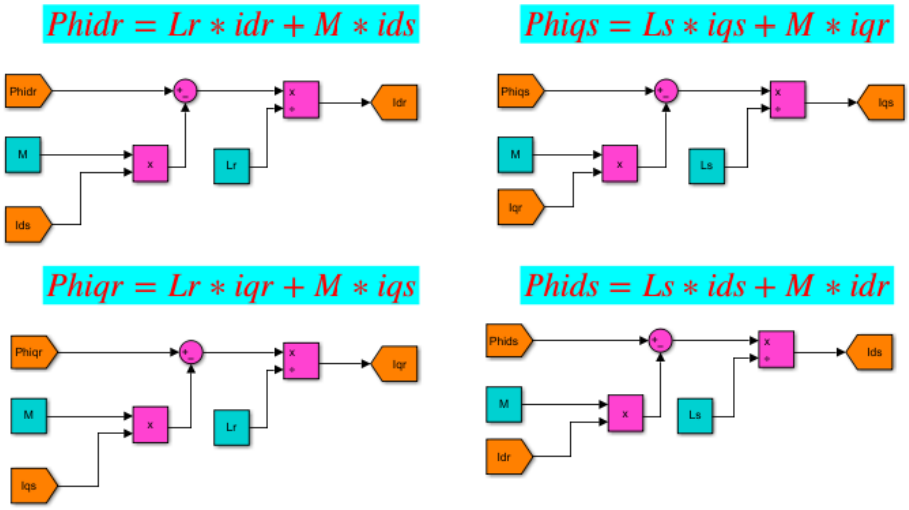

Fig. IV.4 : Les équations des flux

Les équations des tensions À cette étape, nous construisons un schéma bloc représentant les tensions appliquées au moteur asynchrone.

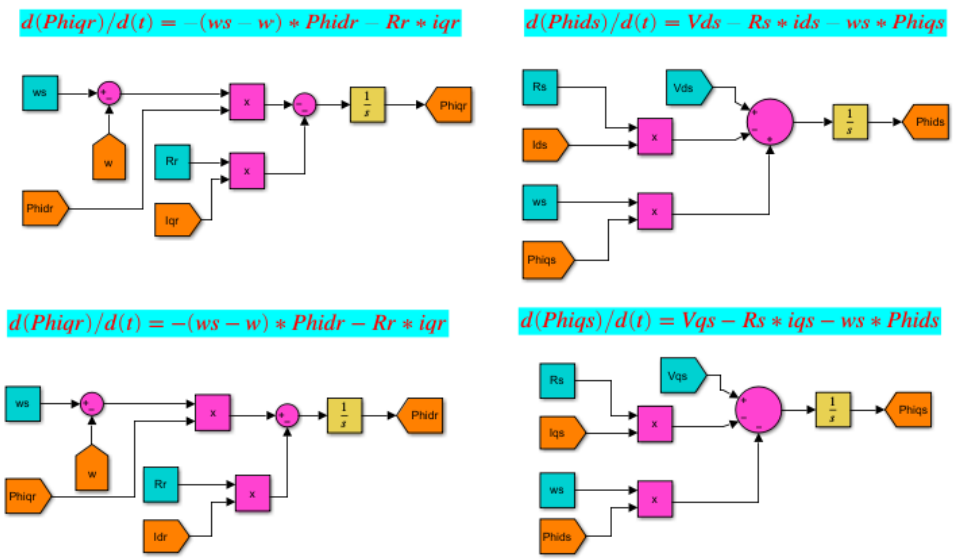

FIG. IV.5 : Les équations des tensions

Les équations électromécaniques et mécaniques : Dans cette étape, nous développons un schéma bloc qui intègre les équations mécaniques et électromécaniques du moteur asynchrone.

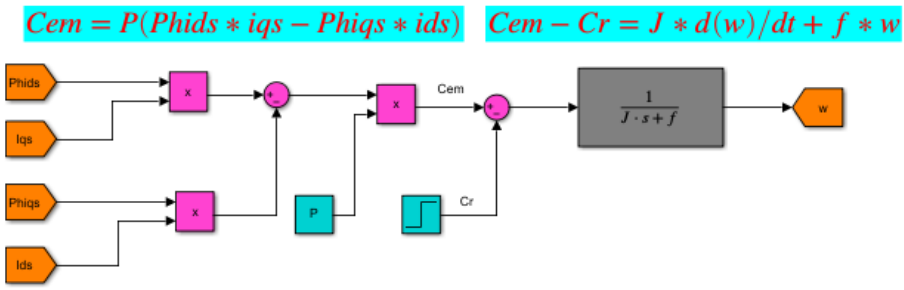

FIG. IV.6 : Les équations électromécaniques et mécaniques

Transformation de Park inverse : Une fois que les étapes précédentes sont complétées, nous effectuons une transformation inverse de Park pour revenir aux grandeurs triphasées d'origine.

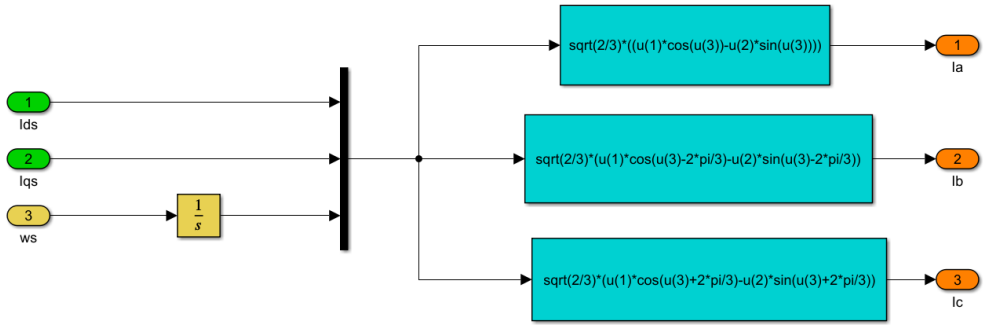

FIG. IV.7 : Transformation de Park inverse

En suivant ces étapes de modélisation, nous obtenons un modèle Simulink complet du moteur asynchrone qui nous permet d'analyser et de simuler son comportement dans différentes conditions de fonctionnement.

Nous présenterons les résultats de la simulation MATLAB du moteur asynchrone en mettant l'accent sur la vitesse et le courant de démarrage. Nous étudierons le moteur sans couple résistant, puis avec un couple non nul pour comprendre son comportement.

Remarque : dans la simulation on a pris $w_m = w$

IV.6.1 Simulation avec un couple résistant nul

Nous commencerons par examiner les résultats de la simulation MATLAB du moteur asynchrone lorsqu'aucun couple résistant n'est appliqué. Dans cette configuration, le moteur fonctionne à vide et nous pouvons observer son comportement en l'absence de charge externe.

La vitesse du moteur asynchrone lors du démarrage Lorsque le couple résistant est nul, la vitesse du moteur asynchrone atteint sa valeur nominale qui est généralement proche de la fréquence du réseau électrique.

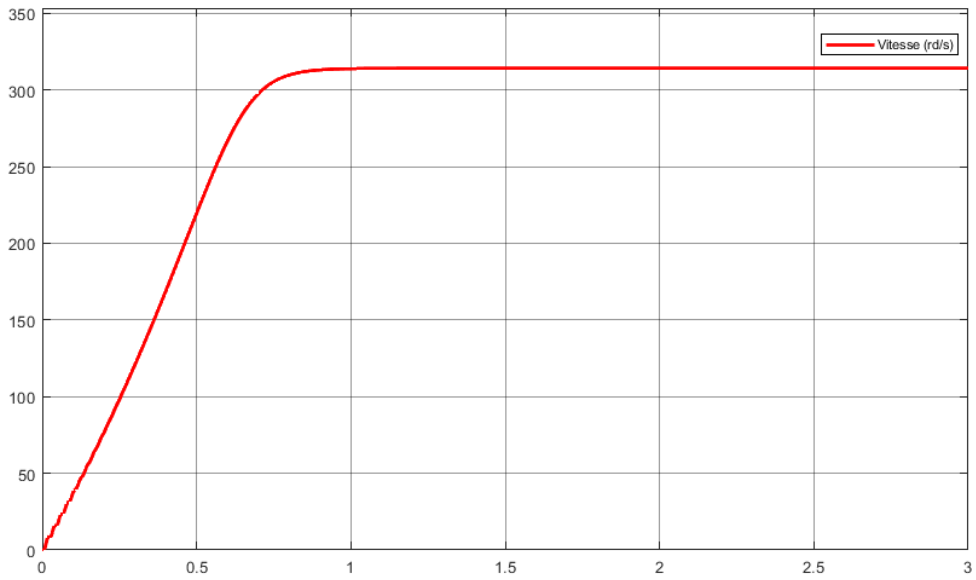

FIG. IV.8 : Variation de la vitesse de moteur asynchrone lors de démarrage

Courant de démarrage Le courant de démarrage est un paramètre crucial à prendre en compte car il représente le courant initial élevé nécessaire pour surmonter la résistance du couple appliqué lors du démarrage du moteur.

