

Université 20 Août 1955-Skikda

Faculté de Technologie

Département : Génie Mécanique

Ref : **D012119010D**



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة

كلية التكنولوجيا

قسم: الهندسة الميكانيكية

المرجع: **D012119010D**

Thèse présentée en vue de l'obtention  
Du diplôme de  
**Doctorat en sciences**

En Electromécanique

**Contribution à l'optimisation dynamique des systèmes  
hybrides combinant énergies renouvelables et systèmes  
d'appoint**

Présentée par :

**Toufik SEBBAGH**

Soutenue publiquement le **20/06/2019**

**Devant le jury composé de :**

<b>M. Abderrezak METATLA</b>	<b>Pr.</b>	<b>Président</b>	<b>Université 20 Août 1955 - Skikda</b>
<b>M. Ridha KELAIAIA</b>	<b>MCA</b>	<b>Rapporteur</b>	<b>Université 20 Août 1955 - Skikda</b>
<b>M. Abdelouahab BENRETEM</b>	<b>Pr.</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université d'Annaba</b>
<b>M. Youcef SOUFI</b>	<b>MCA</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Tébessa</b>
<b>M. Abdelaziz LAKEHAL</b>	<b>MCA</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Souk Ahras</b>
<b>M. Abdelouahab ZAATRI</b>	<b>Pr.</b>	<b>Invité</b>	<b>Université de Constantine 1</b>



## REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont, et c'est bien normal, à mes directeurs de thèse Pr. Abdelouaheb ZAATRI et Dr. Ridha KELAIAIA qui ont accepté d'assurer mon encadrement. Ils m'ont encouragé, soutenu et surtout font confiance durant ces années. Je les remercie également, pour leurs relectures finales méticuleuses de chacun des chapitres qui m'a sans aucun doute permis de préciser mon propos. J'ai beaucoup appris à leurs contacts et les remercie pour tout ce qu'ils m'ont apporté. Qu'Abdelouahab Zaatri et Ridha Kelaiaia soient assurés de ma gratitude pour leur disponibilité, leur ouverture et la confiance qu'ils m'ont accordée.

Mes remerciements vont également au Président et aux membres du Jury qui ont accepté d'évaluer mes travaux et pour l'intérêt qu'ils leur ont porté.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Monsieur Abderrezak METATLA, professeur à l'Université 20 Août 1955 - Skikda, pour avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Je remercie très vivement Monsieur Abdelouahab BENRETEM, professeur à l'Université Badji Mokhtar de Annaba, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de juger mon travail.

Toute ma reconnaissance va à Monsieur Youcef SOUFI maître de conférences à l'université Larbi Tébessi de Tébessa, à qui j'exprime mes sincères remerciements pour sa participation dans le jury.

Je tiens à remercier très vivement Monsieur Abdelaziz LAKEHAL maître de conférences à l'Université Mohamed Cherif Messaidia de Souk Ahras, d'avoir accepté de participer dans le jury de ma thèse.

J'adresse aussi mes remerciements au Dr. Lokmane ABDELOUAHED, maître de conférences à l'INSA Rouen, pour son aide, ses conseils et son accueil chaleureux au sein de laboratoire LSPC.

J'exprime ma gratitude au Pr. Taouk BECHARA, directeur du laboratoire LSPC pour son accueil au laboratoire.

Mes remerciements vont également à Dr. Assia ABDELOUAHED, maître de conférences à l'Université 20 Août 1955 Skikda, pour son soutien, ses remarques et conseils

et ses relectures à plusieurs reprises.

Enfin, je ne peux terminer ces remerciements sans mentionner mes proches, à qui je dédie ce travail.

A mes parents qui n'ont cessé de me combler par leur amour et leur tendresse. Leurs prières et Bénédictionns m'ont été d'un grand secours tout au long de ma vie.

A mon épouse, l'amour de ma vie, qui m'a soutenue toutes ces années, et dont sa présence à mes côtés a tout changé.

A mes trois petits, Amina, Adem et Mohamed, que dieux vous bénéfice.

A mes frères et sœurs.

A mes beaux-parents.

## ملخص

إن التقدم في تكنولوجيات الطاقة المتجددة وقدرة هذه الأنظمة على الحد من ظاهرة الإحتباس الحراري، يشجع استخدام هذه الأنظمة. مع إمكانيات وفيرة لا تزال غير مستغلة، فإن الطاقة الكهروضوئية وطاقة الرياح مفيدة اقتصاديًا وبيئيًا. و بما أن الطبيعة المتقلبة لهذه المصادر تحد من الكفاءة الطاقوية للأنظمة التي تعتمد على مصدر واحد فإن مزج أنظمة الطاقات المتجددة مع أجهزة التخزين والأنظمة التقليدية لتشكيل نظام هجين تمكننا من مواجهة قضايا عدم اليقين، وبالتالي تلبية الإحتياجات الطاقوية.

التصميم الأمثل لأنظمة الطاقات المتجددة الهجينة يجعلها فعالة من حيث التكلفة وموثوقة وصديقة للبيئة.

في هذا السياق، فإن المساهمة المتوخاة في هذه الرسالة هي المساهمة في العثور على التصميم الأمثل للأنظمة الهجينة، مما يسمح بإنتاج الطاقة القصوى بتكلفة منخفضة، مع احترام المتطلبات البيئية، باستخدام تقنية التحسين الخفي مع الأخذ في الاعتبار المعايير الاقتصادية والفنية والبيئية.

يتم تطبيق النهج المقترح على ضخ المياه وري المحاصيل، وإثبات لأول مرة (على حد علم المؤلف)، الفعالية الإقتصادية للوحدات الطاقوية الموزعة مقارنة مع نظام إنتاج الطاقة المركزي لنظام مكون مجموعة أنظمة ذات طاقات متجددة بنسبة 100%. كما يستخدم النهج لتقديم أفضل استخدام لنظام طاقي ذو حجم ثابت بمصادر متجددة مستخدم لري المحاصيل.

**الكلمات المفتاحية: الحجم الأمثل، البرمجة الخطية، الأنظمة الهجينة، الطاقات المتجددة ضخ المياه، الري**

## ABSTRACT

The advances in renewable energy technologies and the ability of these systems to act against the global warming, promote the use of renewable energy systems (RES). With abundant potential still under-exploited, photovoltaics and wind energy are economically and environmentally beneficial. However, the fluctuating nature of sources decreases the energy efficiency of mono-source RES. The combination of RES with storage devices and conventional systems to form Hybrid renewable energy systems (HRES) can face the uncertainty issues of RES and thus satisfy the demand load.

The optimal design of HRES makes them cost effective, reliable and environment friendly.

This thesis deals with the optimal design of HRES, using linear optimization technique, considering economic, technical and environmental criteria.

The proposed approach is applied to water pumping and crops irrigation, and demonstrate for the first time (to the Author knowledge), the cost effectiveness of distributed units Vs central of a 100% RES. The approach is also used to present the optimal the use of a fixed size RES to the irrigation of crops.

***Keywords: Optimal sizing, Linear programming, HRES, water pumping, irrigation***

## RÉSUMÉ

Les progrès des technologies des énergies renouvelables et la capacité de ces systèmes à agir contre le réchauffement climatique, favorisent l'utilisation de systèmes d'énergie renouvelable (SER). Avec un potentiel abondant encore sous-exploité, le photovoltaïque et l'énergie éolienne sont avantageux sur le plan économique et environnemental. Cependant, la nature fluctuante des sources diminue l'efficacité énergétique des SERs mono-source. La combinaison de SERs avec les dispositifs de stockage et des systèmes conventionnels pour former des Systèmes Hybrides à Energie Renouvelable (SHERs) peut faire face aux problèmes d'incertitude liés aux sources d'énergie renouvelables et ainsi satisfaire la demande de la charge.

La conception optimale des SHERs les rend rentables, fiables et respectueux de l'environnement.

Dans ce contexte, l'apport envisagé avec cette thèse est de contribuer à trouver la conception optimale des SHERs, permettant de produire le maximum d'énergie avec un coût bas, tout en respectant les exigences environnementales. La technique d'optimisation linéaire est utilisée, en tenant compte de critères économiques, techniques et environnementaux.

L'approche proposée est appliquée au pompage de l'eau pour l'irrigation des cultures, et démontre pour la première fois (à la connaissance de l'auteur), l'efficacité économique de l'utilisation des unités distribuées par rapport à un système central 100% renouvelable. L'approche est également utilisée pour présenter l'utilisation optimale d'un SER de taille fixe pour l'irrigation des cultures.

***Mots clés : Dimensionnement optimal, programmation linéaire, HRES, pompage d'eau, irrigation***

## Table des matières

REMERCIEMENTS.....	ii
ملخص .....	iv
ABSTRACT.....	v
RÉSUMÉ.....	vi
Table des matières.....	vii
Liste des figures.....	xi
Liste des tableaux .....	xiii
INTRODUCTION GENERALE.....	14
Contexte et motivation de recherche .....	15
Problématique.....	15
Objectifs de recherche .....	15
Contributions.....	15
Structure de la thèse.....	16
Liste des abréviations, des sigles et des acronymes .....	18
CHAPITRE I. GENERALITES SUR LES SYSTEMES HYBRIDES A ENERGIES RENOUVELABLES ET LEUR OPTIMISATION.....	20
I.1. Introduction.....	21
I.2. Définition des systèmes hybrides d'énergie.....	23
I.3. Classification.....	24
I.3.1. Régimes de fonctionnement.....	24
I.3.2. Structure des systèmes Hybrides.....	24
I.4. État de l'art.....	25
I.5. Méthodes d'optimisation.....	28
I.5.1. Techniques traditionnelles d'optimisation.....	28
I.5.2. Les méthodes d'optimisation modernes.....	30
I.5.3. Logiciels Utilisés pour les Systèmes à énergie renouvelable .....	32
I.6. Conclusion .....	35
CHAPITRE II. MODELISATION DES SYSTEMES HYBRIDES A ENERGIES RENOUVELABLES.....	36
II.1. Introduction.....	37
II.2. Systèmes solaire photovoltaïques .....	37
II.2.1. Physique des cellules solaires .....	37
II.2.2. Électroniques des cellules solaires .....	38
II.2.3. Technologies des cellules solaires.....	38

II.2.4.	Les panneaux solaires.....	39
II.2.5.	Composants d'un système d'énergie solaire .....	39
II.2.6.	Modélisation des systèmes solaires photovoltaïques .....	40
II.2.7.	Facteurs influant sur la performance des systèmes solaires.....	41
II.2.8.	Avantages et inconvénients de l'énergie PV .....	41
	Avantages .....	41
	Inconvénients.....	41
II.3.	Éoliennes .....	42
II.3.1.	Classification et Composants d'une éolienne.....	42
II.3.2.	Systèmes d'énergie éolienne .....	43
II.3.3.	Modèle mathématique de l'éolienne .....	44
II.4.	Générateur diesel.....	47
II.4.1.	Modèle du générateur diesel.....	49
II.5.	Batteries de stockage.....	49
II.5.1.	Fonctionnement des batterie Plomb – Acide.....	50
II.5.2.	Modélisation du banc de batterie .....	50
II.6.	Évaluation des sources et de la consommation .....	52
II.6.1.	Collecte des données météorologiques .....	53
II.6.2.	Estimation de la consommation .....	59
II.7.	ETUDE expérimentale de l'effet de l'ombrage partiel sur la caractéristique I-V d'un panneau PV .....	60
II.7.1.	Introduction sur les performances des panneaux photovoltaïques.....	60
II.7.2.	Principe de fonctionnement physique et modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque .....	62
II.7.3.	Ombrage partiel et diode de dérivation .....	63
II.7.4.	Simulation d'un panneau solaire photovoltaïque sous ombrage partiel .....	64
II.7.5.	Configuration expérimentale et procédure de l'expérience .....	66
II.7.6.	Résultats and discussions .....	67
II.7.7.	Conclusion.....	71
II.8.	Conclusion du chapitre.....	72
<b>CHAPITRE III. OPTIMISATION LINEAIRE POUR LE DIMENSIONNEMENT D'UN SHER .....</b>		<b>73</b>
III.1.	Introduction .....	74
III.2.	Notions d'optimisation.....	74
III.3.	Généralités sur l'optimisation linéaire .....	75
III.4.	Techniques de résolution des problèmes d'optimisation linéaire .....	76
III.4.1.	L'algorithme de Simplex.....	76
III.5.	État de l'art sur l'utilisation de l'optimisation linéaire dans les SHERs.....	77

III.6. Formulation d'un problème d'optimisation linéaire pour le dimensionnement d'un système hybride PV/éolien.....	80
III.7. Conclusion .....	81
CHAPITRE IV. INVESTIGATION SUR L'UTILISATION D'UN SER CENTRAL PAR RAPPORT AUX SYSTEMES DISTRIBUEES POUR L'IRRIGATION DES CULTURES.....	82
IV.1. Introduction .....	83
IV.2. Etat de l'art.....	83
IV.3. Méthodologie .....	86
IV.3.1. Système PV .....	87
IV.3.2. Turbine éolienne.....	87
IV.3.3. Besoin journalier en eau pour les cultures .....	89
IV.3.4. Énergie requise .....	90
IV.3.5. Formulation du problème .....	91
IV.4. Résultats and discussion.....	94
IV.5. Conclusion .....	101
CHAPITRE V. OPTIMISATION DE L'UTILISATION DES ENERGIES VERTES, UNE APPLICATION A L'IRRIGATION .....	102
V.1. Introduction .....	103
V.2. Etat de l'art.....	103
V.3. Méthodologie .....	104
V.3.1. Profil de charge .....	105
V.3.2. Modélisation du système .....	105
V.4. Etude de cas.....	106
V.5. Résultats et discussions .....	109
V.5.1. Scenario 1 .....	109
V.5.2. Scenario 2.....	111
V.6. Conclusion .....	112
CHAPITRE VI. Dimensionnement optimal d'un SHER pour alimenter un centre de santé dans la région de Tamanrasset.....	113
VI.1. Introduction .....	114
VI.2. Localisation et ressources .....	114
VI.3. Profil de charge .....	116
VI.4. Composants du système .....	116
VI.5. Modélisation des composants du système.....	117
VI.5.1. Système PV .....	117
VI.5.2. Turbine éolienne.....	118
VI.5.3. Générateur GPL.....	118

---

VI.5.4. Caractéristiques technico-économiques .....	119
VI.6. Résultats et discussion .....	119
VI.7. CONCLUSION.....	121
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....	122
PRODUCTION SCIENTIFIQUE DANS LE CADRE DE CETTE THESE .....	125
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	126

## Liste des figures

<b>Figure I-1: Puissance installée en Algérie .....</b>	<b>22</b>
<b>Figure I-2: L'énergie produite par les différentes filiales .....</b>	<b>22</b>
<b>Figure I-3: Schéma général de système énergétique hybride multi-sources, charges et stockage [4]. .....</b>	<b>24</b>
<b>Figure I-4: classification des systèmes hybrides d'énergie .....</b>	<b>25</b>
<b>Figure I-5: Processus de dimensionnement optimal des systèmes hybrides.....</b>	<b>29</b>
<b>Figure I-6: Représentation schématique de HOMER.....</b>	<b>32</b>
<b>Figure I-7: Représentation schématique de HYBRID2 .....</b>	<b>33</b>
<b>Figure I-I-8: Représentation schématique de RETScreen.....</b>	<b>34</b>
<b>Figure I-9: Représentation schématique de iHOGA.....</b>	<b>34</b>
<b>Figure II-1: De la cellule au système solaire.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure II-2: Composants d'une éolienne .....</b>	<b>43</b>
<b>Figure II-3: Schéma d'un générateur diesel.....</b>	<b>48</b>
<b>Figure II-4: La consommation relative de carburant par rapport à la puissance de sortie d'un groupe électrogène à vitesse constante.....</b>	<b>49</b>
<b>Figure II-5: composition d'une batterie Plomb – Acide.....</b>	<b>50</b>
<b>Figure II-6: Modèle électrique simplifié d'une batterie.....</b>	<b>52</b>
<b>Figure II-7: Outils de mesure des différentes composantes de l'irradiation solaire .....</b>	<b>55</b>
<b>Figure II-8: Héliographe .....</b>	<b>55</b>
<b>Figure II-9: Mât de mesure des ressources éoliennes .....</b>	<b>57</b>
<b>Figure II-10: data logger .....</b>	<b>57</b>
<b>Figure II-11: Les valeurs moyennes mensuelles de la vitesse du vent, de l'irradiation et de la température .....</b>	<b>58</b>
<b>Figure II-12: modèles équivalents d'une cellule PV.....</b>	<b>61</b>
<b>Figure II-13: modèles équivalents d'une cellule PV.....</b>	<b>62</b>
<b>Figure II-14: Importance de la diode de Bypass pendant l'ombre .....</b>	<b>63</b>
<b>Figure II-15: Modèle Simulink du panneau étudié .....</b>	<b>65</b>
<b>Figure II-16: Caractéristiques I-V d'un panneau photovoltaïque simulé après avoir ombré 50% d'une cellule.....</b>	<b>66</b>
<b>Figure II-17: Caractéristiques P-V d'un panneau PV simulé après ombrage de 50% d'une cellule.....</b>	<b>66</b>
<b>Figure II-18: Équipement utilisé dans l'expérience .....</b>	<b>67</b>
<b>Figure II-19: Caractéristique I-V du panneau photovoltaïque sans ombrage .....</b>	<b>68</b>
<b>Figure II-20: Caractéristique I-V du panneau solaire après l'ombrage une seule cellule .....</b>	<b>69</b>
<b>Figure II-21: Caractéristique I-V du panneau après ombrage d'une branche.....</b>	<b>69</b>
<b>Figure II-22: Caractéristique I-V du panneau après ombrage d'une ligne horizontale ..</b>	<b>70</b>
<b>Figure III-1 : Organigramme de l'algorithme de Simplex .....</b>	<b>77</b>
<b>Figure IV-1: Schéma global du système proposé .....</b>	<b>86</b>
<b>Figure IV-2: Schéma de l'algorithme d'optimisation .....</b>	<b>93</b>
<b>Figure IV-3: Schéma d'optimisation du système distribué et de la centrale.....</b>	<b>93</b>
<b>Figure IV-4: Données météorologiques.....</b>	<b>95</b>
<b>Figure IV-5 : Les énergies hydraulique et électrique requise .....</b>	<b>96</b>
<b>Figure IV-6: les coûts de cycle de vie des 4 configurations distribuées .....</b>	<b>99</b>
<b>Figure IV-7: Comparaison du coût total de la vie optimale basée sur un système distribué et une unité centrale.....</b>	<b>100</b>
<b>Figure V-1: Volumes d'eau nécessaires pour les deux plantes pendant leurs cycles de vie .....</b>	<b>108</b>
<b>Figure V-2: Les surfaces optimale irrigué par le système implémenté .....</b>	<b>110</b>