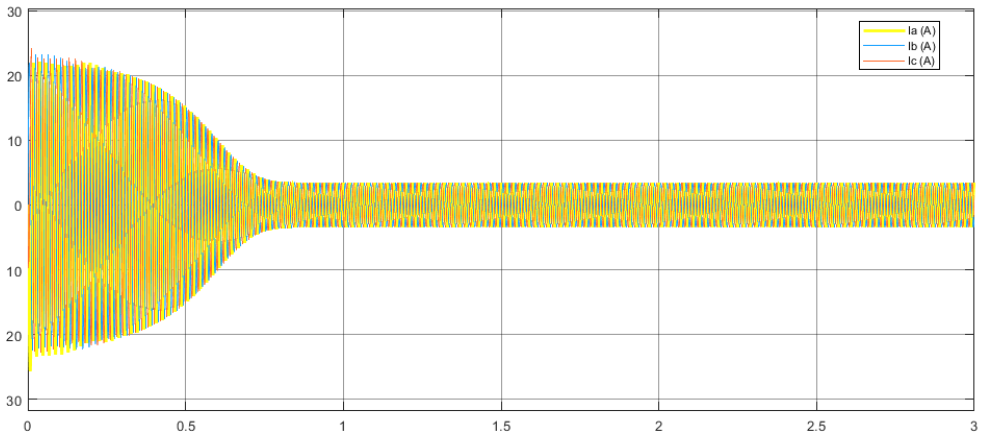

FIG. IV.9 : Variation du courant du démarrage du moteur asynchrone

Le courant de démarrage élevé peut entraîner des contraintes thermiques et électriques, il est important de s'assurer que les relais de protection du moteur tels que les relais thermiques et les relais de surintensité, peuvent gérer ces conditions de démarrage.

IV.6.2 Simulation avec un couple résistant non nul (Cr=5 N.m a t=3 sec)

Dans la deuxième partie de cette section, nous appliquerons un couple résistant non nul au moteur asynchrone et analyserons son comportement en conséquence. L'application d'un couple résistant ajoute une charge au moteur et peut avoir un impact significatif sur ses performances.

Vitesse du moteur Lorsqu'un couple résistant non nul est appliqué au moteur asynchrone, sa vitesse diminue par rapport à sa valeur nominale en raison de la résistance exercée par la charge externe. Cette diminution de vitesse est le résultat de la nécessité pour le moteur de fournir plus de puissance pour compenser cette résistance et maintenir la vitesse de rotation souhaitée.

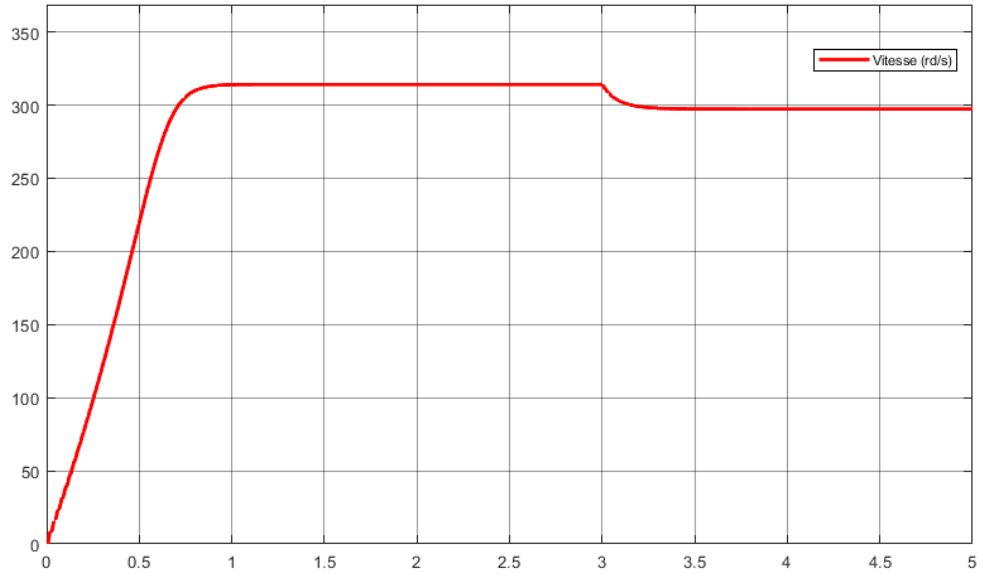

Fig. IV.10 : Variation de la vitesse du moteur asynchrone lors du démarrage avec un couple résistant

Courant d'alimentation Lorsqu'un couple résistant non nul est appliqué au moteur asynchrone, le courant d'alimentation du moteur a tendance à augmenter en raison de la demande accrue de puissance pour surmonter la résistance de la charge.

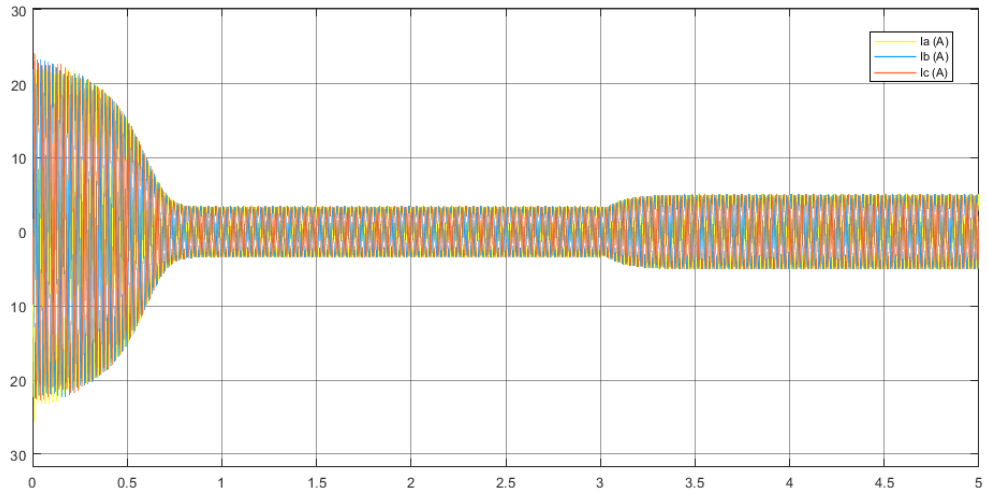

Fig. IV.11 : Courant de démarrage du moteur asynchrone avec un couple résistant

Pour minimiser l'impact du courant de démarrage sur les panneaux photovoltaïques lors de l'alimentation des moteurs asynchrones, plusieurs solutions peuvent être envisa-

gées. Cela inclut l'utilisation de démarreurs progressifs, l'installation de batteries de stockage d'énergie et le contrôle intelligent de la charge des pompes. Le courant de démarrage doit être pris en compte pour préserver la durabilité et la performance des panneaux solaires, malgré la simplification initiale du dimensionnement pour réduire les coûts. Gérer le courant de démarrage permet d'assurer un fonctionnement en douceur du système tout en optimisant l'utilisation des panneaux photovoltaïques et en garantissant la durabilité du système dans son ensemble.