---

<b>Figure V-3: Répartition des surfaces optimales irrigués dans les deux parcelles .....</b>	<b>110</b>
<b>Figure V-4: Les surfaces optimale irrigué par le système PV pour le 2ième scénario...</b>	<b>111</b>
<b>Figure V-5: Répartition des surfaces optimales irrigués dans les deux parcelles pour le 2ième scénario .....</b>	<b>112</b>
<b>Figure VI-1 : Variation mensuelle of de la Vitesse moyenne du vent à Tamanrasset.....</b>	<b>115</b>
<b>Figure VI-2: Irradiation Solaire moyenne à Tamanrasset.....</b>	<b>115</b>
<b>Figure VI-3: Architecture du système proposé.....</b>	<b>117</b>

---

## Liste des tableaux

<b>Tableau I-1: Techniques modernes d'optimisation.....</b>	<b>30</b>
<b>Tableau I-2: vue générale de quelques logiciels de simulation des énergies renouvelables .....</b>	<b>35</b>
<b>Tableau II-1: Avantages et inconvénients de l'utilisation de l'énergie PV.....</b>	<b>41</b>
<b>Tableau II-2: Caractéristiques du panneau photovoltaïque utilisé.....</b>	<b>68</b>
<b>Tableau II-3: Pertes en puissance pour différents niveaux d'ombrage.....</b>	<b>71</b>
<b>Tableau IV-1. Moyennes mensuelles des précipitations durant la période d'irrigation .</b>	<b>94</b>
<b>Tableau IV-2. La hauteur manométrique totale et l'IWR des plantes pour les 4 parcelle pendant la période d'irrigation (Mai à Octobre). .....</b>	<b>96</b>
<b>Tableau IV-3. Coûts détaillés du système hybride .....</b>	<b>97</b>
<b>Tableau IV-4: Les tailles optimales pour les différents systèmes .....</b>	<b>98</b>
<b>Tableau V-1: Propriétés Météorologique du site choisi .....</b>	<b>107</b>
<b>Tableau V-2: caractéristiques Techniques des panneaux PV. ....</b>	<b>109</b>
<b>Tableau VI-1 : Illustration du profil de charge de la clinique .....</b>	<b>116</b>
<b>Tableau VI-2 : Détails des composants du SHER .....</b>	<b>119</b>
<b>Tableau VI-3. Évaluation de la performance de la solution optimale.....</b>	<b>120</b>

---

## INTRODUCTION GENERALE

---

La croissance rapide de la population humaine au cours des dernières décennies, et la constante hausse des besoins énergétiques ainsi que les défis du réchauffement de la planète et les préoccupations environnementales qui y sont associées, ont motivé l'exploration de sources alternatives d'énergie renouvelable dans le monde. Au niveau national et en prévision de l'épuisement des énergies fossiles (pétrole et gaz). Afin d'assurer la sécurité énergétique du pays, une stratégie nationale de développement des énergies renouvelables horizon 2030 a été adoptée pour donner un caractère prioritaire et stratégique à l'exploitation de l'immense potentialité dont dispose l'Algérie notamment en matière d'énergie solaire.

Toutefois, l'approche traditionnelle consistant à développer une source d'énergie renouvelable pour une utilisation dans une situation donnée (telle que l'énergie éolienne ou photovoltaïque) se traduit à la fois par une faible disponibilité et une qualité d'énergie médiocre, en raison de la nature stochastique inhérente à la disponibilité des sources d'énergie renouvelables. Cette situation a été contre-productive pour l'adoption à grande échelle de systèmes d'énergie renouvelable, où les utilisateurs potentiels perçoivent ces sources d'énergie comme peu fiables.

Les réflexions actuelles montrent qu'il existe une force en nombre, par exemple en nombre de systèmes d'énergie renouvelable pouvant être exploités simultanément ou en complémentarité, à un endroit donné. C'est la stratégie des Systèmes Hybrides d'énergie Renouvelable (SHER). Le concept SHER explore à la fois la coexistence dans le temps et les complémentarités de la disponibilité des sources d'énergie renouvelables sur un site donné pour résoudre les problèmes de flexibilité, de fiabilité et d'économie de la production d'énergie renouvelable ; et ainsi offrir une solution puissante à la disponibilité intermittente des sources renouvelables. Les systèmes SHER sont également promoteurs pour les régions éloignées et isolées.

Les réflexions actuelles montrent qu'il existe une force en nombre, par exemple en nombre de systèmes d'énergie renouvelable pouvant être exploités simultanément ou en

complémentation, à un endroit donné. C'est la stratégie des systèmes hybrides d'énergie renouvelable (SHER).

### **Contexte et motivation de recherche**

Le concept SHER explore à la fois la coexistence dans le temps et les complémentarités de la disponibilité des sources d'énergie renouvelables sur un site donné pour résoudre les problèmes de flexibilité, de fiabilité et d'économie de la production d'énergie renouvelable ; et ainsi offrir une solution puissante à la disponibilité intermittente des sources renouvelables. Alors que le concept SHER lui-même a été proposé ailleurs, la maturation des technologies SHER nécessite encore des activités de recherche et développement dans plusieurs domaines.

Dans ce contexte, ce travail met en évidence la nécessité d'utiliser des méthodes d'optimisation pour mieux dimensionner ces systèmes.

### **Problématique**

De part leur nature fluctuante par rapport au temps, dépendante de son emplacement géographique, des conditions atmosphériques et de la demande des consommateurs ; l'exploitation d'une seule ressource d'énergie renouvelable ne peut satisfaire économiquement une demande énergétique donnée. Il est dès lors souhaitable de combiner simultanément plusieurs énergies renouvelables afin de permettre un certain niveau de compensation (solaire photovoltaïque, éolien, biomasse, etc.). De plus, pour la sécurité de l'approvisionnement énergétique, il est utile de prévoir une ou plusieurs sources d'appoints (réseau électrique, batteries électrochimiques, groupe électrogène, super-capacités, stockage d'hydrogène, etc.).

La combinaison optimale de quelques énergies renouvelables et de systèmes d'appoints est un problème d'une importance capitale pour l'économie d'énergie.

### **Objectifs de recherche**

Cette thèse vise à développer un modèle général qui permet de dimensionner un système HER, qui combine de la façon optimale quelques énergies renouvelables disponibles pour une région donnée, ainsi que quelques sources d'appoints nécessaires pour compenser le manque ou l'insuffisance des sources d'ER.

### **Contributions**

- 1) Elaboration d'un état de l'art qui met en évidence, les différentes applications des SHERs ainsi que les différentes approches et logiciels utilisés dans l'optimisation de ces systèmes.

- 2) Simulation sous Matlab/Simulink de l'effet de l'ombrage partiel sur les performances d'un panneau solaire.
- 3) Validation expérimentale de l'effet de l'ombrage partiel sur la caractéristique I-V d'un panneau solaire.
- 4) Présentation d'un modèle pour le dimensionnement optimal des systèmes multi sources à énergie renouvelable appliqué à l'irrigation des plantes, exploitant les caractéristiques techniques et économiques des composants ainsi que les caractéristiques environnementales de la zone. Ce système a permis de démontrer, pour la première fois, l'efficacité économique des systèmes distribués par rapport aux systèmes centraux utilisés.
- 5) Présentation d'une solution méthodique pour optimiser l'utilisation d'un système PV de taille fixe et prédéterminée dans l'irrigation des cultures. La méthodologie proposée peut être généralisée sur les systèmes hybrides et appliquées à différents endroits et à plusieurs cultures.
- 6) Proposition d'un système de conversion d'énergie, qui remplace les générateurs diesel afin de minimiser leurs effets indésirables sur l'environnement en réduisant les émissions à effet de serre.

### **Structure de la thèse**

Afin d'accomplir et de présenter au mieux cette étude, cette thèse contient outre une introduction générale, une conclusion générale six chapitres structurés comme suit :

Dans le premier chapitre, intitulé « état de l'art des systèmes hybrides à énergies renouvelables (généralités et optimisation) », nous présentons, quelques notions sur les SHERs, les techniques et les logiciels utilisés pour optimiser leurs tailles, ainsi qu'une revue de littératures.

Le deuxième chapitre est consacré aux composants du SHER. Dans ce chapitre, nous avons donné des notions sur chaque composant ainsi que son modèle mathématique. Nous avons ensuite, entamé l'évaluation des sources d'énergies renouvelables (solaire, éolienne) et l'évaluation de la consommation dans deux cas (pompage d'eau et habitation). Nous illustrons, à la fin, une étude expérimentale montrant l'effet de l'ombrage partiel sur la caractéristique I(V) d'un panneau solaire.

Dans le troisième chapitre, nous donnons des notions sur l'optimisation linéaire, les techniques utilisées pour la résolution de tels problèmes. Nous présentons une revue de

littérature sur l'utilisation de cette technique d'optimisation, pour le dimensionnement des SHERs. Enfin, nous montrons la formulation d'un problème d'optimisation linéaire pour le dimensionnement d'un système hybride PV/éolien.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons une étude comparative entre l'alimentation d'un système d'irrigation par un système distribué et un système central. Cette étude montre l'efficacité économique des systèmes distribués par rapport à un système central.

Le cinquième chapitre présente une solution technique, pour l'optimisation de l'utilisation d'un SER dont la taille est fixée et est connue auparavant. Nous présentons une étude de cas sur le pompage d'eau pour l'irrigation des cultures. Dans cette application, deux scénarios sont illustrés.

Le dernier chapitre est consacré à l'optimisation de la taille d'un système hybride, pour l'alimentation d'un centre de santé dans la région de Tamanrasset. Dans cette étude, nous proposons de remplacer le générateur diesel par un générateur GPL dans un système PV/éolien/batterie/générateur GPL.

## Liste des abréviations, des sigles et des acronymes

W : Watt	<i>NOCT</i> : Température de fonctionnement normale de la cellule (normal operating cell temperature)
MW : Mégawatts	HAWT: Horizontal Axis Wind Turbine
MWc : Mégawatts crêtes re	$P_w$ : Puissance absorbée par la turbine éolienne qui représente l'énergie cinétique du vent
GWh : Gigawatts heures	$\rho$ : Masse volumique de l'aire
kWh :kilowattheures	$S$ : Surface balayée par les pâles de l'éolienne
m : mètre	$V_w$ : vitesse du vent
km : Kilomètre	$C_p$ : coefficient de puissance
l : litre	$P_t$ : puissance de la turbine éolienne
V : Volt	$\beta$ : L'angle d'inclinaison des pâles (pitch angle)
SKTM : Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida	$\lambda$ : Rapport de vitesse (tip speed ratio)
SHER: systèmes hybrides à énergie renouvelable	$\alpha$ : Rugosité du sol
PV : Photovoltaïque	$f_{cons}$ : Consommation du générateur en fuel,
PAC : Pile à combustible	$P_{N\_G}$ : Puissance nominale
GD : Générateur Diesel	$P_G$ : Puissance délivrée par le générateur diesel.
COE : Coût d'énergie (Cost of Energy)	$A_G$ et $B_G$ : Coefficients de la courbe de consommation
LPSP : loss of power supply probability	SOC : état de charge instantané (state of charge)
LCE : Levelized cost of energy	SOC <sub>max</sub> : Capacité de stockage maximale permise
PSO : Particle swarm optimization	$C_n$ : capacité nominale de l'ensemble des accumulateurs
HOMER : Hybrid Optimization Model for Electric Renewables	$N_b$ : nombre total des batteries
NREL : National Renewable Energy Laboratory	$N_{bs}$ : nombre de batteries montés en série
NPC : Net Present Cost	$C_b$ : capacité de chaque batterie
RELR : Renewable Energy Laboratory Research	SOC <sub>min</sub> : Capacité de stockage minimale permise
CEDRL: Clean Energy Decision Support Center	DOD : Profondeur de décharge de la batterie
CPV : concentrateur Photovoltaïque	SODAR: Sonic Detection and Ranging
CdTe : tellurure de cadmium	$B_j$ : besoin énergétique journalier
DC : Direct current (Courant continu)	$V_0$ : la vitesse du vent (m/s) à la hauteur de référence $h_0$ ;
$G_T$ : La radiation solaire totale dans une surface inclinée	$\alpha$ : l'exposant de la loi de puissance
$I_D$ : les rayonnements solaires directs normales,	$E_h$ : l'énergie hydraulique requise quotidiennement (Wh/jour);
$I_d$ : les rayonnements solaires directs diffus	$g$ : l'accélération de la pesanteur ;
$R_d$ : facteurs d'inclinaison de la partie diffuse des rayonnements solaires	

<p><math>R_r</math> : facteurs d'inclinaison de la partie réfléchie des rayonnements solaires</p> <p><math>A_{PV}</math> : Surface des panneaux PV</p> <p><math>\eta</math> : rendement du système PV</p> <p><math>P_f</math> : Facteur d'assemblage (packing factor)</p> <p><math>\eta_{pc}</math> : Rendement du convertisseur de puissance (power conditioning efficiency)</p> <p><math>\eta_m</math> : Rendement du module</p> <p><math>\eta_r</math> : Rendement de référence du module</p> <p><math>\gamma</math> : Coefficient de température des cellules</p> <p><math>T_r</math> : Température de référence</p> <p><math>T_c</math> : Température moyenne mensuelle de la cellule</p> <p><math>T_a</math> : Température ambiante instantanée</p> <p><math>P_i</math> : puissance nominale de chaque appareil</p> <p><math>E_i</math> : énergie journalière consommée</p> <p><math>ET_0</math> : l'évapotranspiration de référence</p> <p><math>ET_C</math> : évapotranspiration dans des conditions standard</p> <p><math>E_h</math> :</p> <p><math>P_r</math> : le rapport de performance (valeur moyenne 0,72 ou 0,75, avec 0,75 pour une orientation optimale du panneau);</p> <p><math>F_0</math> : un facteur qui prend en compte les pertes;</p> <p><math>G_{eff}</math> : l'éclairement énergétique annuel effectif de l'incident (<math>W/m^2</math>);</p> <p><math>G_0</math> : l'éclairement énergétique dans des conditions standard (<math>1000 W/m^2</math>);</p>	<p><math>\rho</math> : la densité de l'eau (<math>1000 kg/m^3</math>);</p> <p><math>V</math> : le volume d'eau requis par jour (<math>m^3</math>);</p> <p><math>h</math> : la hauteur manométrique totale (m).</p> <p><math>h_s</math> : le niveau statique ;</p> <p><math>h_{ad}</math> : le niveau dynamique (m) ;</p> <p><math>\delta</math> : un coefficient lié au frottement du pipeline et dépendant du nombre de Reynolds ;</p> <p><math>\beta</math> : un coefficient lié au type de composant</p> <p><math>L</math> : la longueur du pipeline (m);</p> <p><math>d</math> : le diamètre intérieur du pipe (m);</p> <p><math>g</math> : l'accélération de pesanteur (<math>m/s^2</math>);</p> <p><math>v</math> : la vitesse linéaire moyenne (m/s),</p> <p><math>\rho</math> : la masse volumique de l'air (<math>kg/m^3</math>) ;</p> <p><math>A</math> : la surface balayée par les pâles de la turbine (<math>m^2</math>);</p> <p><math>V_w</math> : la vitesse du vent (m/s);</p> <p><math>C_p</math> : le coefficient de puissance du rotor,</p> <p><math>h</math> : la hauteur du mât (m);</p> <p><math>h_0</math> : la hauteur de référence (10 m);</p> <p><math>V</math> : la vitesse du vent (m/s) à la hauteur <math>h</math> du mât,</p> <p><math>P_C</math> : la puissance nominale dans les conditions standard fournies par le fabricant (W).</p>
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

---

# GENERALITES SUR LES SYSTEMES HYBRIDES A ENERGIES RENOUVELABLES ET LEUR OPTIMISATION

CHAPITRE

I

---

## Sommaire

CHAPITRE I. GENERALITES SUR LES SYSTEMES HYBRIDES A ENERGIES RENOUVELABLES ET LEUR OPTIMISATION .....	20
I.1. Introduction .....	21
I.2. Définition des systèmes hybrides d'énergie .....	23
I.3. Classification .....	24
I.3.1. Régimes de fonctionnement.....	24
I.3.2. Structure des systèmes Hybrides.....	24
I.4. État de l'art .....	25
I.5. Méthodes d'optimisation.....	28
I.5.1. Techniques traditionnelles d'optimisation.....	28
I.5.2. Les méthodes d'optimisation modernes.....	30
I.5.3. Logiciels Utilisés pour les Systèmes à énergie renouvelable .....	32
I.6. Conclusion.....	35

## **I.1. Introduction**

La demande énergétique mondiale augmente considérablement, répondant à une demande croissante due à l'augmentation de la population et la hausse de son niveau de confort. En Algérie cette augmentation est estimée à 6% annuellement.