Lorsque le moteur asynchrone fonctionne sans commande de vitesse, l'application d'un couple résistant sans régulation entraîne une diminution de sa vitesse. Pour assurer le bon fonctionnement des pompes utilisées dans la station, il est essentiel de mettre en place une commande de vitesse. Cela permet de maintenir la vitesse des pompes constante, assurant un débit d'eau de mer stable et fiable pour le processus de dessalement. Une commande de vitesse appropriée telle que la commande vectorielle est nécessaire pour maintenir une vitesse constante et compenser les variations de charge, assurant ainsi l'efficacité et la stabilité du système.

IV.7 Commande de la machine asynchrone

La commande vectorielle a été proposée il y a plusieurs années. Cependant, sa mise en œuvre et son utilisation pratiques n'ont été rendues possibles qu'avec les progrès de la micro-électronique. En effet, cela nécessite des calculs de transformation de Park, l'évaluation de fonctions trigonométriques, des intégrations, des régulations, etc. Ce type de traitement ne pouvait pas être réalisé en mode purement analogique.

La régulation de la machine asynchrone implique le contrôle du couple, de la vitesse voire de la position. Le contrôle le plus fondamental est celui des courants car nous avons précédemment constaté que le couple peut être exprimé directement en fonction des courants.

$$C_e = pM(i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}) \tag{IV.13}$$

Néanmoins, la formule du couple électromagnétique est complexe et diffère de celle d'une machine à courant continu, où le découplage naturel entre le réglage du flux et celui du couple facilite sa commande. Nous sommes donc confrontés à une difficulté supplémentaire pour contrôler ce couple.

La commande vectorielle résout ce problème en permettant le découplage des réglages du flux à l'intérieur de la machine de ceux du couple.

Avant d'expliquer le principe de la commande vectorielle, revenons d'abord sur le fait que le couple en régime transitoire (quelconque) peut être exprimé dans le repère dq en utilisant un produit croisé de courants et de flux. Reprenons cette formulation :

$$C_e = \frac{pM}{L_r}(\varphi_{dr}i_{qs} - \varphi_{qr}i_{ds}) \tag{IV.14}$$

Nous remarquons qu'en éliminant le deuxième produit ($\varphi_{qr}.i_{ds}$), le couple obtenu ressemblerait beaucoup à celui d'une machine à courant continu (MCC).

Pour y parvenir, il suffit d'orienter le repère dq de manière à annuler la composante de flux en quadrature. En d'autres termes, il est nécessaire de choisir judicieusement l'angle

de rotation de Park afin que le flux rotorique soit entièrement projeté sur l'axe direct (d), ce qui entraîne $\varphi_{qr} = 0$. Ainsi, le flux rotorique (φ_r) serait équivalent au flux statorique (φ_s) uniquement.

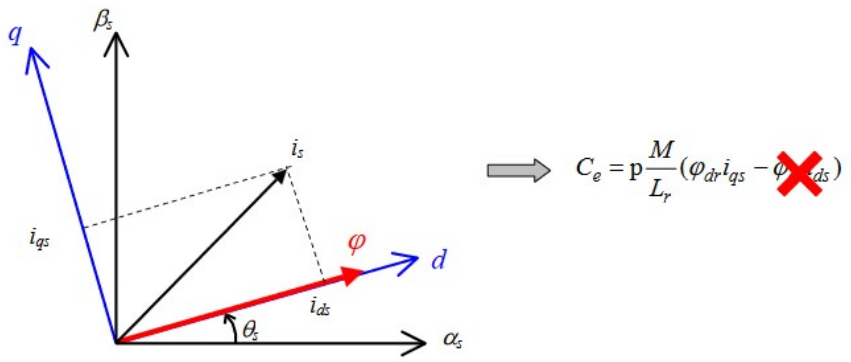

FIG. IV.12 : Le choix de l'orientation de flux

Le couple est alors :

$$C_e = \frac{pM}{L_r}\varphi_r i_{qs} \tag{IV.15}$$

Dans ce cas, l'ajustement du flux et la régulation du couple dans la machine sont effectués en modifiant les composantes du courant statorique. Plus précisément, la composante i_{ds} du courant statorique est ajustée pour régler le flux, tandis que la composante $i_q s$ est modifiée pour réguler le couple. Étant donné que le flux dans la machine est constant, il est possible de générer des variations de couple en agissant sur le courant i_{qs}. Par exemple, pour accélérer la machine et augmenter sa vitesse, une référence de courant $i_{qs}{}^*$ positive est imposée.

Il est également possible d'automatiser la commande de la référence de courant $i_{qs}{}^*$ en la reliant à la sortie d'un régulateur de vitesse. Ce régulateur de vitesse pilotera la référence de couple (et donc $i_{qs}{}^*$) de manière à asservir au mieux la vitesse à une vitesse de consigne w_m^*. En imposant que le flux magnétique (φ_{qr}) soit égal à zéro, les équations de la machine dans un référentiel lié au champ tournant se simplifient :
Pour le rotor :

$$\begin{cases} R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = 0 \\ R_r I_{qr} + (w_s - w_m)\varphi_{dr} = 0 \end{cases} \tag{IV.16}$$

$$\begin{cases} I_{dr} = \frac{\varphi_{dr} - MI_{ds}}{L_r} \\ I_{qr} = \frac{-MI_{qs}}{L_r} \end{cases} \tag{IV.17}$$

On remplace **(IV.16)** dans **(IV.17)** on obtient **(IV.18)** :

$$\begin{cases} \varphi_{dr} + T_r \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = MI_{ds} \\ (w_s - w_m) = \frac{MI_{qs}}{T_r \varphi_{dr}} \end{cases} \tag{IV.18}$$

Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \sigma L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + \frac{M}{L_r}\frac{d\varphi_{dr}}{dt} - w_s \sigma L_s I_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \sigma L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + w_s \frac{M}{L_r}\varphi_{dr} + w_s \sigma L_s I_{ds} \end{cases} \tag{IV.19}$$

Avec :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \tag{IV.20}$$

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} \tag{IV.21}$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \tag{IV.22}$$

Ou :
σ : Le coefficient de fuite totale
T_s : Constante de temps statorique
T_r : Constante de temps ratorique
En régime permanent :

$$I_{qs}^* = C_e^* \frac{Lr}{PM\varphi_{dr}^*} \tag{IV.23}$$

$$I_{ds}^* = \frac{1}{M}\varphi_{dr}^* \tag{IV.24}$$

$$\begin{cases} V_{ds}^* = R_s I_{ds}^* - w_s^* \sigma L_s I_{qs}^* \\ V_{qs}^* = R_s I_{qs}^* + w_s^* \frac{M}{L_r}\varphi_{dr}^* + w_s^* \sigma L_s I_{ds}^* \end{cases} \tag{IV.25}$$

$$w_s^* = \frac{M I_{qs}^*}{T_r \varphi_{dr}^*} + w_r^* \tag{IV.26}$$

Après simplification l'équation devenu :

$$\begin{bmatrix} V_{ds}^* \\ V_{qs}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds}^* \\ I_{qs}^* \\ \varphi_{dr}^* \end{bmatrix} + w_s^* \begin{bmatrix} 0 & -\sigma L_s & 0 \\ \sigma L_s & 0 & \frac{M}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds}^* \\ I_{qs}^* \\ \varphi_{dr}^* \end{bmatrix} \tag{IV.27}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} Rs & 0 & 0 \\ 0 & Rs & 0 \end{bmatrix} \tag{IV.28}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & -\sigma L_s & 0 \\ \sigma L_s & 0 & \frac{M}{L_r} \end{bmatrix} \tag{IV.29}$$

Il existe deux méthodes de commande vectorielle : la commande vectorielle directe et la commande vectorielle indirecte.

Dans la méthode de commande indirecte, l'angle de Park (θ_s) est calculé en utilisant la pulsation statorique qui est reconstituée à partir de la vitesse de la machine et de la pulsation rotorique . Quant à la méthode de commande directe, l'angle de Park est calculé directement en utilisant les grandeurs mesurées ou estimées.

Lorsqu'il n'y a pas de régulation de flux, on parle de commande vectorielle à boucle ouverte. Dans ce cas, le flux est déterminé par I_{ds}. Dans la version à boucle fermée, cette pulsation est estimée en se basant sur la valeur du flux rotorique ou du courant magnétisant.