Les besoins énergétiques de l'Algérie sont satisfaits dans sa globalité par des hydrocarbures. Cette source fossile est épuisable et présente d'autres impacts négatifs sur l'environnement, d'où la nécessité de chercher d'autres sources alternatives permettant de satisfaire la demande et de minimiser ces impacts. A cet effet, l'utilisation des énergies renouvelables est devenue une alternative incontournable.

A ce fait, l'Algérie a lancé son programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, adopté en février 2011 [1] et actualisé en janvier 2016 [2].

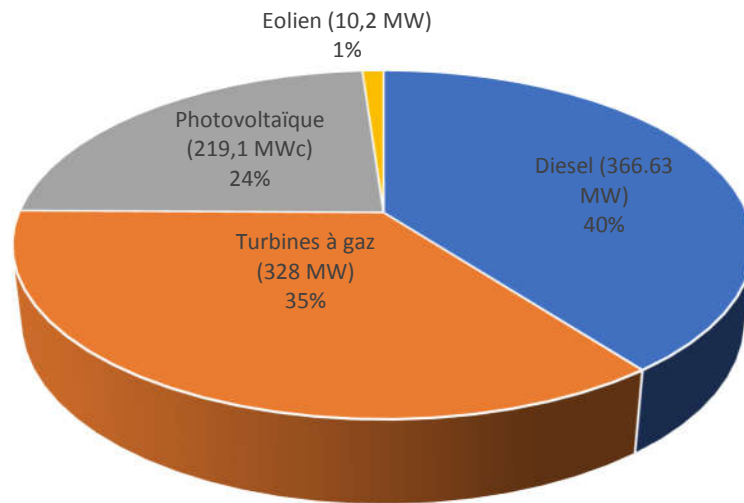
Ainsi, le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030.

D'après ce programme, les projets à énergies renouvelables de production de l'électricité dédiés au marché national seront menés en deux étapes :

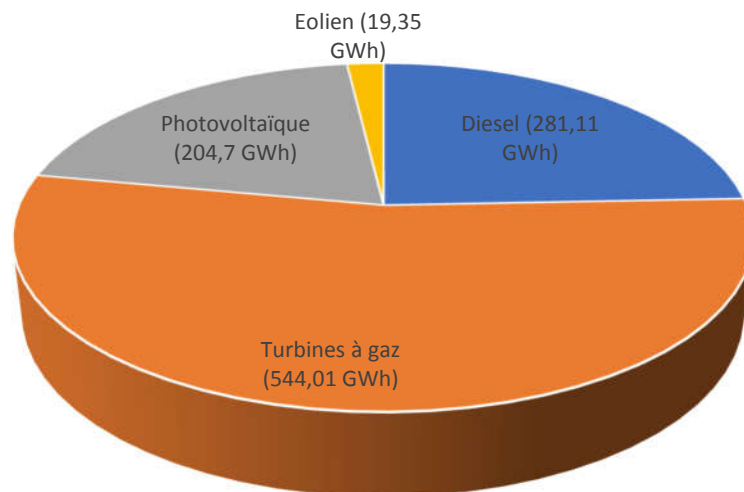
**Première phase 2015 - 2020 :** Cette phase verra la réalisation d'une puissance de 4000 MW, entre photovoltaïque et éolien, ainsi que 500 MW, entre biomasse, cogénération et géothermie.

**Deuxième phase 2021 - 2030 :** Le développement de l'interconnexion électrique entre le Nord et le Sahara (Adrar), permettra l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Béchar et leur intégration dans le système énergétique national. A cette échéance, le solaire thermique pourrait être économiquement viable.

Des chiffres clés annoncés par SKTM [3], concernant la capacité installée et l'énergie produite par les différentes centrales électriques à la fin de l'année 2016 montre que parmi 45 centrales, 18 sont des centrales photovoltaïques avec une capacité installée de 219.1 MWc (23.71% de la puissance totale installée) et une centrale éolienne. Les puissances installées réparties par filiales ainsi que l'énergie produite par chaque filiale sont présentées dans la Figure I-1 et la Figure I-2 respectivement



**Figure I-1: Puissance installée en Algérie [3]**



**Figure I-2: L'énergie produite par les différentes filiales [3]**

En raison du caractère intermittent des sources d'énergie renouvelables, une seule source peut être mal dimensionnée pour un système donné. Pour résoudre ce problème, et augmenter la disponibilité des systèmes à énergie renouvelable, il est utile d'installer des systèmes hybrides à énergie renouvelable (SHER).

Le potentiel d'introduction de sources d'énergies renouvelables non connectés au réseau via des systèmes hybrides autonomes à énergie renouvelable est impressionnant. A nos jours, avec les variations de prix des combustibles fossiles, la nécessité croissante de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et l'amélioration des performances et de l'abordabilité des technologies renouvelables,

toutes les communautés ou installations qui étaient auparavant isolées du réseau pourraient être alimentées à un niveau de coût raisonnable avec ces systèmes.

Ce chapitre est consacré à l'étude des systèmes hybrides à énergie renouvelable, ainsi que les différentes techniques utilisées pour le dimensionnement optimal de tels systèmes.

## **I.2. Définition des systèmes hybrides d'énergie**

Un système hybride d'énergie est une technique de production d'énergie émergente associant plusieurs sources d'énergie, principalement des énergies renouvelables pour une configuration à production optimale. Ce système peut contenir une (des) source(s) renouvelable (s) combinée (s) à une (des) source (s) conventionnelle (s), différents éléments de stockage et des charges.

L'intérêt essentiel des SHERs est qu'ils permettent la possibilité d'autonomie énergétique vu qu'ils ne dépendent pas d'une seule source [4]. Ils peuvent résoudre en très grande partie le problème de la disponibilité de l'énergie [4]. En outre, les SHERs sont plus fiables et moins coûteux que les autres systèmes qui reposent sur une seule source d'énergie [5, 6]

La figure I-3 présente un schéma général d'un système hybride combinant des sources renouvelable (PV, éolienne, Pile à combustible « PAC » et hydraulique), des systèmes d'appoint (générateur diesel, réseau et stockage) ainsi que des charges à satisfaire.

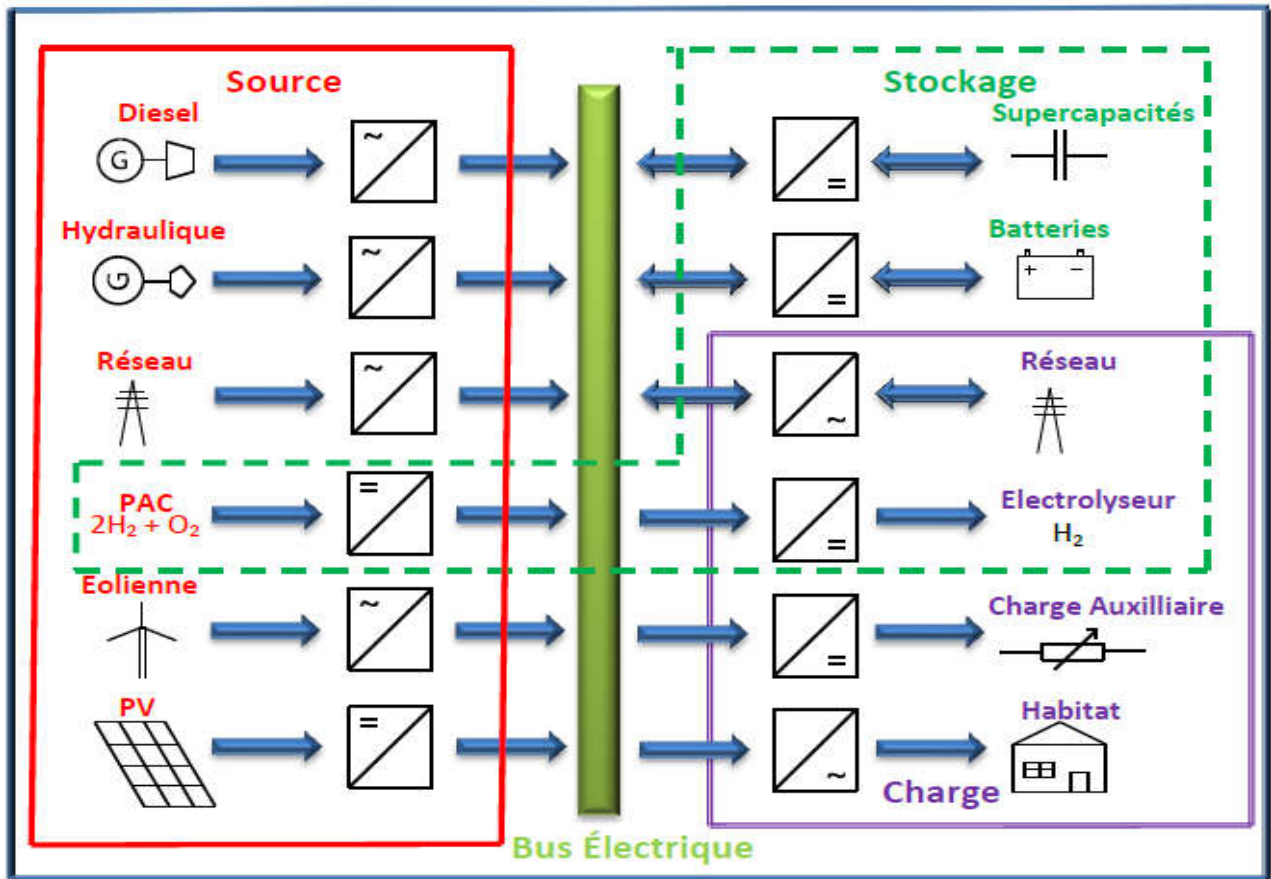


Figure I-3: Schéma général de système énergétique hybride multi-sources, charges et stockage [4].

### I.3. Classification

Plusieurs classifications des SHERs sont réalisées, les plus répondues sont basées sur :

#### I.3.1. Régimes de fonctionnement

On distingue deux groupes :

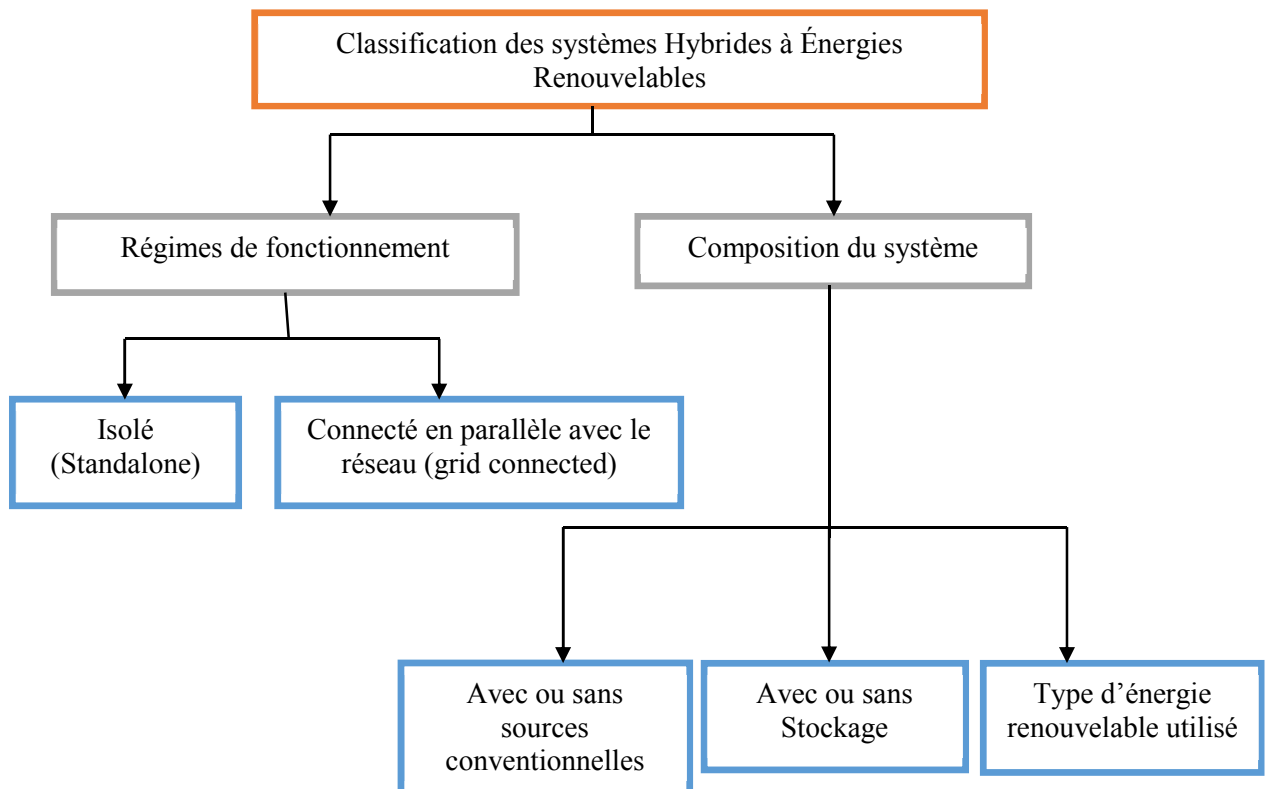
- 1<sup>er</sup> groupe : les systèmes sont connectés au réseau et contribuent à satisfaire la charge alimentée par ce réseau.
- 2<sup>ème</sup> groupe : les systèmes travaillent en mode autonome et ont pour mission l'alimentation des consommateurs dans des localisations éloignées du réseau.

#### I.3.2. Structure des systèmes Hybrides

En fonction de leurs structures, les systèmes hybrides peuvent être décomposés en trois groupes :

- 1<sup>er</sup> groupe : est caractérisé par la présence des sources conventionnelles comme les générateurs diesel et les micro-turbines à gaz,
- 2<sup>ème</sup> groupe : se distingue par la présence des dispositifs de stockage (batteries, volants d'inertie, etc.) qui permettent de satisfaire la charge en cas d'absence des sources primaire à convertir.
- 3<sup>ème</sup> groupe : classe les SHERs suivant le type des sources d'énergie renouvelables utilisé (solaire, éolienne, biomasse, etc.).

Le schéma de la Figure I-4 représente les différentes classifications discutées ci-dessus.



**Figure I-4: classification des systèmes hybrides d'énergie**

#### I.4. État de l'art

L'hybridation des sources d'énergie accroît la fiabilité du système, car les lacunes de tout composant sont compensées par un choix correct, mais leur dimensionnement est essentiel pour la conception de tels systèmes [7, 8]. De nombreuses recherches ont été menées sur les systèmes d'énergie hybrides. Certaines d'entre elles sont liées à l'utilisation hybride autonome de sources d'énergie renouvelables [9], au dimensionnement optimal [10, 11], à l'économie des systèmes

hybrides [12], au dessalement de l'eau de mer [13], optimisation de la taille [14, 15], utilisation résidentielle / villageoise / industrielle [16] . Plusieurs configurations des SHERs telles que PV-éolien, PV-GD, éolien-GD, mini hydro-GD sont largement rapportées dans les littératures. Ces recherches présentent des explications détaillées sur les performances, la faisabilité et les aspects économiques des systèmes à énergies hybrides utilisés dans l'électrification rurale hors réseau.

Rahman et al. [17] ont réalisé une étude sur un système hybride comprenant du biogaz et des ressources solaires pour répondre aux besoins énergétiques des foyers dans des zones rurales. Ils ont constaté que les habitants qui possèdent de 3 à 6 bovins (ou bétail) peuvent alimenter leurs charges de cuisson et d'électricité grâce à un système hybride photovoltaïque - biogaz. En remplaçant les combustibles classiques par des systèmes hybrides, les habitants peuvent économiser beaucoup plus que le coût total annualisé de l'installation des systèmes hybrides. Il a été établi que le coût de l'électricité (COE) s'élevait de 0.263 \$ / kWh avec un prix de la bouse de vache de 0.10 \$ / m<sup>3</sup>, à 0.36 \$ / kWh si le prix de la bouse de vache augmentait à 0.3 \$ / m<sup>3</sup>. Les systèmes d'énergie PV-biogaz s'avèrent supérieurs au réseau et au système diesel pour une large gamme de prix du diesel allant de 0.5 à 0.9 \$ / l Yang et al. [18] ont essayé d'optimiser les capacités des différents composants de systèmes hybrides PV-éolienne de production d'énergie, et un groupe de batteries. Un travail similaire a été réalisé par Xing et al. [19], qui ont calculé les combinaisons optimales du système en prenant en compte certaines variables de décision incluses dans le processus d'optimisation. Daud et Ismail [20] ont proposé un système hybride à énergie renouvelable pour résoudre le problème d'alimentation électrique dans les zones éloignées et non connectées aux réseaux. Ce système comprend un système éolien-PV et un moteur diesel comme un système d'appoint pour répondre aux besoins de la charge pendant les périodes de pointe. Une recherche similaire est proposée par Ismail et al. [21], où une analyse de sensibilité a été entreprise pour évaluer l'effet du changement de certains paramètres sur le coût de l'énergie. Les résultats ont montré que le scénario optimal est celui qui consiste à combiner des panneaux photovoltaïques, un groupe de batteries et un générateur diesel et à alimenter une maison rurale à l'aide de ce système hybride. Pour ce scénario, le COE est de 0.239 \$ / kWh, ce qui correspond à une contribution des PV de 90% et à un groupe de batteries de 0.4 jour d'autonomie. L'énergie éolienne était principalement utilisée au moment de la demande maximale. Wang et al. [22] ont présenté une méthodologie pour formuler systématiquement un SHER, composé de générateurs solaires, éoliens et diesel, en tant que ressource de secours, ainsi qu'un stockage sur batterie, de la phase de conception à l'exploitation optimale. Une modélisation détaillée de chaque composant du système est introduite comme

base de l'étude de simulation. Le dimensionnement du système est effectué en tenant compte des flux d'énergie, pour obtenir la combinaison optimale de panneaux PV et d'éoliennes. Des stratégies de gestion de l'énergie, tant du côté de la demande que du côté de la production, sont élaborées pour atteindre les objectifs de répondre à la demande en électricité tout en minimisant les coûts généraux d'exploitation et d'environnement. La prévision météorologique journalière en temps réel, la réponse à la demande et la mise à jour du modèle sont également intégrées à la méthodologie proposée à l'aide d'une stratégie d'optimisation de l'horizon fuyant (Receding horizon optimization). La méthode est démontrée par une application à une maison unifamiliale.