IV.8 Modélisation de la commande vectorielle commandé en tension sous l'environnement Matlab Simulink

La commande vectorielle commandée en tension du moteur asynchrone est basée sur un schéma synoptique composé de quatre blocs principaux :

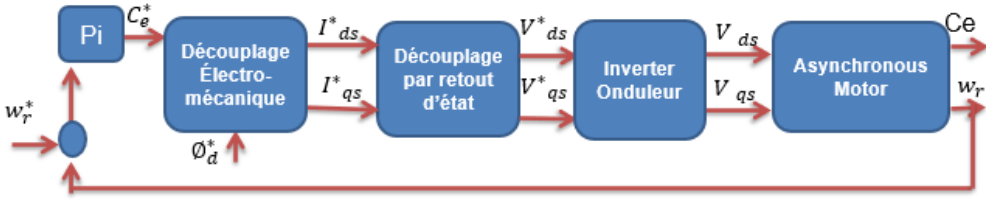

FIG. IV.13 : Schéma synoptique de la commande vectorielle commandé en tension

Découplage électromagnétique Il permet de séparer les grandeurs de commande électromagnétiques du moteur asynchrone.

Il reçoit deux entrées, à savoir le couple électromagnétique de référence (C_e*) et le flux rotorique de référence (φ_{dr}*). En sortie de ce bloc, nous obtenons les courants de stator de référence (I_d* et I_{qs}*), qui correspondent respectivement au courant direct et au courant quadrature.

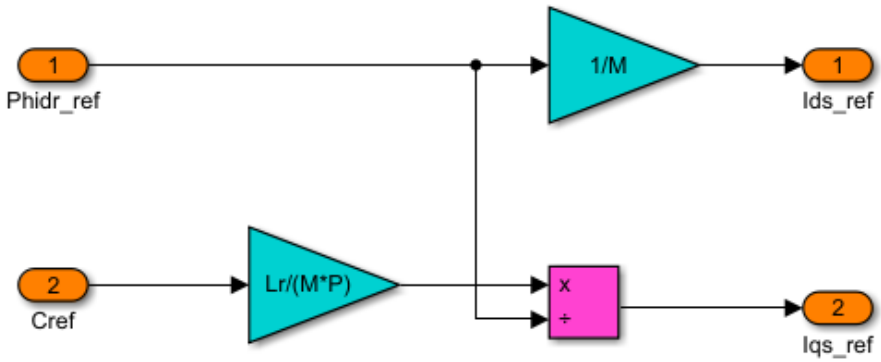

FIG. IV.14 : Découplage électromagnétique

Découplage par retour d'état Il permet de réaliser le découplage des courants de stator de référence (I_d* et I_{qs}*). Il reçoit ces deux grandeurs en entrée et produit en sortie les tensions de stator de référence (V_{ds}* et V_{qs}*), qui représentent les tensions directes et quadrature.

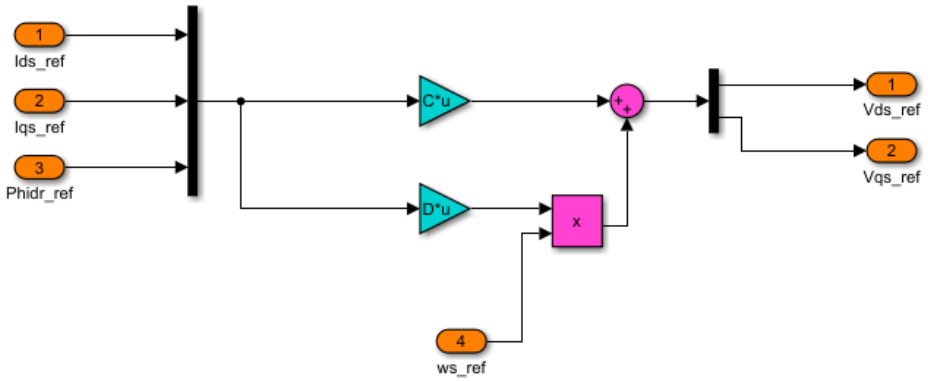

FIG. IV.15 : Découplage par retour d'état

Ou w_s^* est calculé avec le bloc suivant :

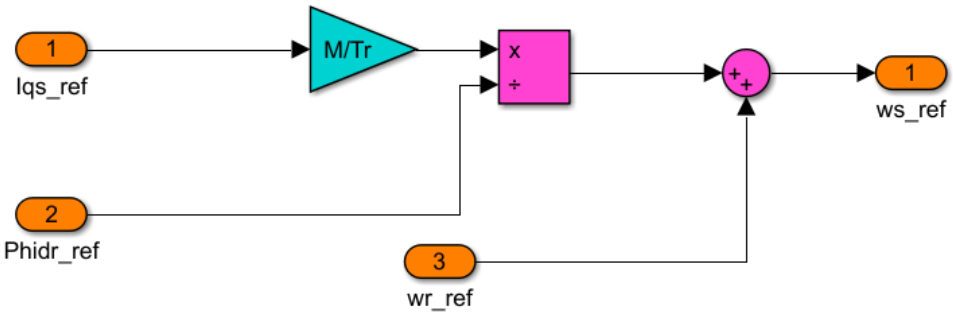

FIG. IV.16 : Calcul de vitesse

Onduleur : Il convertit les tensions de stator de référence (V_{ds}* et V_{qs}*) en tensions réelles de stator (V_{ds} et V_{qs}).

Il reçoit les tensions de stator de référence en entrée et génère les tensions de stator effectives en sortie, qui sont appliquées aux enroulements du stator du moteur asynchrone.

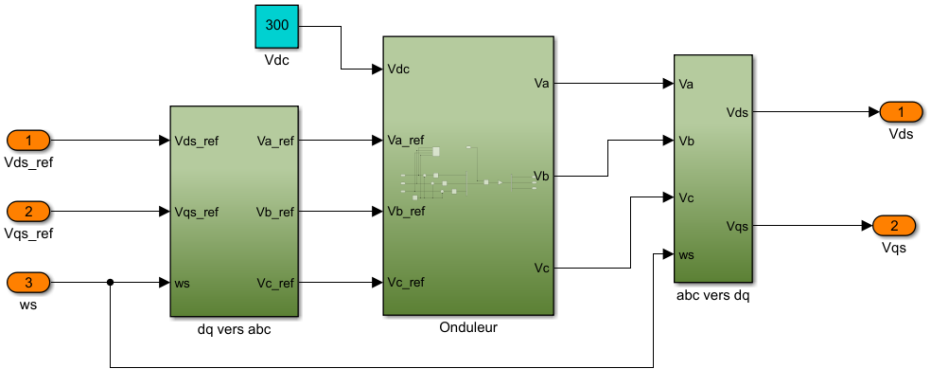

FIG. IV.17 : La commande d'onduleur

Moteur asynchrone : Elle reçoit les tensions de stator réelles (V_{ds} et V_{qs}) en entrée et produit en sortie le couple électromagnétique (C_e) et la vitesse de rotation du moteur (Ω_r). Le signal de vitesse de rotation (Ω_r) est comparé avec la référence de vitesse de rotation (Ω_r*), puis il est entré dans le bloc "PID" (proportionnel, intégral, dérivé) pour être traité et générer la référence de couple électromagnétique (C_e)* qui est renvoyée au premier bloc de la boucle. **Remarque :** dans la simulation on a pris $\mathrm{w}_m = w_r$

IV.9 Simulation numérique

Pour la simulation du système de commande vectorielle à flux orienté, il est nécessaire de mettre en place plusieurs blocs en se basant sur l'étude théorique de sa structure.