La viabilité des systèmes hybrides pour le pompage d'eau et l'irrigation des plantes a été étudiée par plusieurs chercheurs sur la base de considérations économiques, de simplicité, etc. Carroquino et al. [23] ont recherché des systèmes d'énergie renouvelables économiquement optimaux. Ils sont concentrés sur six études de cas d'installations agricoles pour trouver la solution de production d'énergie optimale à l'aide d'un outil de simulation et d'optimisation basé sur des algorithmes génétiques. Les systèmes hybrides photovoltaïque-diesel et diesel se sont révélés être optimaux, les coûts énergétiques étant de 0.13 à 1.08 € / kWh et de 0.32 à 0.52 € / kWh, respectivement. Le fort effet de la gestion de la demande était un résultat intéressant, car il pourrait indiquer une taille de système importante et des réductions de coûts. De plus, les angles d'inclinaison photovoltaïques optimaux fixes dépendaient non seulement du profil saisonnier de la demande, mais également du calendrier de pompage. Bien que la différence entre les taux d'intérêt du marché et la hausse des prix des carburants ait une influence déterminante sur l'intégration ou non de la production renouvelable, cette étude montre que les systèmes hybrides photovoltaïque-diesel peuvent rentabiliser l'utilisation des énergies renouvelables dans l'irrigation goutte à goutte. Vick et Neal [24] ont analysé les performances d'un système de pompage d'eau alimenté par l'hybridation d'une éolienne (900 W) et des générateurs photovoltaïques solaires (320 W, 480 W et 640 W). Ils ont comparé les performances du système hybride par rapport au système individuel (éolienne et solaire photovoltaïque). Les résultats de l'analyse ont indiqué un rendement de pompage maximal de 47%, 51% et 55% avec un système hybride avec des panneaux solaires photovoltaïques de 320 W, 480 W et 640 W, respectivement. Ils ont également signalé une augmentation de 28% du pompage de l'eau pour le système hybride par rapport aux systèmes individuels à une hauteur de pompe de 75 m. Ramos et al. [25] ont proposé un système hybride de pompage d'eau alimenté par un système hybride éolien/PV. Les auteurs ont comparé le coût d'un système de pompage d'eau hybride autonome avec le système de pompage d'eau raccordé au réseau, avec ou sans turbine à eau. Les résultats de l'analyse ont indiqué qu'un système de pompage hybride

solaire et éolien sans turbine à eau connecté au réseau est le choix le plus économique. Ils ont également indiqué qu'un système autonome sur le plan économique était préférable par rapport à un système connecté au réseau seul si la pompe à eau était à plus de 31.6 km du raccordement au réseau électrique.

## **I.5. Méthodes d'optimisation**

L'optimisation est une phase vitale pour déterminer la taille exacte des systèmes hybrides. La méthodologie générale pour l'optimisation des tailles de ces systèmes consiste à :

- Fournir les données météorologiques, la charge à satisfaire, et les caractéristiques du système,
- Construire le modèle mathématique avec les contraintes économiques et de fiabilité,
- Utilisation des techniques d'optimisation répondant aux critères de configuration du système.

La Figure I-5 résume les différentes étapes de résolution d'un problème d'optimisation des SHERs.

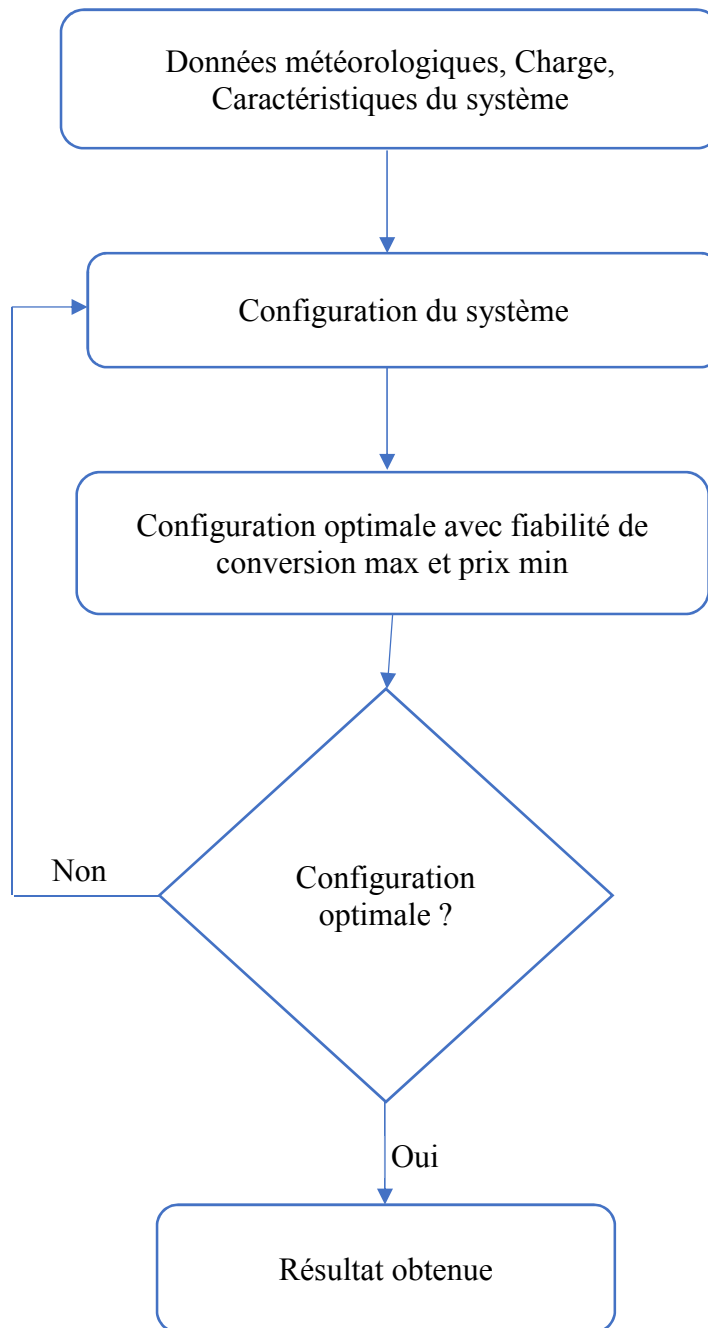
On peut regrouper les différentes méthodes d'optimisation, utilisées dans la littérature pour la détermination de la taille optimale des systèmes hybrides, notamment les systèmes à base de PV/éolien en trois grandes catégories :

### **I.5.1. Techniques traditionnelles d'optimisation**

#### ***a) Les méthodes graphiques***

Dans cette méthode, un problème de deux variables de décision peut être résolu en traçant graphiquement toutes les contraintes. La solution optimale peut être identifiée, après dessin des contours de la fonction objectif, par inspection visuelle de la région réalisable. Cette méthode est utilisée par Borowy et Salameh [26] pour déterminer la combinaison optimale d'un système autonome PV-éolien, en se basant sur des données météorologiques enregistrées durant 30 ans. Pour une charge typique d'une maison et un LPSP désiré, la configuration optimale des batteries et de modules PV est calculée sur la base du coût minimal du système. Les auteurs de [27] ont aussi utilisé cette technique pour le dimensionnement optimal d'un système PV-éolien en utilisant des valeurs moyennes mensuelles des données solaire et éolienne.

La méthode graphique, est une méthode de base facile à comprendre, mais elle n'est pas flexible et devient complexe pour un nombre de variables de décision supérieur à deux.



**Figure I-5: Processus de dimensionnement optimal des systèmes hybrides**

***b) Les méthodes itératives***

L'optimisation des systèmes hybrides par cette technique se fait par un processus récursif qui s'arrête lorsque la meilleure configuration est atteinte conformément aux spécifications.

Yong et al. [19] ont utilisé cette méthode pour optimiser un système PV-éolien. Des configurations optimales du système hybride sont obtenues en termes de différentes exigences de fiabilité souhaitées du système et de la LCE (coût à minimiser). Diaf et al. [28] ont présenté une méthodologie permettant de dimensionner de manière optimale un système hybride PV / éolien autonome. La méthodologie vise à trouver la meilleure combinaison, qui répond aux

exigences de fiabilité souhaitées du système, tout en assurant la valeur la plus faible du coût énergétique nivelé (LCE).

**c) Les méthodes probabilistes**

Un modèle probabiliste est celui où il y a plusieurs résultats possibles, avec des degrés de certitude ou d'incertitude variables. L'approche probabiliste considère l'effet de la variabilité aléatoire des paramètres. Les approches probabilistes permettent de quantifier la variation et l'incertitude, principalement en utilisant des distributions au lieu de valeurs fixes. Cette technique est également utilisée par certains chercheurs pour résoudre le problème de dimensionnement des systèmes hybrides [29-31]. Cependant, l'approche probabiliste ne peut pas représenter l'évolution dynamique des performances du système hybride, principal inconvénient de cette méthode.

**d) Programmation linéaire**

La méthode de programmation linéaire a été développée par Leonid Kantorovich en 1939. Elle est largement utilisée pour le dimensionnement et l'optimisation de systèmes renouvelables, on peut citer à titre d'exemple, Chedid et Rahman [32], Huneke et al. [33] et [34]. Cette méthode sera détaillée dans le chapitre 3.

**I.5.2. Les méthodes d'optimisation modernes**

Ce sont des méthodes qui se basent sur l'intelligence artificielle. Ces méthodes sont largement utilisées dans l'optimisation des systèmes hybrides. Le tableau suivant résume quelques-unes de ces méthodes :

**Tableau I-1: Techniques modernes d'optimisation**

Technique	Caractéristiques	Exemples de références où figure l'utilisation des techniques pour l'optimisation des SHER
Algorithmes génétiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Imiter le processus génétique des organismes biologiques [35]</li> <li>- Peut résoudre des problèmes avec plusieurs solutions ;</li> </ul>	[37-40]

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Facilement transférable aux simulations et modèles existants ;</li> <li>- La vitesse de convergence est plus lente que les autres algorithmes stochastiques ;</li> <li>- Ne peut pas assurer des temps de réponse d'optimisation constants [36].</li> <li>- etc.</li> </ul>	
Essaim de particules	<p>Le comportement des mouvements des poissons et des oiseaux est la fondamentale inspiration derrière l'optimisation de l'essaim de particules (PSO) développée par Kennedy et Eberhart en 1995 [41].</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le calcul en PSO est simple avec une vitesse très rapide et peut être complété simplement.</li> <li>- Les problèmes de système non coordonnés ne peuvent pas être exécutés par PSO.</li> </ul>	[42-44]
Le recuit simulé	<p>Recuit simulé développé par Kirkpatrick, Gelatt et Vecchiin en 1983. Il copie le processus de recuit du matériau. Cela fonctionne sur l'optimisation globale basée sur une technique appelée investigation aléatoire de trajectoire. Sa capacité à rester à l'écart des minima locaux est l'avantage de base. Il est capable de gérer des données bruyantes et un système extrêmement non linéaire,</p>	[45, 46]
Méthodes hybrides d'optimisation	<p>Développé en utilisant deux algorithmes ou plus</p>	[47, 48]

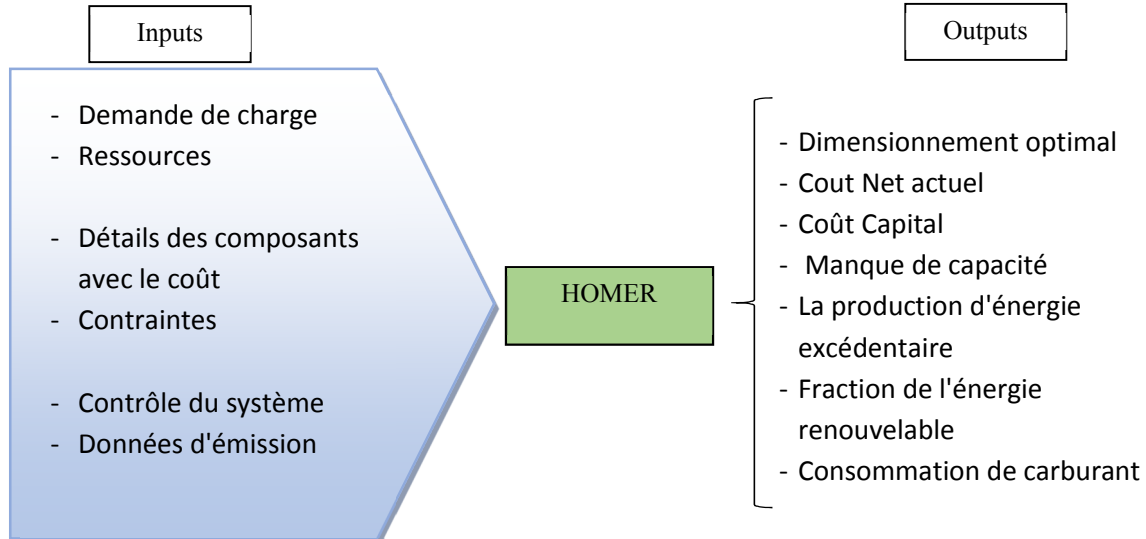
### I.5.3. Logiciels Utilisés pour les Systèmes à énergie renouvelable

#### a) HOMER

Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER), développé en 1993 par NREL (National Renewable Energy Laboratory), USA, est adapté pour l'étude de la préfaisabilité, l'optimisation et l'analyse de sensibilité dans plusieurs configurations possibles.

HOMER utilise des données comme les options des différentes technologies, le prix des composants, la disponibilité des ressources ainsi que les données des constructeurs etc. pour la simulation des différentes configurations faisables classées selon le prix net actuel (Net Present Cost « NPC »).

Cependant HOMER utilise pour la minimisation de le NPC la fonction mono-objective, alors que les problèmes multi-objectifs ne peuvent pas être formulés, ainsi le processus d'optimisation des configurations optimales des systèmes est basé sur le coût net actuel et pas sur les coûts actualisés de l'énergie (levelized cost of energy). Ce logiciel ne prend pas en considération, la profondeur de décharge, les variations de tension dans les jeux de barre et la variabilité intra-horaire (Intra-hour variability) [49].



**Figure I-6: Représentation schématique de HOMER**

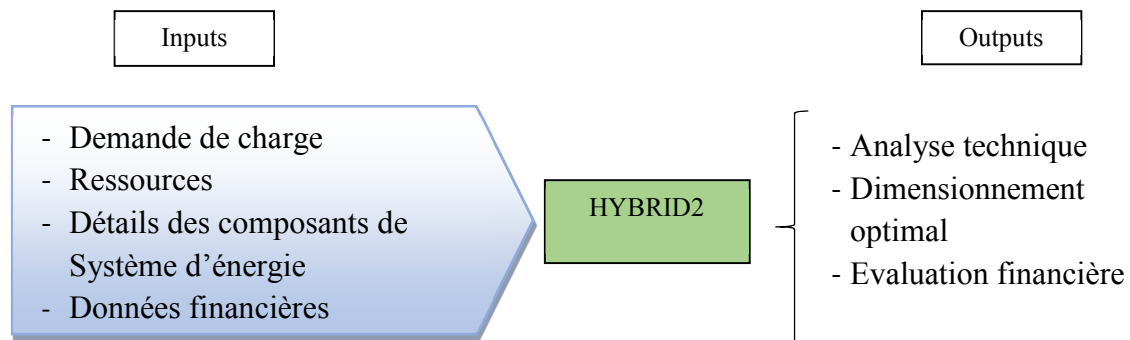
#### b) HYBRID 2

Développé en 1996 par Renewable Energy Laboratory Research (RELRL) [50], université de Massachusetts, USA avec le support de NREL.

HYBRID2 est un modèle probabiliste qui utilise des méthodes statistiques pour tenir compte des variations de pas intra temps (intra time step variation) et peut exécuter des performances

détaillées à long terme avec une analyse économique et prédire la performance de différents systèmes hybrides. Ce logiciel a été conçu pour étudier une grande variété de systèmes hybrides d'énergie qui peuvent contenir trois types de charges électriques, plusieurs éoliennes de différents types, des panneaux PV, des générateurs diesel, des batteries de stockage, des convertisseurs et des charges.

HYBRID2 dispose d'une bibliothèque de divers fichiers de données de ressources, cependant, il a un accès limité aux paramètres et manque de souplesse.



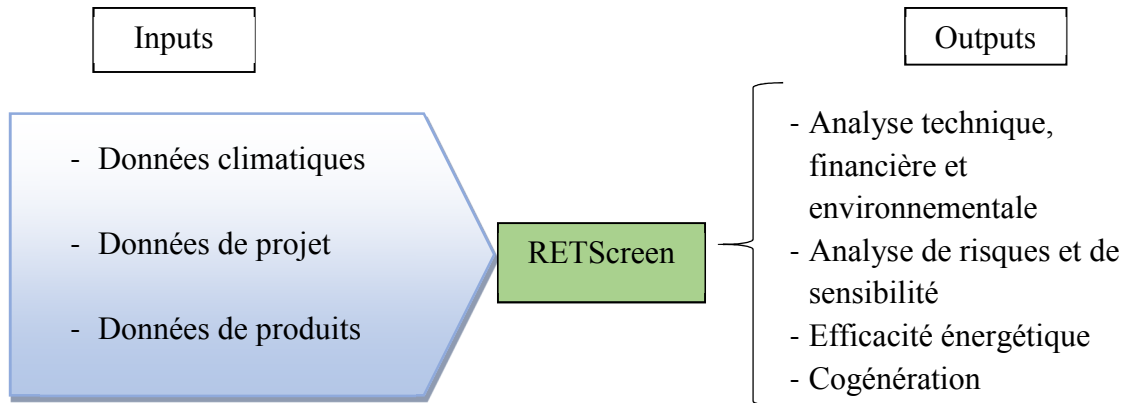
**Figure I-7: Représentation schématique de HYBRID2**

### c) RETScreen

Développé par le ministère des ressources naturelles Canada, et Libéré en 1998, RETScreen [51] est un système logiciel d'étude de faisabilité, pour l'évaluation des coûts et des bénéfices financières et environnementales des différentes technologies des énergies renouvelables pour tout endroit dans le monde.

Les principales limitations de RETScreen sont :

- Ne rend pas compte de l'effet de la température pour l'analyse de performance des PV.
- Pas d'options pour l'importation de fichier des séries temporelle (time series data file).
- Options limitées pour les fonctionnalités de recherche, d'extraction de récupération et de visualisation
- Problème de partage de données
- Ne supporte pas les calculs plus avancés



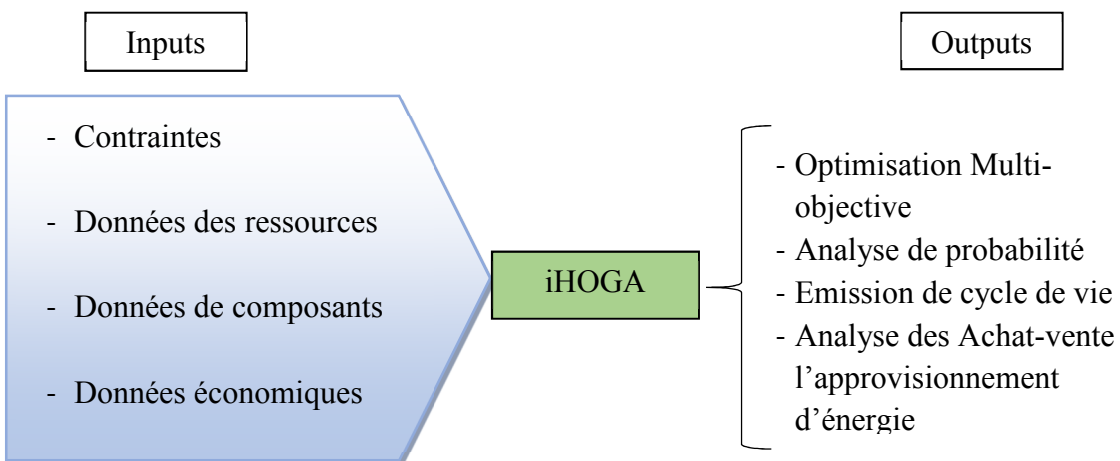
**Figure I-I-8: Représentation schématique de RETScreen**

**d) iHoga**

Improved Hybrid Optimization by Genetic Algorithm (iHOGA) développé par l'université de Zaragoza, Espagne, est utilisé pour le dimensionnement optimal des systèmes Hybrides d'énergie avec l'optimisation mono ou multi-objective à l'aide des algorithmes génétiques et l'analyse rapide de sensibilité.

Les limitations de la version EDU sont :

- La simulation avec des charges moyennes de 10 kWh/Jour.
- L'analyse de la sensibilité n'est pas incluse
- L'analyse de probabilité n'est pas incluse



**Figure I-9: Représentation schématique de iHOGA**

Le tableau suivant donne une comparaison entre les différents logiciels cité ci-dessus.

**Tableau I-2: vue générale de quelques logiciels de simulation des énergies renouvelables**

Logiciel	Développé par	Méthode utilisée	Intervalle de temps	Type d'analyse	Disponibilité
HOMER	NREL	Modèle entrée/sortie	Minutes	Outil de simulation /optimisation	Période d'essai de 21 jours
HYBRID 2	RELRL	Probabiliste entrée / sortie	Minutes	Outil de simulation /optimisation	Gratuit
RETScreen	CEDRL	Modèle entrée/sortie	Mois	Outil d'optimisation	Gratuit
iHOGA	Université de Zaragoza	Algorithme génétique	Minutes	Outil de simulation /optimisation	Une version EDU est disponible

## I.6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a mis le point sur les systèmes hybrides à énergie renouvelable, leurs définitions, leurs classifications ainsi qu'un état de l'art montrant les différentes applications, et finalement, les différentes techniques d'optimisation et les logiciels commercialisés utilisés pour le dimensionnement optimal de ces systèmes, sont présentées.

Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation des différents constituants d'un SHER.

# MODELISATION DES SYSTEMES HYBRIDES A ENERGIES RENOUVELABLES

## CHAPITRE

# II

### Sommaire

CHAPITRE II. MODELISATION DES SYSTEMES HYBRIDES A ENERGIES RENOUVELABLES .....	36
II.1. Introduction .....	37
II.2. Systèmes solaire photovoltaïques .....	37
II.2.1. Physique des cellules solaires .....	37
II.2.2. Électroniques des cellules solaires .....	38
II.2.3. Technologies des cellules solaires .....	38
II.2.4. Les panneaux solaires .....	39
II.2.5. Composants d'un système d'énergie solaire .....	39
II.2.6. Modélisation des systèmes solaires photovoltaïques .....	40
II.2.7. Facteurs influant sur la performance des systèmes solaires .....	41
II.2.8. Avantages et inconvénients de l'énergie PV .....	41
Avantages .....	41
Inconvénients .....	41
II.3. Éoliennes .....	42
II.3.1. Classification et Composants d'une éolienne .....	42
II.3.2. Systèmes d'énergie éolienne .....	43
II.3.3. Modèle mathématique de l'éolienne .....	44
II.4. Générateur diesel .....	47
II.4.1. Modèle du générateur diesel .....	49
II.5. Batteries de stockage .....	49
II.5.1. Fonctionnement des batterie Plomb – Acide .....	50
II.5.2. Modélisation du banc de batterie .....	50
II.6. Évaluation des sources et de la consommation .....	52
II.6.1. Collecte des données météorologiques .....	53
II.6.2. Estimation de la consommation .....	59
II.7. ETUDE expérimentale de l'effet de l'ombrage partiel sur la caractéristique I-V d'un panneau PV .....	60
II.7.1. Introduction sur les performances des panneaux photovoltaïques .....	60
II.7.2. Principe de fonctionnement physique et modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque .....	62
II.7.3. Ombrage partiel et diode de dérivation .....	63
II.7.4. Simulation d'un panneau solaire photovoltaïque sous ombrage partiel .....	64
II.7.5. Configuration expérimentale et procédure de l'expérience .....	66
II.7.6. Résultats and discussions .....	67
II.7.7. Conclusion .....	71
II.8. Conclusion du chapitre .....	72

## II.1. Introduction

Dans ce chapitre, on présente les différents sous-systèmes constituant le système hybride, à savoir les solaires PV, les éoliennes, le moteur diesel et les batteries de stockage. Pour chaque sous système, on donne des définitions, des explications de principe de fonctionnement ainsi que la modélisation mathématique associée.

## II.2. Systèmes solaire photovoltaïques

### II.2.1. Physique des cellules solaires

La cellule solaire est l'élément de base des systèmes solaires photovoltaïques (Figure II-1), elles sont disponibles, en générale, en format carré de 12.5 et 15 cm<sup>2</sup> [52]. La plupart des cellules solaires sont construites à base des matériaux semi-conducteurs, comme le Silicium (Si), qui ont les propriétés combinées d'un conducteur et un isolateur.

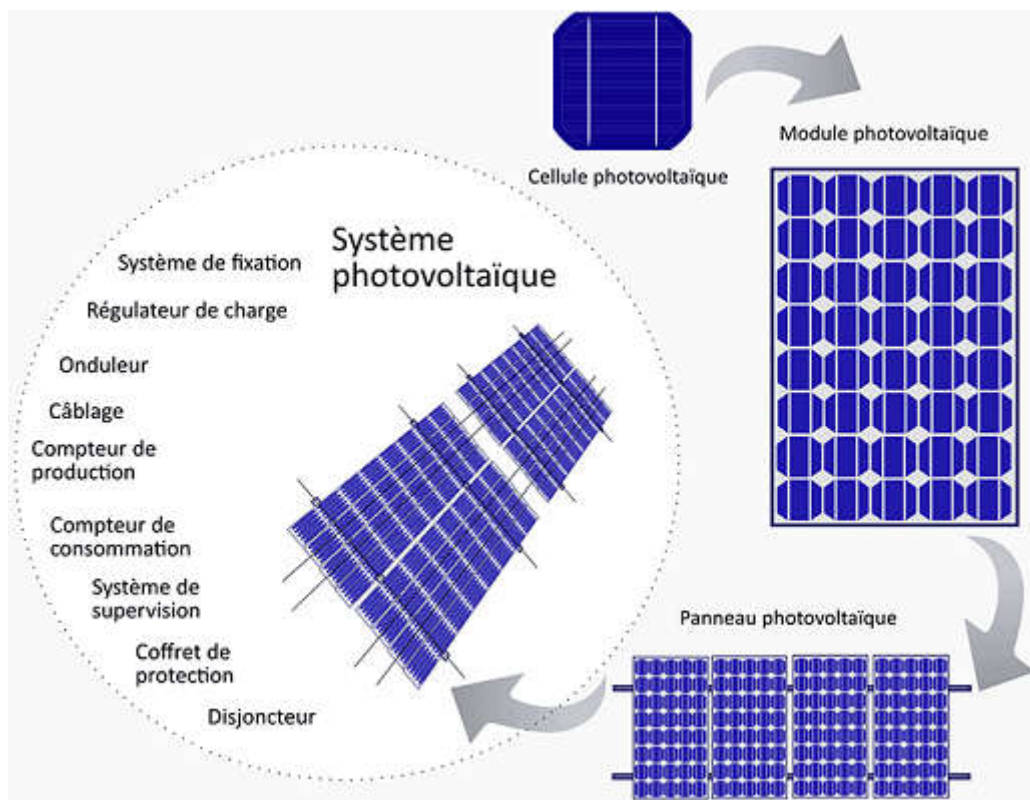


Figure II-1: De la cellule au système solaire

En électronique, les semi-conducteurs sont construits en fusionnant deux wafer en silicium, dopés de manière adjacente. Ce dopage a pour but l'impregnation du silicium par des

agents positifs et négatifs. Les agents positifs créent des électrons libres et produisent un matériau de type « N », alors que les agents négatifs créent des trous et produisent un matériau de type « P ».

Lorsque les wafers de silicium dopées N et P sont fusionnées, elles forment la jonction PN qui construit le bloc de base des cellules solaires. Si cette jonction est exposée au soleil, le dispositif convertit les photons en électrons. Cela fait que la cellule se comporte comme une batterie-minute avec une caractéristique courant-tension unique [53].

### **II.2.2. Électroniques des cellules solaires**

Un champ électrostatique est produit dans la jonction PN de la cellule solaire en affectant des photons qui créent une différence de potentiel de 0,5 V, qui caractérise la plupart des jonction PN et toutes les cellules solaires. Les cellules sont ensuite connectées en série pour avoir des valeurs supérieures de tension.

### **II.2.3. Technologies des cellules solaires**

Le marché actuel des modules PV est assez homogène. 90% des modules sont des modules à base de silicium cristallin [54]. On distingue :

- Les cellules à base de silicium monocristallin sont formées par les wafers fabriqués en utilisant un procédé de croissance monocristallin. Ces cellules ont des rendements commerciaux entre 16% et 25% [52].
- Les cellules à silicium polycristallin sont formées avec des wafers polycristallins fabriquées à partir d'un procédé de solidification. Ces cellules sont moins chères à produire mais aussi moins efficaces avec un rendement entre 14% et 18% [52].
- Les cellules à base des semiconducteurs composés III-V sont formées à l'aide de matériaux tels que le GaAs sur les substrats de Ge et présentent des rendements de conversion élevés de 40% et plus. En raison de leur coût élevé, ils sont généralement utilisés dans les concentrateurs PV (CPV) avec des systèmes de suivi ou pour les applications spatiales.
- Les cellules à couches minces formées en déposant des couches extrêmement minces de matériaux semi-conducteurs photovoltaïques sur un matériau de support tel que le verre, l'acier inoxydable ou le plastique. Les modules à couches minces avaient auparavant des rendements de conversion inférieurs à ceux des technologies de base du silicium cristallin, mais cela a changé ces dernières années. Ils sont potentiellement moins coûteux à fabriquer que les cellules cristallines. Les matériaux en couche mince

utilisés commercialement sont le tellurure de cadmium (CdTe) et le diséléniure de cuivre-indium (gallium) (CIGS et CIS).

- Le silicium amorphe et micromorphe représentait autrefois une part de marché importante, mais il ne suivait pas à la fois le prix des cellules en silicium cristallin et l'augmentation de l'efficacité d'autres technologies à couche mince. En termes d'efficacité, les cellules CdTe ont atteint 21% en laboratoire en 2017 [52]
- Les cellules photovoltaïques organiques à couche mince, utilisant des colorants ou des semi-conducteurs organiques, ont suscité l'intérêt et des activités de recherche, de développement et de démonstration sont en cours. En juin 2018, les cellules solaires pérovskites ont atteint un rendement de 27,3% dans les laboratoires, mais elles n'ont pas encore permis d'obtenir des produits stables sur le marché. Des cellules tandem à base de pérovskites font actuellement l'objet de recherches, avec une base de silicium cristallin ou à base de films minces, et pourraient arriver sur le marché plus tôt que les produits à base de pérovskites purs.

#### **II.2.4. Les panneaux solaires**

Un panneau solaire photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules [55] ces cellules peuvent être connectées en série, en parallèle ou en configuration mixte pour répondre aux besoins de puissance tout en ajustant les valeurs de courant et de tension fournies par ces cellules. Les interconnexions séries et/ou parallèles des panneaux solaires constituent un champ photovoltaïque.

#### **II.2.5. Composants d'un système d'énergie solaire**

Les modules PV constituent l'élément de base du système solaire d'énergie. Ils fonctionnent avec d'autres composants complémentaires, comme les systèmes de stockages et de conditionnement, les appareils de mesure. La Figure II-1 schématise l'évolution du dispositif solaire de la cellule au système solaire.

Ces systèmes peuvent être :

- Connectés directement à une charge DC (fil de soleil),
- Isolés avec batteries d'appoint,
- Hybrides isolés avec générateurs diesel et batteries comme appoint,
- Connectés au réseau.

## II.2.6. Modélisation des systèmes solaires photovoltaïques

L'énergie absorbée par le système PV sont les radiations solaires. La radiation solaire totale dans une surface inclinée est estimée par [6, 56]:

$$G_T = I_D R_D + I_d R_d + (I_D + I_d) R_r \quad (\text{II-1})$$

Avec :

$I_D$  et  $I_d$  représentent respectivement les rayonnements solaires directs normales et diffus,  $R_d$  et  $R_r$  sont respectivement les facteurs d'inclinaison des parties diffuse et réfléchi des rayonnements solaires.

Le rayonnement solaire ainsi estimé dépend essentiellement de la position du soleil dans le ciel qui varie de mois en mois.

La puissance horaire fournie par un système PV de surface  $A_{PV}$  ( $\text{m}^2$ ) sur un jour moyen du  $i^{\text{ème}}$  mois, lorsque le rayonnement solaire total  $G_T$  ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ ) est incident sur la surface du système PV, peut être calculer par la formule suivante [57] :

$$P_{PV,i} = G_{T,i} \eta A_{PV} \quad (\text{II-2})$$

Avec :

$G_{T,i}$  : rayonnement solaire pour le mois  $i$  ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ )

$A_{PV}$  : surface du système PV ( $\text{m}^2$ )

$\eta$  : Rendement du système PV, il est estimé suivant [58] par la formule :

$$\eta = \eta_m \eta_{pc} P_f \quad (\text{II-3})$$

$P_f$  : Facteur d'assemblage (packing factor)

$\eta_{pc}$  : Rendement du convertisseur de puissance (power conditioning efficiency)

$\eta_m$  : Rendement du module calculé par la formule suivante :

$$\eta_m = \eta_r \{1 - \gamma (T_c - T_r)\} \quad (\text{II-4})$$

$\eta_r$  : Rendement de référence du module

$\gamma$  : Coefficient de température des cellules. Il prend des valeurs entre 0.004 et 0.005  $^{\circ}\text{C}$  pour des modules au silicium mono et poly cristallin, et entre 0.001 et 0.002  $^{\circ}\text{C}$  pour des modules au silicium amorphe.