Le schéma global est représenté dans la figure **Fig. IV.18** :

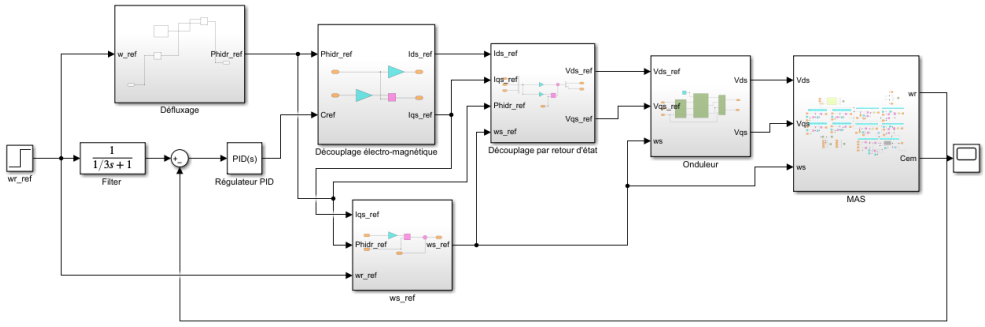

FIG. IV.18 : Schéma complet de la commande vectorielle commandé en tension

IV.9.1 Présentation des résultants de simulation

Pour exposer les résultats de la simulation, nous présentons les conclusions tirées de l'expérimentation de la commande vectorielle indirecte en tension.

Nous avons effectué des simulations dans divers scénarios, notamment en faisant varier la charge, la vitesse et les paramètres tels que la résistance du rotor.

IV.9.2 Simulation avec variation par couple résistance

La vitesse

- De 0 à 2 secondes, la vitesse du moteur atteint la vitesse de référence (w_r^*). Cela signifie que le système suit la vitesse de référence pendant cette période.
- À 2 secondes, lorsque nous appliquions un couple résistant de 5 N.m, la vitesse chute légèrement mais elle revient à la vitesse de consigne en environ 3 secondes. Le système répond donc à cette perturbation et ramène la vitesse à sa valeur de consigne.

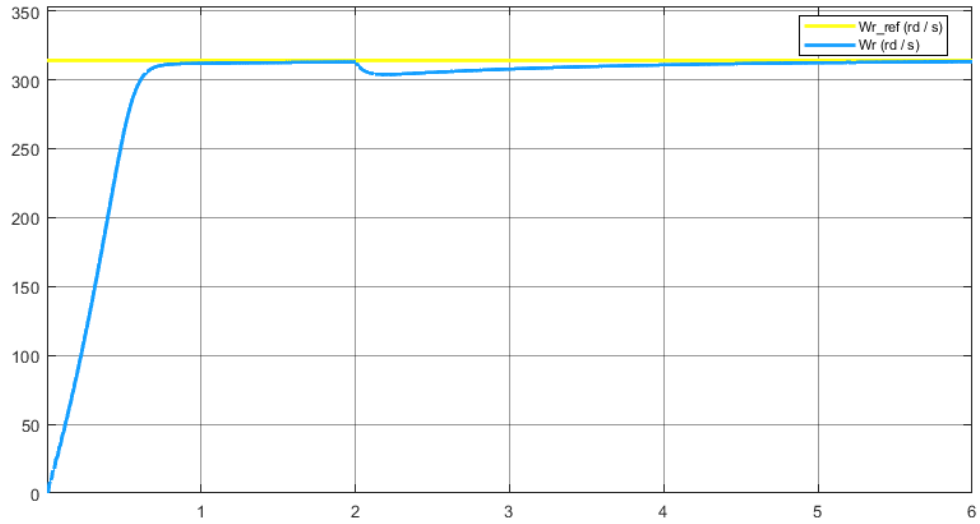

FIG. IV.19 : La vitesse réelle et la vitesse de référence

Le couple

- De 0 à 2 secondes, le couple présente des perturbations initiales mais finit par se stabiliser à la valeur de 0, qui était la valeur initiale.
- À 2 secondes, lorsque nous introduisons un couple de 5 N.m, le couple augmente jusqu'à atteindre la valeur désirée de 5 N.m et se stabilise à cette valeur. Le système répond donc en ajustant le couple de sortie.

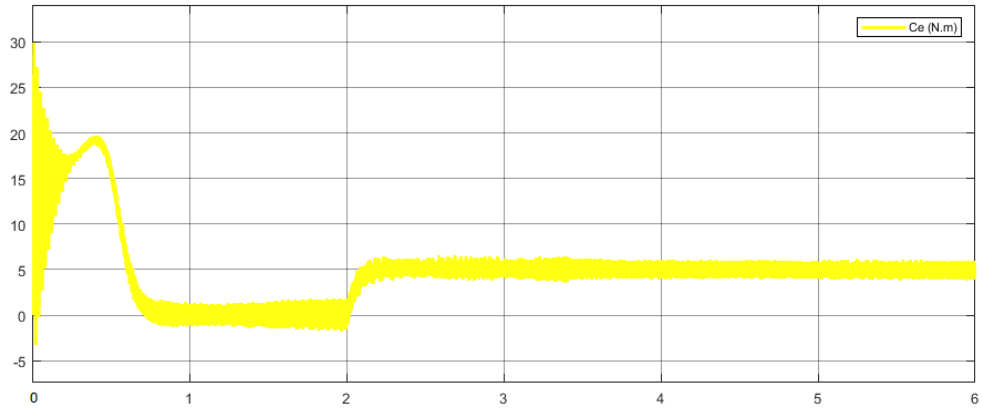

FIG. IV.20 : Variation de couple en fonction de temps

Les flux :

- Le flux φ_{qr}, de 0 à 2 secondes, présente des perturbations initiales mais finit par se stabiliser à la valeur de 0 qui était la valeur initiale.
- À 2 secondes, lorsque nous appliquons un couple de 5 N.m, le flux φ_{qr} chute légèrement, mais il revient à sa valeur initiale après cette perturbation.

- De manière similaire, le flux φ_{dr}, de 0 à 2 secondes, présente des perturbations initiales pour atteindre la valeur de réference ($\varphi^*_{dr} = 0.9$ Wb). Ensuite, à 2 secondes, le φ_{dr} chute légèrement en raison de l'augmentation du couple mais il revient rapidement à sa valeur de consigne qui est de 0.9.

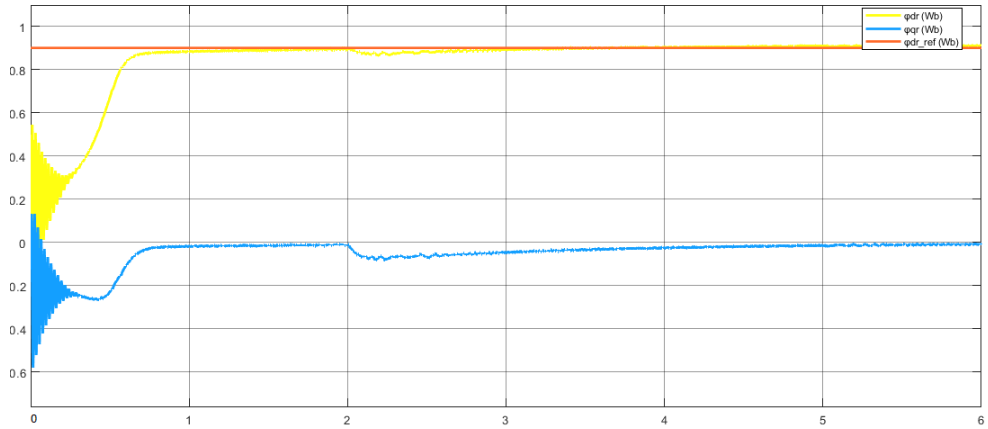

FIG. IV.21 : Variation des flux lors du changement du couple résistant

Le courant I_{qs} :

- De 0 à 2 secondes, le courant I_{qs} présente des perturbations initiales pour atteindre une valeur stable.
- À 2 secondes, le courant I_{qs} augmente en raison de l'augmentation du couple appliqué puis se stabilise à une nouvelle valeur. Le système ajuste donc le courant pour compenser le couple appliqué.

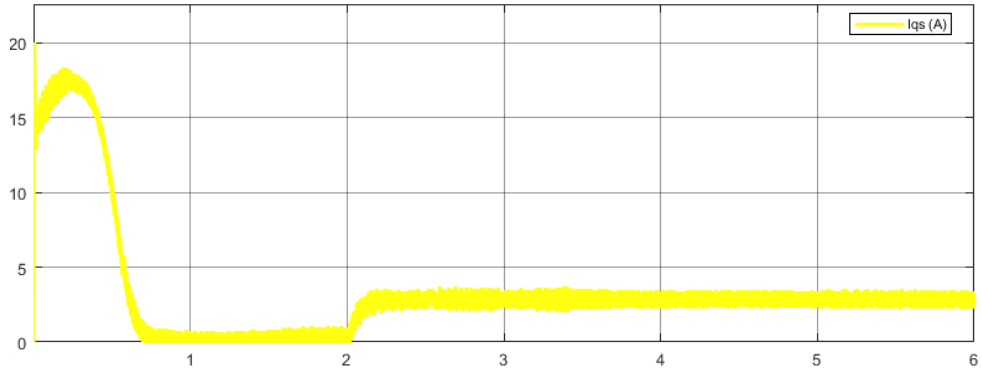

FIG. IV.22 : Variation du courant I_{qs} lors du changement du couple résistant

Le courant I_{ds} :

- Le courant I_{ds} augmente légèrement de sa valeur initiale lors de l'augmentation du couple.

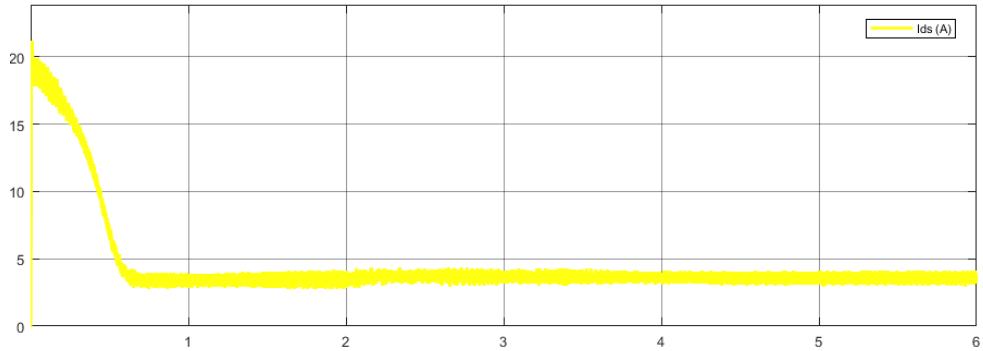

FIG. IV.23 : Variation du courant I_{ds} lors du changement du couple résistant

IV.9.3 Simulations avec variation de vitesse de consigne

Vitesse :

- De 0 à 4 secondes, la vitesse du moteur atteint la vitesse de référence (w_r^*) en environ 0.75 seconde. Cela signifie que le système suit rapidement la vitesse de référence pendant cette période.
- À 4 secondes, lorsque nous changeons la vitesse de référence, la vitesse du moteur suit cette nouvelle vitesse de consigne et l'atteint en environ une seconde. Le système répond donc efficacement au changement de consigne de vitesse.

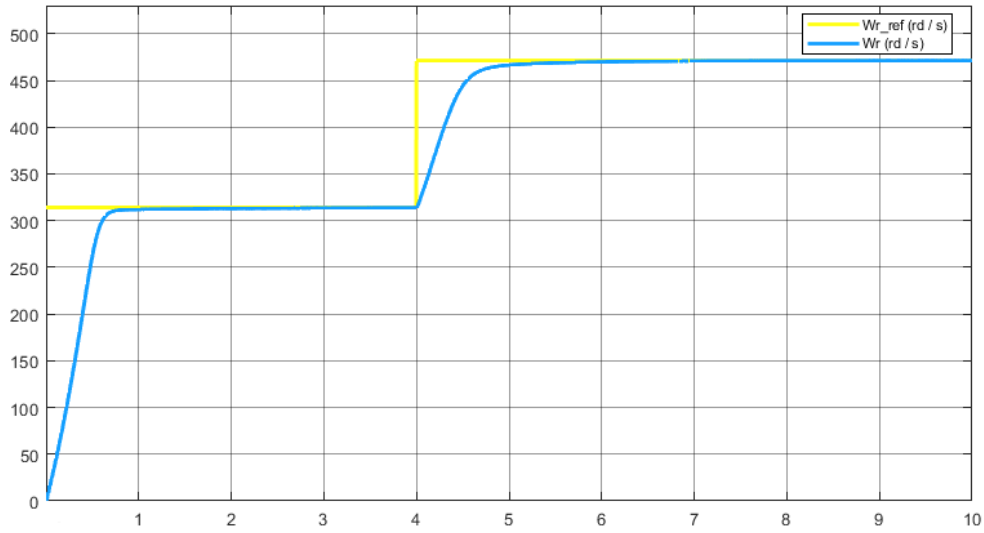

FIG. IV.24 : Variation de la vitesse réelle par rapport à la vitesse de référence

Le couple :

- De 0 à 4 secondes, le couple présente des perturbations initiales mais finit par se stabiliser à la valeur de 0 qui était la valeur initiale.
- À 4 secondes, lorsque la vitesse de consigne change, le couple augmente jusqu'à atteindre 10 N.m en raison du changement de consigne de vitesse mais ensuite il

revient à sa valeur initiale de 0. Le système répond donc en ajustant le couple de sortie en fonction de la nouvelle consigne de vitesse.

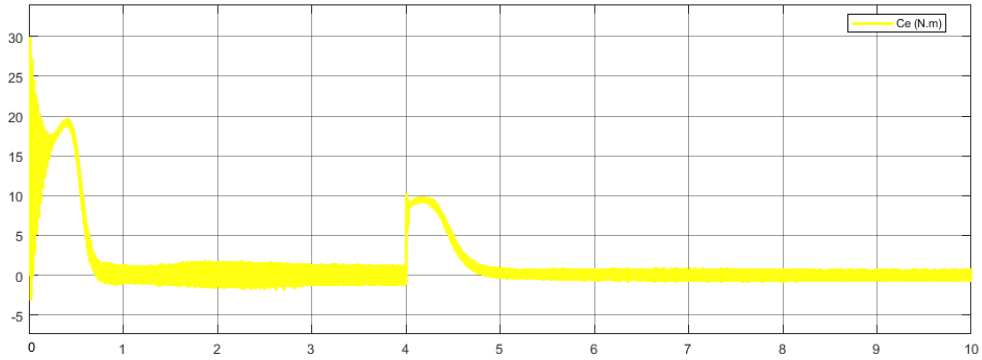

FIG. IV.25 : Variation du couple lors du changement de vitesse

Les flux :

- Le flux φ_{qr}, de 0 à 4 secondes, présente des perturbations initiales mais finit par se stabiliser à la valeur de 0 qui était la valeur initiale.
- À 4 secondes, lors du changement de consigne de vitesse, le flux φ_{qr} chute légèrement mais il revient rapidement à sa valeur de consigne qui est de 0.
- Le flux φ_{dr}, de 0 à 4 secondes, présente des perturbations initiales pour atteindre la valeur de référence ($\varphi_{dr}^* = 0.9$ Wb). Ensuite, à 4 secondes, lorsque la consigne de vitesse change, la valeur de référence du flux φ_{dr} change en raison du défluxage. Le flux φ_{dr} suit alors la nouvelle consigne de flux φ_{dr}^*. Le système répond donc en ajustant le flux φ_{dr} en fonction de la nouvelle référence de flux.

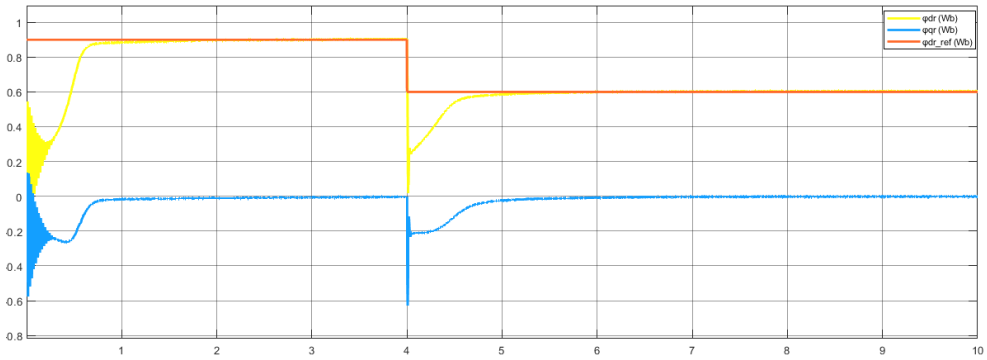

FIG. IV.26 : Variation du flux lors du changement de vitesse

Le courant I_{qs} :

- De 0 à 4 secondes, le courant I_{qs} présente des perturbations initiales pour atteindre une valeur fixe de 0.