$T_r$  : Température de référence

$T_c$  : Température moyenne mensuelle de la cellule qui être calculer par :

$$T_c = T_a + G_T \left( \frac{NOCT-20}{800} \right) \quad (II-5)$$

$T_a$  : Température ambiante instantanée (°C)

$NOCT$  : Température de fonctionnement normale de la cellule (normal operating cell temperature)

### II.2.7. Facteurs influant sur la performance des systèmes solaires

Une analyse des facteurs influençant la production de l'énergie électrique par le biais d'un système PV doit être nécessairement effectué.

Différents facteurs ont une influence sur la performance des systèmes PV. On peut citer :

- L'irradiation globale disponible
- La température de fonctionnement et le coefficient de température
- L'angle d'incidence du rayonnement solaire
- La surface disponible, la technologie utilisée et le système de montage ou d'intégration
- L'ombrage partielle ou totale due aux différents obstacles.

L'analyse de l'influence de l'irradiation, de la température et de l'ombrage partiel est détaillée dans la section 2.7.

### II.2.8. Avantages et inconvénients de l'énergie PV

Les avantages et les inconvénients peuvent être résumés dans le Tableau II-1 ci-dessous :

**Tableau II-1: Avantages et inconvénients de l'utilisation de l'énergie PV**

<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ecologique et sans pollution</li> <li>• Sans utilisation de carburants et de l'eau,</li> <li>• Nécessite un minimum d'entretien et de faibles coûts d'exploitation,</li> <li>• Une durée de vie longue allant jusqu'à 30 ans,</li> <li>• Energie modulaire, peut être conçue pour toutes les</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coût initial élevé</li> <li>• Les systèmes PV ne peuvent pas fonctionner sans lumière,</li> <li>• Les systèmes PV génèrent du courant continu, d'où la nécessité des systèmes de stockages et des onduleurs,</li> </ul>

<p>applications, de quelques watts jusqu'à plusieurs mégawatts,</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sans restriction de conversion tant qu'il y a de la lumière.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nécessité de grandes surfaces pour les applications à grande échelle,</li> <li>• Ne peut pas générer une production stable en permanence, en raison des conditions météorologiques changeantes.</li> </ul>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### II.3. Éoliennes

Les turbines éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Une grande partie de cette énergie est transférée en énergie électrique.

L'histoire des moulins à vent remonte à plus de 2000 ans. Ils avaient été principalement utilisés pour moudre des céréales et pour pomper de l'eau. La construction moderne de convertisseurs d'énergie éolienne a été développée dans les années 1920, mais ce n'est pas avant les années 1980 qu'ils ont trouvé un intérêt professionnel en tant que principale application des énergies renouvelables.

De point de vue de l'ingénierie des fluides, nous devons distinguer les convertisseurs d'énergie éolienne à rotor à force de traînée et à rotor à force flottante. Tandis que les rotors à force de traînée utilisent directement la pression du vent et n'atteignent que des rendements faibles de l'ordre de 0.1 à 0.2. Les rotors à force de flottabilité développent des rendements de valeurs considérablement plus élevées, limitées de manière inhérente à environ 0.59. Une théorie appropriée a été publiée pas avant le début du 19<sup>ème</sup> siècle.

Les éoliennes modernes sont principalement conçues comme des machines à fonctionnement rapide avec un arbre horizontal, une disposition au vent et de préférence trois pales de rotor [59, 60]. Les puissances nominales des machines ont régulièrement augmenté, de sorte que la puissance moyenne installée par unité est actuellement supérieure à 1 700 kW [59].

#### II.3.1. Classification et Composants d'une éolienne

Suivant le principe de fonctionnement, on peut classer les turbines éoliennes sous deux grandes catégories à savoir, les éoliennes à axe horizontal et à axe vertical. Les plus connues sont les éoliennes à axe horizontal (HAWT, pour Horizontal Axis Wind Turbine).

Les composants de la turbine éolienne à axe horizontal comprennent (Figure II-2) :

- Les pales qui constituent le rotor, convertissent l'énergie du vent en énergie mécanique ;

- Une chaîne de transmission, comprenant dans le cas général un multiplicateur et un générateur ;
- Une tour qui supporte le rotor et le système d'entraînement ;
- D'autre équipement, y compris les commandes, les câbles électriques, les équipements de support au sol et les équipements d'interconnexion.

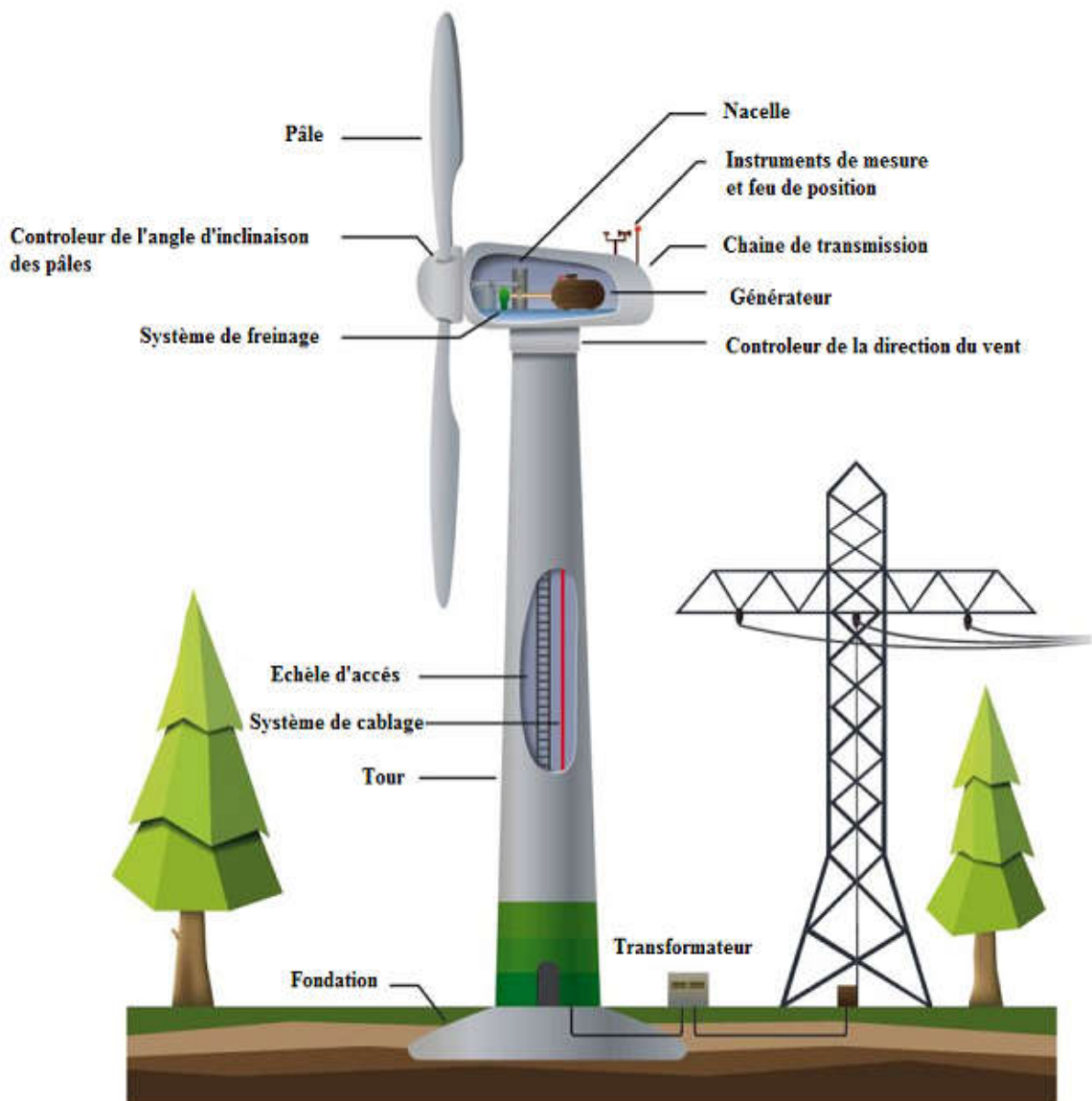


Figure II-2: Composants d'une éolienne [61]

### II.3.2. Systèmes d'énergie éolienne

Dans les systèmes de conversion destinés à fournir de l'énergie électrique, le rotor éolien est couplé, généralement via un réducteur (gear box), à un générateur électrique sous la forme d'une machine à induction ou d'une machine synchrone. Dans les systèmes à vitesse variable,

les équipements électroniques de puissance sont utilisés pour découpler les tensions et les fréquences de la génération et du réseau.

Les systèmes éoliens peuvent être exploités selon les concepts suivants :

- Vitesse constante (comme pour les machines synchrones alimentées par le secteur) ou presque constante (comme pour la caractéristique de dérivation des machines à induction alimentées par le secteur),
- Vitesse variable (comme pour les générateurs avec découplage de fréquence par inverseurs)

### II.3.3. Modèle mathématique de l'éolienne

Divers modèles de prévision de la performance des éoliennes ont été proposés. Ces modèles peuvent être classés en deux catégories :

- Modèles basés sur des équations fondamentales de la puissance disponible dans le vent [62].
- Modèles basés sur le concept de la courbe de puissance de l'éolienne.

#### *a) Modèles basés sur des équations fondamentales de la puissance disponible dans le vent*

La puissance absorbée par les pâles d'une turbine éolienne est l'énergie cinétique d'une masse d'air se déplaçant perpendiculairement à une vitesse  $V_w$ .

Cette puissance instantanée est donnée par la formule suivante :

$$P_w = \frac{1}{2} \rho S V_w^3 \quad (\text{II-6})$$

$P_w$  : Puissance absorbée par la turbine éolienne qui représente l'énergie cinétique du vent

$\rho$  : Masse volumique de l'air (=1,225 kg/m<sup>3</sup>)

$S$  : Surface balayée par les pâles de l'éolienne (m<sup>2</sup>)

$V_w$  : vitesse du vent (m/s)

Cette puissance ne peut être extraite dans sa totalité. Le physicien allemand Albert Betz a démontré dans un article de 1920 [63], l'existence d'une limite physique à l'extraction de l'énergie par une éolienne de forme quelconque, qu'on appelle aujourd'hui limite de Betz.

L'aptitude de conversion de l'énergie éolienne est fonction du coefficient de puissance  $C_p$ , donné par la formule suivante :

$$C_P = \frac{P_t}{P_w} \quad (\text{II-7})$$

$P_t$  : puissance de la turbine éolienne

Le  $C_P$  peut-être calculer en utilisant la fonction non linéaire suivante [64, 65]:

$$C_P = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (\text{II-8})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \quad (\text{II-9})$$

$\beta$  : L'angle d'inclinaison des pâles (pitch angle).

$\lambda$  : Rapport de vitesse (tip speed ratio) défini comme le rapport entre la vitesse linéaire de la turbine et la vitesse du vent par :

$$\lambda = \frac{R\omega_m}{V} \quad (\text{II-10})$$

$R = 1$

$$P_t = C_P P_w \quad (\text{II-11})$$

$$P_t = C_P \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{II-12})$$

Avec :

$$S = \pi R^2 \quad (\text{II-13})$$

$$P_t = \frac{1}{2} C_P \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{II-14})$$

La vitesse du vent varie en fonction de l'altitude. Cette variation peut être exprimée par la formule empirique suivante [66] :

$$V_1 = V_0 \left( \frac{H_1}{H_0} \right)^\alpha \quad (\text{II-15})$$

$V_1$  : Vitesse du vent à la hauteur  $H_1$ ,

$V_0$  : Vitesse du vent à la hauteur de référence  $H_0$

$\alpha$  : Rugosité du sol, sa valeur varie entre 0.1 et 0.4 (0.1 correspond à la mer, 0.16 à une plaine, 0.28 à une forêt et 0.4 à une zone urbaine).

**b) Modèles basés sur le concept de la courbe de puissance de l'éolienne**

Les modèles basés sur ce concept peuvent être classés en deux catégories :

**(1) Modèles basés sur une forme présumée de la courbe de puissance**

Dans lesquelles la courbe de puissance de l'éolienne est présumée suivre une forme typique. Un ensemble d'équations caractéristiques sont développés pour prédire la sortie de la turbine pour différentes vitesses de vent allant de zéro à la vitesse de coupure. Dans cette catégorie, plusieurs approches ont été proposées :

• **Modèle basé sur courbe de puissance linéaire**

Dans cette méthode, il est supposé que la puissance de sortie de l'éolienne augmente linéairement avec la vitesse du vent du démarrage à la vitesse nominale de la turbine, puis elle reste constante jusqu'à la vitesse maximale. Dans ce modèle l'éolienne est modélisée par les équations suivantes [19]:

$$\begin{cases} P_t = 0 & \text{pour } V_w < v_d \text{ ou } V_w > v_m \\ P_t = P_n \cdot \frac{V_w - v_d}{v_n - v_d} & \text{pour } v_d \leq V_w \leq v_n \\ P_t = P_n & \text{pour } v_n \leq V_w \leq v_m \end{cases} \quad (\text{II-16})$$

Avec :

$P_n$  : puissance nominale de la turbine (en W).

$v_d$  : Vitesse de démarrage de la turbine (m/s)

$v_n$  : Vitesse nominale de la turbine (m/s)

$v_m$  : Vitesse maximale de la turbine (m/s)

• **Modèle basé sur la loi cubique**

D'après ce modèle, la densité de puissance de sortie d'une éolienne (en W/m<sup>2</sup>) peut être calculée par [6]:

$$\begin{cases} P_t = 0 & \text{pour } V_w < v_d \text{ ou } V_w > v_m \\ P_t = aV_w^3 + bP_n & \text{pour } v_d \leq V_w \leq v_n \\ P_t = P_n & \text{pour } v_n \leq V_w \leq v_m \end{cases} \quad (\text{II-17})$$

Avec :

$$a = \frac{P_n}{(v_n^3 - v_d^3)} \quad (\text{II-18})$$

et

$$a = \frac{v_d^3}{(v_n^3 - v_d^3)} \quad (\text{II-19})$$

La puissance réelle disponible à la sortie de la turbine éolienne est donnée par :

$$P = P_t S \eta_t \quad (\text{II-20})$$

$\eta_t$  : Rendement de la turbine éolienne et les convertisseurs correspondants.

- **Modèle basé sur les paramètres de Weibull**

Selon ce modèle, la puissance à la sortie de la turbine éolienne est donnée par [26]:

$$\begin{cases} P_t = 0 & \text{pour } V_w < v_d \text{ ou } V_w > v_m \\ P_t = P_n \cdot \frac{V_w^k - v_d^k}{v_n^k - v_d^k} & \text{pour } v_d \leq V_w \leq v_n \\ P_t = P_n & \text{pour } v_n \leq V_w \leq v_m \end{cases} \quad (\text{II-21})$$

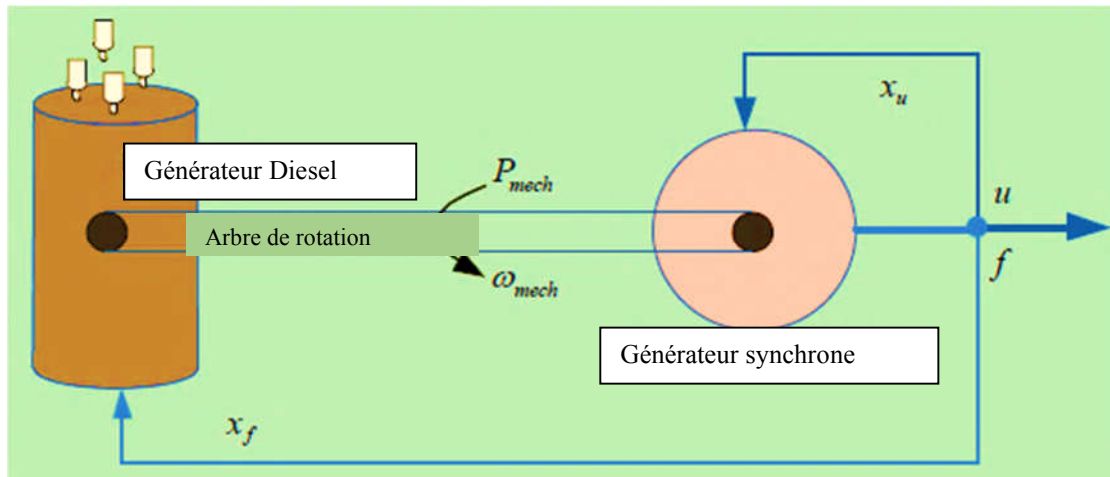
**(2) Modèles basés sur la courbe de puissance réelle fournie par le fabricant**

Plusieurs modèles ont été proposés, en utilisant la courbe de puissance individuelle réelle de l'éolienne pour développer des équations caractéristiques, l'aide de différentes techniques d'ajustement de la courbe, afin de prédire avec précision la puissance de l'éolienne. Parmi ces méthodes, on trouve la méthode des moindres carrés [67], et l'interpolation des valeurs des données fournies par le constructeur [28, 68]

## II.4. Générateur diesel

La production de l'énergie électrique à l'aide d'un système d'énergie renouvelable dépend entièrement des ressources. Dans le cas des systèmes autonomes, il est nécessaire d'utiliser des systèmes de stockage ou d'ajouter des systèmes d'appoint.