- À 4 secondes, le courant I_{qs} augmente en raison de l'augmentation de la valeur de consigne de vitesse. Ensuite, il revient à sa valeur initiale de 0 pour atteindre un nouvel équilibre. Le système répond donc en ajustant le courant I_{qs} en fonction de la consigne de vitesse modifiée.

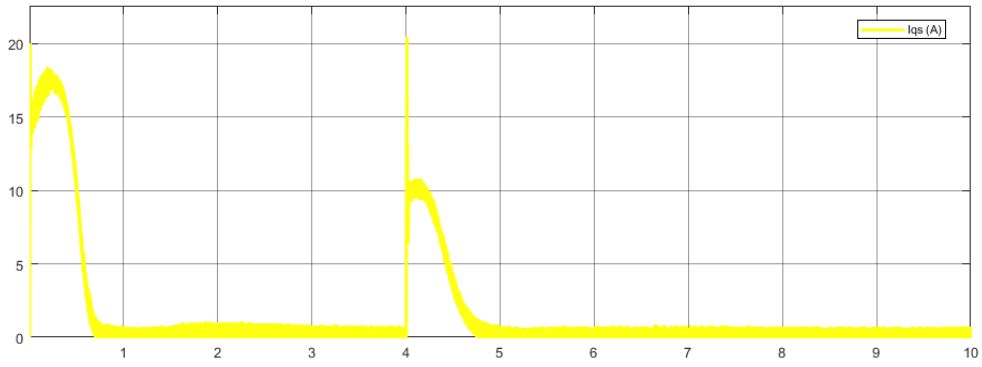

FIG. IV.27 : Variation du courant I_{qs} lors du changement de vitesse

Le courant I_{ds} :

- De 0 à 4 secondes, le courant I_{ds} atteindre une valeur fixe dans 0.7 seconde.
- À 4 secondes, le courant I_{ds} augmente en raison de l'augmentation de la valeur de consigne de vitesse puis il se stabilise à une valeur légèrement inférieure à sa valeur initiale fixe. Cela indique que le système ajuste le courant I_{ds} pour s'adapter au changement de consigne de vitesse.

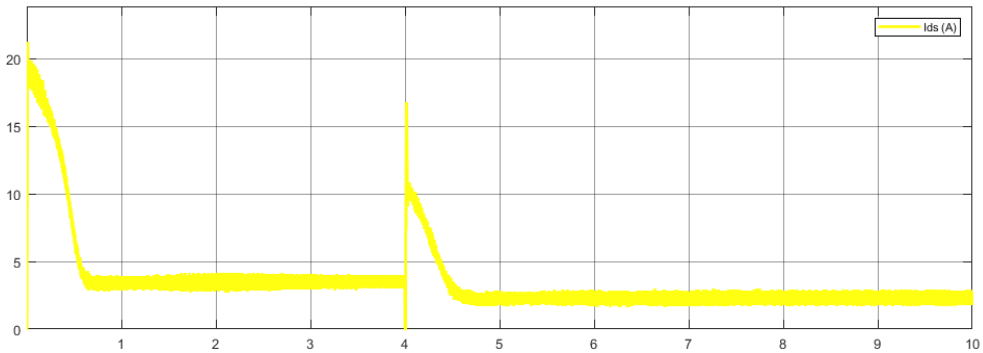

FIG. IV.28 : Variation du courant I_{ds} lors du changement de vitesse

IV.10 Conclusion

En conclusion, la modélisation et la simulation du moteur asynchrone ainsi que l'application de la commande vectorielle commandée en tension sont des techniques clés pour garantir un fonctionnement stable et efficace du moteur dans le système de dessalement alimenté par l'énergie photovoltaïque. Grâce à la modélisation mathématique et aux simulations réalisées sur MATLAB, il est possible d'ajuster les paramètres de commande afin de maintenir une vitesse constante du moteur, assurant ainsi un débit d'eau stable et fiable dans le système de dessalement.

En résumé, ce chapitre fournit une approche essentielle pour la modélisation, la simulation et le contrôle du moteur asynchrone dans le contexte de la station de dessalement alimentée par l'énergie photovoltaïque.

L'utilisation de la commande vectorielle commandée en tension permet de maintenir la stabilité du débit d'eau, optimisant ainsi l'efficacité globale du système. Ces techniques sont indispensables pour garantir un fonctionnement fiable et efficace du système de dessalement en maximisant l'utilisation de l'énergie solaire et en assurant la durabilité de la station de dessalement de l'eau de mer.

Conclusion Générale

Conclusion générale

En conclusion de notre mémoire portant sur le dimensionnement d'une station de dessalement d'eau par le procédé d'osmose inverse alimenté par le photovoltaïque.

Notre travail a été axé sur l'objectif fondamental d'assurer la stabilité de la machine asynchrone, indépendamment de sa vitesse de rotation, afin de répondre aux besoins en puissance pour le fonctionnement optimal des pompes, éléments essentiels de notre station de dessalement.

Cependant, tout au long de nos études, nous avons pris en compte les conditions météorologiques variables qui prévalent tout au long de l'année. Nous sommes conscients que cette variabilité peut entraîner des fluctuations de puissance qui pourraient ne pas toujours atteindre les niveaux requis pour le fonctionnement des pompes. En réponse à ce défi, nous avons proposé une solution proactive consistant à intégrer notre système photovoltaïque au réseau électrique lorsque nous disposons d'un excédent de puissance pendant les mois les plus ensoleillés. Dans les périodes où nous ne pouvons pas récupérer suffisamment de puissance pour faire fonctionner nos pompes, nous prévoyons de nous approvisionner auprès du réseau électrique.

Par ailleurs, nous avons également réfléchi à l'utilisation optimale de l'installation photovoltaïque que nous avons dimensionnée. Nous nous sommes posé la question de savoir si nous devrions l'utiliser exclusivement pour alimenter la station de dessalement, en intégrant le système au réseau électrique lorsqu'il y a un surplus de puissance ou lorsque nous ne pouvons pas atteindre la puissance de fonctionnement requise pour nos pompes. Une autre option serait de considérer l'installation photovoltaïque comme une source d'énergie destinée à être pleinement intégrée au réseau électrique. La prise de décision à ce sujet dépendra de plusieurs facteurs, notamment le prix fixé par l'Algérienne des Eaux (ADE) pour le litre d'eau et le prix fixé par SONELGAZ pour le kilowattheure. Des études économiques approfondies seront nécessaires pour déterminer la meilleure approche.

En conclusion, notre mémoire met en évidence les défis auxquels nous sommes confrontés lors du dimensionnement d'une station de dessalement d'eau alimentée par le photovoltaïque et de son intégration dans le réseau électrique. Nous reconnaissons que les conditions météorologiques variables représentent un obstacle majeur pour atteindre une puissance constante, et nous sommes conscients de l'importance de concevoir des stratégies appropriées pour garantir un approvisionnement en énergie stable et rentable. Les décisions concernant l'utilisation de l'installation photovoltaïque devront être prises en tenant compte des considérations économiques, ainsi que des prix de l'eau et de l'électricité fixés par les entités compétentes. Notre travail jettera les bases pour des études plus approfondies afin d'optimiser l'efficacité et la rentabilité de cette solution de dessalement d'eau respectueuse de l'environnement.

Bibliographie

Bibliographie

[1] Senouci, K., Ahmed-Belbachir, W., Ahmed-Belbachir, M. (2022). Energies renouvelables : Transition et perspectives Cas de l'Algérie. Al Bashaer Economic Journal, 8(1), 1029-1045.
https ://www.asjp.cerist.dz/en/article/186006

[2] Saidi, H. (2016). Energies Renouvelables. Université Hassiba Benbouali de Chlef.