Le générateur diesel est l'élément de le plus utilisé comme appoint pour les systèmes à énergie renouvelable. Il alimente la charge s'il y a un manque de production par rapport à la demande pour assurer une alimentation efficace, continue et fiable. Un générateur diesel (Figure II-3) est la combinaison d'un moteur diesel et un alternateur (générateur électrique) dans le but de produire de l'électricité.



**Figure II-3: Schéma d'un générateur diesel**

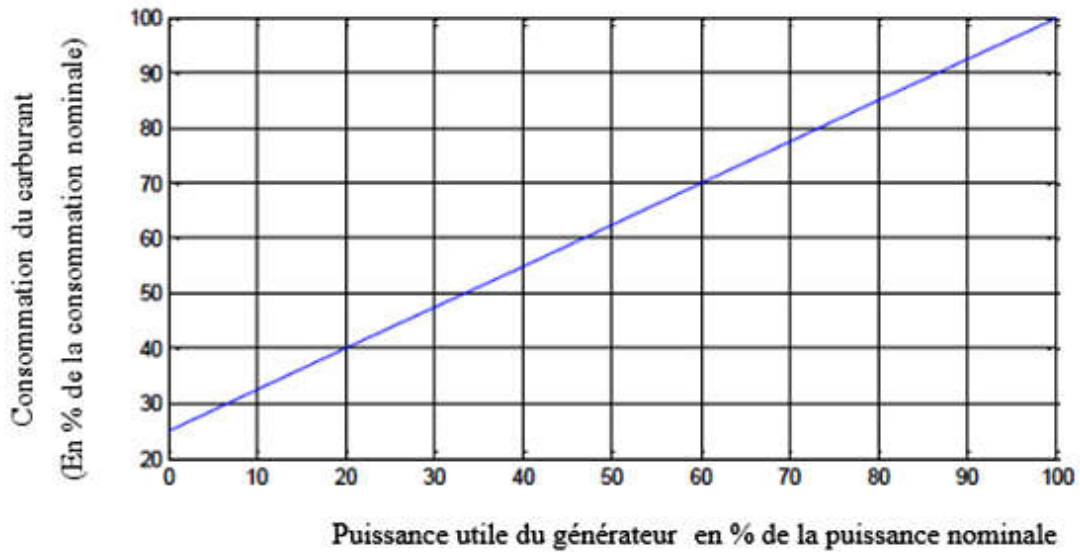
Idéalement, le moteur principal (the prime mover) est capable de satisfaire toute demande de puissance jusqu'à une puissance nominale à fréquence constante, et la machine synchrone connecté doit pouvoir maintenir une tension constante dans toutes les conditions de charge.

Le générateur diesel est utilisé pour produire de l'énergie électrique dans les cas suivants :

Dans des localités sans connexion au réseau électrique,

- Comme approvisionnement ininterrompible ou d'urgence,
- Lorsque le réseau ne peut pas fournir la totalité de la puissance requise pour l'écrêtement de la demande de pointe,
- Alimentation temporaire d'un endroit.

La consommation en carburant du groupe électrogène dépend de la puissance produite (output). Le groupe électrogène consomme environ 25% de carburant à pleine puissance nominale, même si aucune énergie n'est produite (Figure II-4).



**Figure II-4: La consommation relative de carburant par rapport à la puissance de sortie d'un groupe électrogène à vitesse constante**

#### II.4.1. Modèle du générateur diesel

La consommation en carburant du moteur diesel est modélisée en fonction de sa puissance de sortie par la formule suivante [69] :

$$f_{cons} = B_G P_{N_G} + A_G P_G \quad (II-22)$$

$f_{cons}$  (l/h): Consommation du générateur en fuel,

$P_{N_G}$  (kW) : Puissance nominale

$P_G$  (kW) : Puissance délivrée par le générateur diesel.

$A_G$  et  $B_G$  (l/kWh) : Coefficients de la courbe de consommation, définies par l'utilisateur. Les valeurs typiques sont  $A_G = 0.246$  (l / Kwh) et  $B_G = 0.08145$  (l / Kwh).

## II.5. Batteries de stockage

Pour convaincre l'influence du caractère aléatoire et variable dans le temps des énergies renouvelables, l'utilisation des systèmes de stockage d'énergie dans les sites isolés est une nécessité.

Les batteries sont les dispositifs de stockage les plus utilisés dans diverses applications. Une batterie se constitue de deux électrodes (anode et cathode) et un électrolyte. Le déplacement des ions de charge et de décharge de l'anode vers la cathode à travers l'électrolyte permet à la batterie de charger ou décharger l'énergie de stockage.

Il existe plusieurs types de batteries, cependant, le type le plus utilisé pour les applications de conception des SHERs sont les batteries plomb – acide [5].

### II.5.1. Fonctionnement des batterie Plomb – Acide

Une batterie Plomb – Acide (Figure II-5) est composée d'une cathode (électrode positive), une anode (électrode négative) et d'un électrolyte assurant le transfert des électrons entre les électrodes. Pendant la décharge, les réactions électrochimiques au niveau des deux électrodes génèrent un flux d'électrons à travers un circuit externe, la cathode acceptant les électrons et l'anode fournissant les électrons. Pendant le processus de charge, les réactions électrochimiques sont inversées et la batterie absorbe l'énergie électrique du circuit externe.

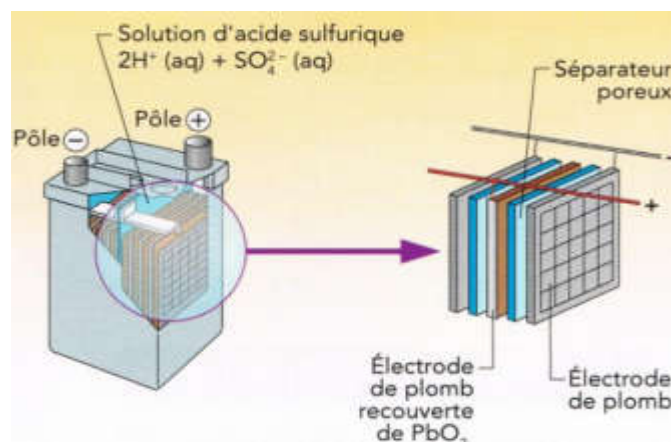
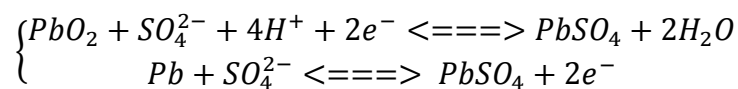


Figure II-5: composition d'une batterie Plomb – Acide

La réaction chimique représentée par le système est la suivante :



Il existe une différence de potentiel entre les deux électrodes d'environ 2 V. cette différence de potentiel dépend de la valeur instantanée de l'état de charge de la batterie. Pour les applications hybrides, les batteries couramment utilisées ont une tension nominale de 12 ou 24 V et se compose donc de 6 ou 12 accumulateurs connectés en série.

### II.5.2. Modélisation du banc de batterie

Dans la simulation SHER, La modélisation des dispositifs de stockage est importante. Elle permet d'une part, d'optimiser la gestion de l'énergie au sein du système en élaborant l'état de charge instantané (SOC). D'autre part, elle facilite l'estimation du coût du système de stockage pendant la durée de vie du système en évaluant sa durée de vie.

Trois principaux modèles de batterie sont proposés dans la littérature [4]. Un modèle énergétique se concentre sur la modélisation de l'état de charge qui est le paramètre le plus important dans le suivi des SHER. Un deuxième modèle dit modèle de tension qui estime la tension aux bornes de la batterie. Ce modèle est utilisé pour modéliser le système de gestion de la batterie et permet de calculer en détails les pertes dans l'accumulateur. Le dernier modèle est le modèle de vieillissement utilisé pour l'évaluation de l'impact du régime d'exploitation particulier sur la durée de vie attendue de la batterie.

### a) *Modèle énergétique*

L'état de charge du banc des batterie dépend de la différence entre la puissance totale produite ( $P_{tot}$ ) par le système et la consommation ( $P_{Cons}$ )

L'état de charge instantanée ( $SOC(t)$ ) de l'accumulateur pendant la charge est calculé par :

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + (P_{tot}(t) - P_{Cons}(t)) \cdot \frac{\eta_{ch}}{U_{bus}} \Delta t \quad (II-23)$$

Au cours de la phase de décharge  $SOC(t)$  est donnée par :

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + (P_{tot}(t) - P_{Cons}(t)) \cdot \frac{1}{\eta_{déch} U_{bus}} \Delta t \quad (II-24)$$

$\eta_{ch}$  et  $\eta_{déch}$  : Rendements de la charge et de la décharge des batteries

$U_{bus}$  : Tension nominale du bus continu

Pour maîtriser la durée de vie de la batterie, l'état de charge de la batterie est soumis à la contrainte suivante :

$$SOC_{max} \geq SOC(t) \geq SOC_{min} \quad (II-25)$$

Où :

$SOC_{max}$  : Capacité de stockage maximale permise, elle correspond à la capacité nominale  $C_n$  de l'ensemble des accumulateurs, qui à son tour liée au nombre total  $N_b$ , nombre de batteries montés en série  $N_{bs}$  ainsi que la capacité  $C_b$  de chaque batterie, tel que [11] :

$$C_n = C_b \left( \frac{N_b}{N_{bs}} \right) \quad (II-26)$$

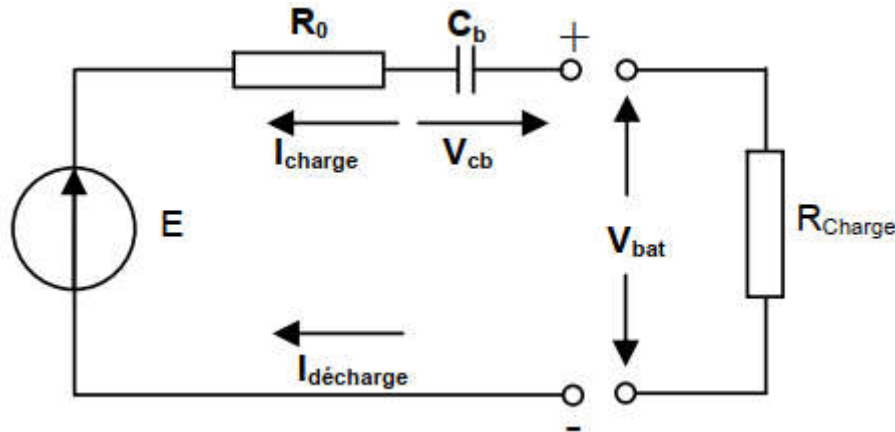
$SOC_{min}$  : Capacité de stockage minimale permise, elle est liée à  $SOC_{max}$  par :

$$SOC_{min} = (1 - DOD) \cdot SOC_{max} \quad (II-27)$$

DOD : Profondeur de décharge de la batterie.

### b) Modèle de la tension

Le modèle de tension est généralement basé sur des équations qui relie la tension au courant et à l'état de charge. Le schéma électrique équivalent de tel modèle schématise la batterie comme une source idéale de tension connectée en série avec une résistance et une capacité comme le montre la Figure II-6.



**Figure II-6: Modèle électrique simplifié d'une batterie**

En appliquant la loi des mailles :

$$V_{bat} = E - R_0 I_{bat} + V_{cb} \quad (\text{II-28})$$

$R_0$  : Résistance interne de la batterie,

$E$  : Tension de la batterie en circuit ouvert,

$V_{bat}$  : Tension au borne de la batterie,

$I_{bat}$  : Courant délivrer par la batterie,

$V_{cb}$  : Tension au bornes de la condansateur.

## II.6. Évaluation des sources et de la consommation

Les ressources énergétiques renouvelables éolienne et solaire sont inépuisables mais alternatives et fluctuantes. L'étude de leurs caractéristiques énergétiques est essentielle avant l'implantation d'une installation multi sources. Il est nécessaire alors de collecter les données météorologiques du site envisagé pour installer de tel système et estimer la consommation énergétique du consommateur puis quantifier les ressources énergétiques.

Le but de cette analyse est de mettre en évidence les différents paramètres indispensables pour la simulation du système hybride.

## II.6.1. Collecte des données météorologiques

### a) Irradiations solaires

La lumière du soleil est le carburant de toutes les technologies de conversion de l'énergie solaire. Pour toute source de production, la connaissance de la qualité et de la fiabilité future du combustible est essentielle pour des analyses précises des performances du système et pour déterminer la viabilité financière d'un projet. Pour les systèmes à énergie solaire, la variabilité de l'apport de lumière solaire représente probablement la plus grande incertitude quant aux performances prédites d'une centrale solaire. Les données sur les ressources solaires et la modélisation prennent en compte trois éléments de la vie d'un projet solaire :

- Données historiques à long terme pour la sélection de sites au cours d'études de faisabilité,
- Prévision de la production des centrales pour la conception et le financement des centrales,
- Mesure en temps réel et prévision solaire pour les opérations des installations et du réseau.

L'obtention de séries chronologiques de données ou de moyennes temporelles des composantes du rayonnement solaire - principalement l'irradiation globale sur plan horizontal et l'irradiation diffuse sur plan horizontal, liées à un système de conversion est la première étape avant la simulation de ce système et l'évaluation de ses critères de conception et de ses performances.

Les données sur le rayonnement solaire sont nécessaires à toutes les étapes d'un projet solaire. Avant la construction, de longues séries chronologiques de données historiques sont nécessaires pour quantifier la ressource solaire et sa variabilité. Pendant le fonctionnement, des données en temps réel sont généralement nécessaires pour vérifier les performances du système et détecter les problèmes. Dans les deux cas, les données requises peuvent être obtenues à partir de mesures, de modélisations ou d'une combinaison des deux. En réalité, les mesures ne sont généralement pas exclusivement utilisées pour différentes raisons [70]:

- Il n'existe pas de longues séries chronologiques de données mesurées dans la plupart des régions du monde,
- Même s'ils existent, ils contiennent très probablement des lacunes qui doivent être comblées par la modélisation, et

- La réalisation de mesures de qualité est considérablement plus coûteuse que les modèles d'exploitation (en supposant bien sûr que les coûts par ailleurs prohibitifs des opérations par satellite et de la gestion des données sont supportés par d'autres agences).

Les mesures de qualité restent toutefois essentielles, car leur incertitude est généralement nettement inférieure à celle des données modélisées. Elles peuvent donc servir à valider les modèles et même à améliorer la qualité des séries chronologiques modélisées à long terme grâce à un processus d'adaptation de site.

### **(1) Variabilité spatiale et temporelle des ressources solaires**

La variabilité est un terme large qui peut caractériser la ressource solaire de nombreuses manières, du point de vue spatial ou temporel. Dans ce dernier cas, toutes les échelles temporelles peuvent être considérées en fonction du contexte, des échelles inférieures à la seconde aux échelles pluriannuelles. La variabilité temporelle, si elle est bien caractérisée pour une région climatique, peut être utile pour déterminer si un ensemble de données à court terme convient pour produire des statistiques valides à long terme.

Le terme « variabilité » est également utilisé pour décrire la variabilité spatiale de la ressource dans un contexte climatologique. La variabilité spatiale peut aider à déterminer l'applicabilité d'un ensemble de données particulier pour un emplacement proche, en évitant éventuellement la nécessité de mesures supplémentaires. Dans ce cas, la variabilité caractérise les caractéristiques microclimatiques et les gradients de ressources régionaux.

La variabilité spatio-temporelle a deux causes. L'un est totalement prévisible et résulte du mouvement saisonnier et quotidien apparent du soleil dans le ciel et de la distance qui le sépare de la Terre. L'autre est moins prévisible. Il résulte du mouvement des nuages et, dans une moindre mesure, des aérosols, en relation avec les systèmes météorologiques.

### **(2) Méthodes Utilisées pour l'acquisition des données**

L'acquisition de données pour l'irradiance peut être faite par deux méthodes : une méthode physique et une méthode numérique [71].

#### ***La méthode physique***

Dans cette méthode on utilise un pyréliomètre pour mesurer le rayonnement solaire direct, alors que le rayonnement global sur un plan horizontal peut être mesurer à l'aide d'un pyranomètre. Le rayonnement diffus est mesuré en occultant le rayonnement direct par une bonde montée sur un pyranomètre (Figure II-7).



**Figure II-7: Outils de mesure des différentes composantes de l'irradiation solaire**

La fraction du rayonnement réfléchi peut être déterminée en utilisant deux pyranomètres, l'un orienté vers le ciel alors que l'autre orienté vers le sol. La différence entre les signaux fournis par les deux représente la fraction du rayonnement réfléchi.

L'héliographe (Figure II-8) est utilisé pour l'estimation de la durée d'ensoleillement. Cette boule en verre concentre le rayonnement solaire en un point d'un papier thermosensible. Une trace apparaît au cours du temps. La longueur de la trace donne la durée d'ensoleillement.



**Figure II-8: Héliographe [72]**

### *La méthode numérique*

Plusieurs modèles ont été proposés dans la littérature permettant le calcul du rayonnement solaire [73]. Ces modèles sont basés sur plusieurs paramètres tels que la vapeur d'eau, et le trouble atmosphérique.

D'autres modèles sont basés sur l'analyse des images satellites.

### ***b) Les données du vent***

Le vent est défini comme le mouvement horizontale de l'air. Il est produit par les variations atmosphériques sur la surface de la terre.

Pour caractériser le vent, il est nécessaire de savoir son profil directionnel, le profil de vitesse et ses variations horaires, journalières, mensuelles ou annuelles ainsi que son profil énergétique.

#### **(1) Méthodes pour l'acquisition des données**

L'acquisition de données du vent peut être fait par deux méthodes : une méthode physique et une méthode numérique.