[3] Algerie Eco. (2022, 12 octobre). Énergie solaire : l'idée d'une politique industrielle euro-algérienne plébiscitée. Algerie Eco. Récupéré le [date de votre consultation].
https ://www.algerie-eco.com/2022/10/12/energie-solaire-lidee-dune-politique-industrielle-euro-algerienne-plebiscitee/

[4] Flamme Bleue Environnement. Panneau solaire vs panneau photovoltaïque. Flamme Bleue Environnement. Récupéré le [02/5/2023], à partir de
https ://www.flammebleue-environnement.fr/panneau-solaire-vs-panneau-photovoltaique/.

[5] A. Khelif, "potentiel et marche photovoltaique algérien", New Energy Algeria NEAL

[6] A. Mefti ; M.Y Bouroubi ; H. Mimouni, "Evaluation du potentiel énergétique solaire", Bulletin des Energies Renouvelables, N° 2, P12, décembre 2002

[7] Connaissance des Énergies. Énergie éolienne. Connaissance des Énergies. Récupéré le [06/05/2023], à partir de
https ://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-eolienne.

[8] Boukhari Ouissem, Choumane Ahmed. (2018). L'énergie éolienne en Algérie : potentiel et réalisations. Université de Blida 2, Faculté des sciences économiques, de gestion et commerciales.

[9] Kenya : la centrale géothermique de Menengai III entrera en service en décembre 2022. Afrik21. Récupéré le [05/05/2023], à partir de
https ://www.afrik21.africa/kenya-la-centrale-geothermique-de-menengai-iii-entrera-en-service-en-decembre-2022/

[10] Wassila Iguergazix Dahmoun. (2021). Energies renouvelables : l'un des pivots du développement durable en Algérie. INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED RESEARCH ON PLANNING AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 4(1), 46-68. doi :
10.21608/IJARPSD.2021.187269.

[11] EDF. (Date inconnue). Qu'est-ce que la biomasse ? EDF. Récupéré le [date de votre consultation], à partir de
https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-la-biomasse

[12] Le point sur l'énergie hydraulique. Mon Energie Verte. Récupéré le [06/05/2023], à partir de
https ://www.mon-energie-verte.com/le-point-sur-lenergie-hydraulique/.

[13] Ali Smai, Mohamed Lamine Zahi. (2016). Les Potentialites De L'algerie En Energies Renouvelables. Recherches économiques et managériale, 10(1), 27-46.
https://www.asjp.cerist.dz/en/article/47030

[14] Festy, B, Hartemann, P, Ledrans, M, Levallois, P, Payment, P, Tricard, D. (2003). Qualité de l'eau. Environnement et santé publique - Fondements et pratiques, (pp. 333-368).

[15] Éric gamme. (2000). Hydrologie : cycle de l'eau et modélisation pluie-débit, 1-45.

[16] Loudière, D, Gourbesville, P. (2020). L'eau et les changements climatiques. La Houille Blanche, Numéro 3, 76–81
https ://doi.org/10.1051/lhb/2020024.

[17] Sahel Souleyman, Bengrina Mohammed hamza, Mahcene Zoubida. (2020). L'innovation une problématique de la gestion de l'eau en Algérie. ElWahat pour les Recherches et les Etude, 13(1), 1264-1285.
https ://www.asjp.cerist.dz/en/article/120064.

[18] Méricq, J.-P. (2009). Approche intégrée du dessalement d'eau de mer : Distillation membranaire sous vide pour la réduction des rejets salins et possibilités de couplage avec l'énergie solaire (Doctoral dissertation). INSA Toulouse.

[19] Tata-Ducru. (2009). Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes [Mémoire, AgroParisTech-ENGREF, Agence française de développement].

[20] Mandri, Y. (2011). Étude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide (Doctoral dissertation, Lyon).

[21] Bouden Abdelmalek, Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque, Université Mentouri Constantine, 2008.

[22] Pétion, S. (2009). Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques (Thèse de doctorat). Université de Toulouse.

[23] Fonctionnement d'un panneau photovoltaïque. Tuco Énergie. Récupéré le [date de votre consultation], à partir de
https ://www.tucoenergie.fr/guides/fonctionnement-panneau-photovoltaique/

[24] Agroui, K., Belghachi, A., Collins, G., Farenc, J. (2007). Quality control of EVA encapsulant in photovoltaic module process and outdoor exposure. Desalination

[25] Cottier, J.-M., Mermoud, A., Villoz, M., Graf, J. (1996). Centrales photovoltaïques : Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets A l'usage des bureaux d'ingénieurs. Programme d'action PACER - Energies renouvelables. Office fédéral des questions conjoncturelles.

[26] Li, S. (2015). A maximum power point tracking method with variable weather parameters based on input resistance for photovoltaic system. Energy Conversion and Management, 106, 290-299.
https ://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.09.055

[27] Lakhdar, E., Khalid, C. (2020). Etude et Optimisation du transfert d énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximal (MPPT).

[28] Kacimi, N., Grouni, S., Idir, A., Seghir Boucherit, M. (2020). New improved hybrid MPPT based on neural network-model predictive control-kalman filter for photovoltaic system. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 20(3), 1230.

[29] Messalti, S. (2015). A new neural networks MPPT controller for PV systems. In IREC2015 the sixth international renewable energy congress (pp. 1-6)

[30] Henri, P. (2002). Héliothermique le Gisement Solaire Méthodes et Calculs. Éditions du GRE. Imprimerie de L'UPS.

[31] Rashid, M. H. (2001). Power Electronics. Academic Press Series in Engineering.

[32] Zainudin, H. N. (2010). Comparison Study of Maximum Power Point Tracker Techniques for PV Systems. In 14th Int. Middle East Power Syst. Conf. (MEPCON'10), Cairo Univ. Egypt, December 19-21, 2010 (pp. 750-755).

[33] Pati, A. K., Sahoo, N. C. (2016). A new approach in maximum power point tracking for a photovoltaic array with power management system using Fibonacci search algorithm under partial shading conditions. Energy Systems, 7, 145-172.
https ://doi.org/10.1007/s12667-015-0185-1

[34] Tsang, K. M., Chan, W. L. (2013). Model based rapid maximum power point tracking for photovoltaic systems. Energy Conversion and Management, 70, 83-89.
https ://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.02.018.

[35] Teodorescu, R., Liserre, M., Rodriguez, P. (2011). Grid converters for Photovoltaic and wind power systems. Jhon Wiley Sons, Ltd.

[36] Gaiddon, B., Tran-Quoc, T., Bacha, S., Duvauchelle, C. (2010). Typologie des onduleurs pour systèmes photovoltaïques.

[37] Séguier, G., Notelet, F. (1987). Electrotechnique industrielle. Téch et Doc.

[38] Alghoul, M. A., et al. (2016). Design and experimental performance of brackish water reverse osmosis desalination unit powered by 2 kW photovoltaic system. Renewable Energy, 93, 101-114.

[39] Bechiri Sarra, Boukechira Manel. (2022).Aspects énergétiques des techniques de dessalement : bilans,performances, et comparaison(mémoire de master, école supérieure de technologie industrielle Annaba)

[40] Gandhidasan, P., Sultan A. Al-Mojel. (December 2009). Effect of feed pressure on the performance of the photovoltaic powered reverse osmosis seawater desalination system. Desalination, 34(12), 2824-2830.
https ://doi.org/10.xxxxx/xxxx

[41] Zerrouki, Z., Bereksi Reguig, R. (2016/2017). Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome [Mémoire de master, Université Abou Bakr Belkaid de Tlemcen]

[42] Partir.com. (s.d.). Annaba : Récupéré le 7 juin 2023, de
https ://www.partir.com/Algerie/Annaba/2506999/quand-partir.html

[43] Baghli, L. (2020). Modélisation et Commande de la Machine Asynchrone. Tlemcen, Algérie : Université de Tlemcen - FT.

[44] Bounadja, E. (2020). Modélisation des machines électriques (Cours et Exercices).

[45] Sahraoui, M. (2010). Etude comparative des méthodes de diagnostic de MAS (Thèse de doctorat). Université Biskra, Biskra, Algérie.