##### ***La méthode physique***

Plusieurs méthodes sont utilisées pour mesurer les ressources éoliennes, quelques méthodes sont expliquées ci-après :

##### ***i) Le mât de mesure***

Cette méthode utilise un mât de taille variable (Figure II-9) équipé de girouettes (pour la mesure de la direction du vent), d'anémomètres (pour mesurer la vitesse du vent), de thermomètre (mesure de température), de baromètre (mesure de pression) et d'hygromètres (mesure d'humidité).

Les données mesurées par ces différents capteurs sont enregistrées et stockées à intervalles réguliers dans un « logger » (Figure II-10), logé dans une armoire métallique se trouvant dans la partie inférieure du mât.

##### ***i) Les appareils de mesure à distance***

Sonic Detection and Ranging (SODAR) et Light Detection and Ranging (LIDAR) sont des outils de mesure à distance utilisés pour des mesures météorologiques.

Le SODAR utilise la vitesse du son pour calculer les données atmosphériques. Les mesures sont effectuées par l'émission d'un signal acoustique dont l'écho est analysé afin d'évaluer la vitesse et la direction du vent, ainsi que les turbulences atmosphériques.

D'une manière similaire, le LIDAR analyse le profil du vent au moyen d'un faisceau laser. Un rayon lumineux tridimensionnel de forme conique est envoyé dans l'atmosphère. Le décalage Doppler des émissions laser diffusées par les particules atmosphériques est mesuré en vue de définir les caractéristiques du vent [75].



**Figure II-9: Mât de mesure des ressources éoliennes [74]**



**Figure II-10: data logger [74]**

### *La méthode numérique*

Il existe plusieurs outils de modélisation numérique, ils se différencient surtout par les modèles utilisés. On distingue les modèles découlant de la seule MDF comme WindPro, WindFarm et Wasp, qui fonctionnent en se basant sur la MDF et principalement sur les équations de Navier-Stokes [76].

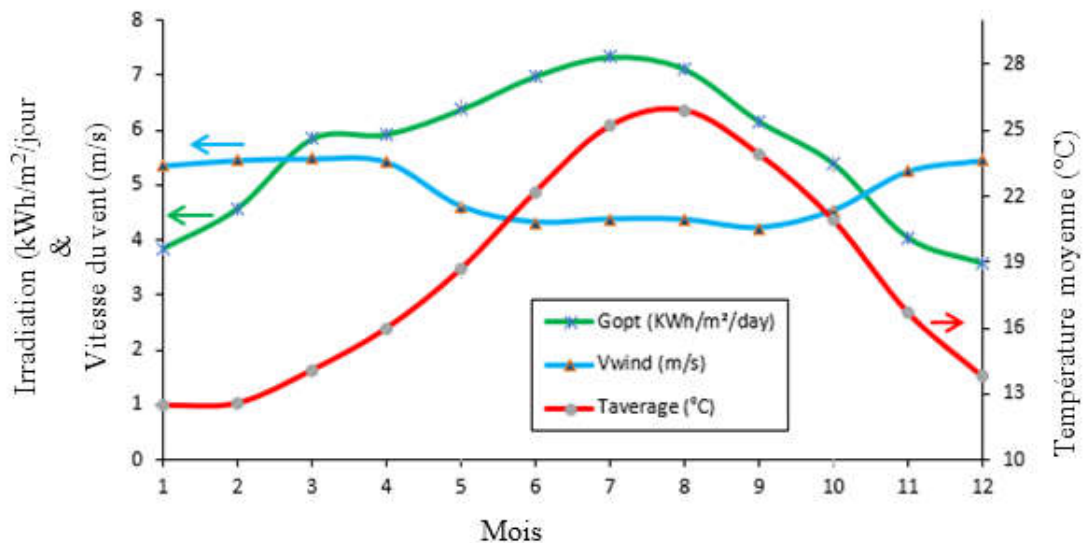
D'autres outils de calculs complexes en se basant sur des modèles intégrant l'ensemble des conditions météorologiques

*c) Les données utilisées pour cette étude*

Les données de vitesse du vent et la température ambiante ont été obtenues du modèle de météorologie de surface et d'énergie solaire (SSE) de la NASA [77], tandis que les données d'irradiation ont été acquises du système d'information géographique photovoltaïque PVGIS [78].

Les données ont été consultées en se connectant sur les deux sites Web et en saisissant la latitude et la longitude de la zone étudiée. Une fois que l'emplacement a été saisi, le programme a généré des données météorologiques mensuelles pour une période déterminée.

La Figure II-11 montre la variation moyenne mensuelle de la vitesse moyenne du vent, de l'irradiation solaire sur une surface inclinée et de la température ambiante. Les valeurs de rayonnement ont été moyennées sur une base mensuelle pour une période de 20 ans (1985-2004) pour la région de Skikda.



**Figure II-11: Les valeurs moyennes mensuelles de la vitesse du vent, de l'irradiation et de la température**

Les valeurs maximale et minimale du rayonnement solaire moyen mensuel sont affichées durant le mois de Décembre et Juillet avec 3.58 et 7.34 kWh / m<sup>2</sup> / jour, respectivement. Néanmoins, la région enregistre une petite variation dans la distribution du profil de vitesse du vent. La valeur moyenne de la vitesse du vent est estimée à 4,89 m / s (pour une valeur moyenne sur 22 ans entre 1983 et 2005), comme le montre la Figure II-11. La variation de la vitesse du vent et

du rayonnement solaire montre une bonne complémentarité entre les systèmes photovoltaïques et éoliens.

### II.6.2. Estimation de la consommation

L'étude de faisabilité des systèmes hybrides à énergies renouvelables pour alimenter un site isolé nécessite la connaissance de la consommation en électricité de ce dernier. Pour cette raison, nous allons modéliser deux profils de consommation à savoir le premier est pour l'alimentation du matériel électroménager et médical se trouvant dans un centre de santé.

Le deuxième profil, concerne l'alimentation d'un système de pompage dédié pour l'irrigation des plantes dans une région isolée.

#### a) Calcul du besoin journalier dans un building

Pour les matériels électriques le calcul du besoin énergétique journalier ( $B_j$ ), nécessite de connaître la puissance ( $P_i$ ) de chaque appareil et son temps d'utilisation ( $t_i$ ). L'énergie journalière consommée ( $E_i$ ) (en Wh/j) est le produit des deux, soit :

$$E_i = P_i \cdot t_i \quad (\text{II-29})$$

Le besoin journalier ( $B_j$ ) à satisfaire est la somme de toutes les énergies journalières consommées par tous les équipements.

$$B_j = \sum_{i=1}^n E_i \quad (\text{II-30})$$

#### b) Calcul du besoin journalier dans un système de pompage

Pour un système de pompage dédié à l'irrigation, et pour déterminer le besoin en énergie du système motopompe, il faut déterminer le besoin en eau d'irrigation pour la plante à irriguer.

En effet, le volume d'eau nécessaire à l'irrigation dépend de nombreux facteurs, tels que le type de sol, le type de culture et les conditions météorologiques. Elle peut être estimée en calculant les précipitations effectives, l'évapotranspiration de référence ( $ET_0$ ) et l'évapotranspiration dans des conditions standards ( $ET_C$ ) [79, 80].

L'énergie hydraulique requise dépend des besoins quotidiens en eau et de la hauteur manométrique, elle peut être calculée à l'aide de la relation suivante :

$$E_h = \frac{g \cdot \rho \cdot V \cdot h}{3600} \quad (\text{II-31})$$

L'énergie électrique équivalente est estimée par la formule suivante :

$$E_{elec} = \frac{E_h}{\eta} \quad (\text{II-32})$$

Où :  $E_{elec}$  est l'énergie électrique requise ; et  $\eta$  est le rendement de la motopompe

## **II.7. Etude expérimentale de l'effet de l'ombrage partiel sur la caractéristique I-V d'un panneau PV.**

Les panneaux solaires gagnent de l'importance en tant que source principale d'énergie de remplacement dans les conditions actuelles d'épuisement des énergies non renouvelables. Les panneaux solaires sont de plus en plus utilisés dans les grandes et les petites installations. L'ombrage partiel est l'un des problèmes rencontrés dans les applications terrestres du solaire photovoltaïque. L'ombrage partiel réduit la puissance d'un panneau photovoltaïque. Par cette étude expérimentale, on montre l'influence de l'ombrage partiel sur les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque. On étudie trois cas d'ombrage différents :

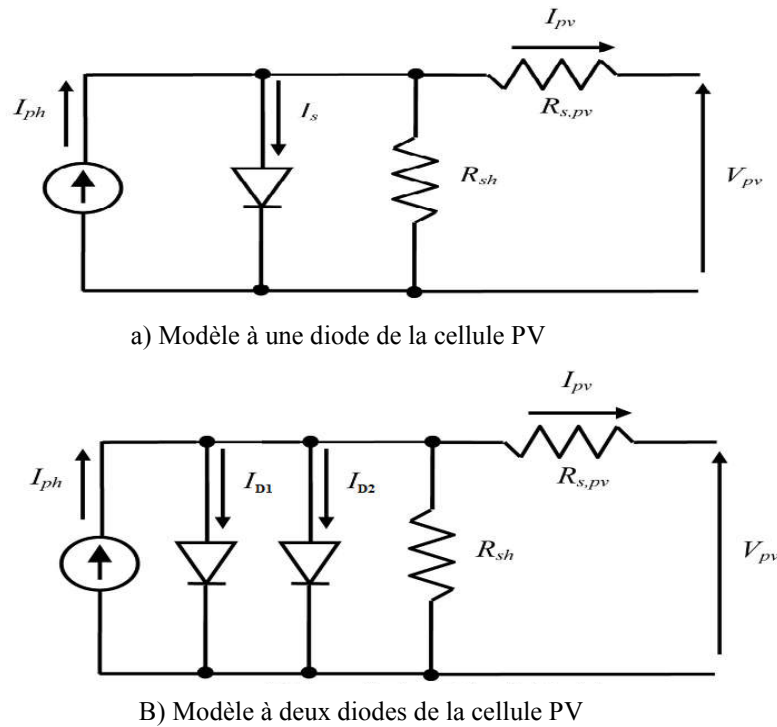
- Une cellule,
- Une branche,
- Une ligne horizontale.

Les résultats ont montré que la perte de puissance était de 74.42, 79.54 et 98.97% pour un taux d'ombrage de 100% d'une cellule, d'une branche et d'une ligne horizontale, respectivement.

### **II.7.1. Introduction sur les performances des panneaux photovoltaïques**

Un panneau solaire photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules [55] ; ces cellules peuvent être connectées en série, en parallèle ou dans une configuration mixte pour répondre aux besoins en puissance tout en ajustant les valeurs de courant et de tension fournies par ces cellules. Les cellules sont produites selon de nombreuses technologies différentes telles que le silicium monocristallin, le silicium polycristallin, le silicium amorphe et les couches minces [81].

Un modèle mathématique avec double diode de cellule photovoltaïque solaire a été proposé par [82], puis un modèle généralisé de la cellule photovoltaïque solaire avec une seule diode est arrivé [83]. La Figure II-12 illustre les schémas électriques de ces modèles.



**Figure II-12: modèles équivalents d'une cellule PV**

De nombreux modèles de cellules solaires ont été développés à l'aide de MatLab [84, 85]. Les modèles de panneau solaire PV ont été rapportés par de nombreux articles de recherche dans la littérature [82, 86-88]. Ces modèles simulent le fonctionnement normal des panneaux photovoltaïques et peuvent présenter l'influence des conditions climatiques (rayonnement et température) sur les caractéristiques électriques des panneaux photovoltaïques. Cependant, ces modèles ne prennent pas en compte les effets de disparité (mismatch) de l'ombrage.

La performance des panneaux photovoltaïques est affectée par plusieurs facteurs, notamment les conditions d'ombrage partiel. L'effet de l'ombrage affecte l'efficacité des panneaux et des systèmes photovoltaïques [89]. Pour les systèmes domestiques, il peut être le facteur le plus préjudiciable à leur performance. Cependant, dans les nouvelles tendances des systèmes photovoltaïques intégrés, il est pratiquement difficile d'éviter les conditions d'ombrage partiel des panneaux solaires. Les cellules ombragées peuvent obtenir un biais inverse, agissant comme des charges, drainant le pouvoir des cellules entièrement éclairées [90, 91]. L'impact de l'ombrage partiel sur les performances du système photovoltaïque a déjà fait l'objet de nombreuses études. Les auteurs de [91] ont étudié les effets des ombres sur la caractéristique I-V et les ont utilisés pour développer des modèles mathématiques. Quaschnig et Hanitsch [92] ont donné un modèle décrivant la relation entre le courant et la tension de la cellule solaire. Ils ont proposé un algorithme permettant de calculer l'un d'eux pour une valeur donnée de l'autre

pour une cellule. Une étude expérimentale a été réalisée par Alonso-García [93] sur un module PV conventionnel ; dans cette étude, les auteurs ont testé plusieurs profils d'ombrage et ont souligné la caractéristique inverse de la cellule ombrée dans la sortie du module. Alsayid et al. [94] avaient analysé différentes situations d'ombrage afin d'illustrer l'effet de l'ombrage partiel sur un champ photovoltaïque. Khaing et al. [95] ont abordé les impacts de différents ombrages partiels sur les caractéristiques de fonctionnement de quatre technologies différentes de modules solaires photovoltaïques, à savoir multicristallin, couches minces amorphes, couches minces de CdTe et couches minces de CIGS.

### II.7.2. Principe de fonctionnement physique et modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque

La cellule solaire est l'élément de base des panneaux photovoltaïques. Il convertit directement l'énergie du soleil en électricité [81, 96, 97]. Une cellule solaire typique est constituée d'une grande surface de jonction P-N. Pour les cellules à base de silicium, cette jonction P-N est produite en introduisant des impuretés dans les atomes (Figure II-13). Lorsqu'un photon lumineux ayant une énergie supérieure à l'énergie de la bande interdite frappe la cellule solaire, des paires de trous d'électron sont créées et configurent une différence de potentiel électrique à travers l'interface [98].

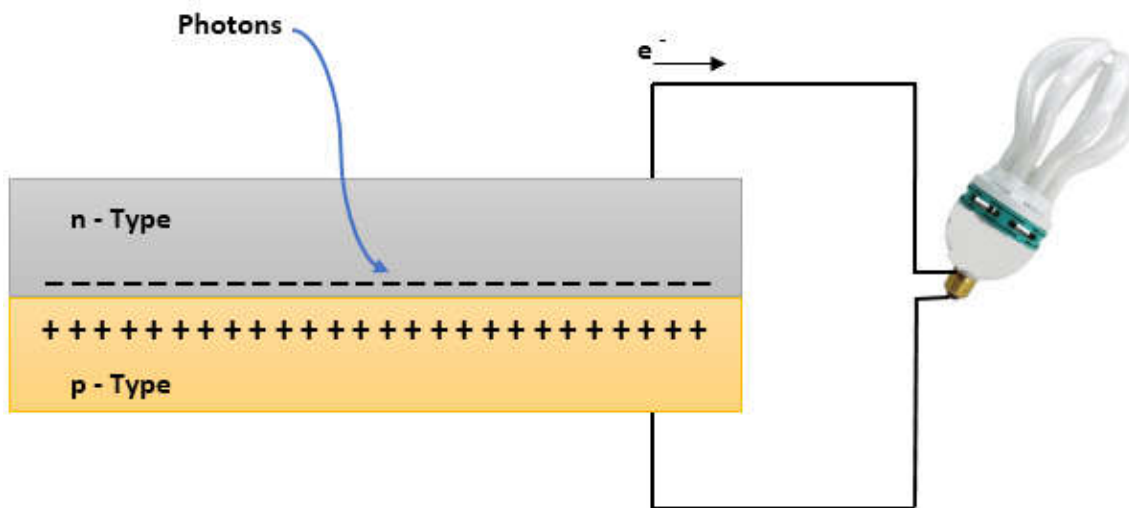


Figure II-13: modèles équivalents d'une cellule PV

Le modèle mathématique proposé par Bishop [99] est retenu comme modèle de cellule solaire le mieux adapté aux opérations normales et inverses. Ce modèle peut être présenté par la formule suivante :

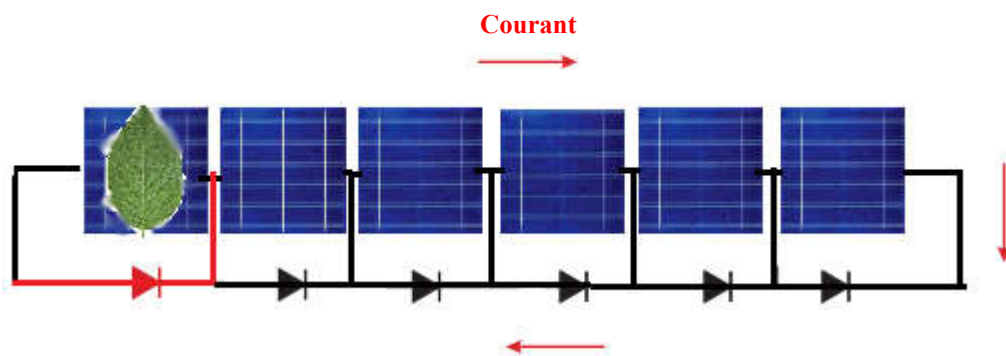
$$I = I_{PH} - I_{01} * \left( \exp\left(\frac{q * (V + R_S * I)}{n * K * T}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_S * I}{R_{Sh}} \left( 1 + \left( \frac{a}{1 - \frac{V + R_S * I}{V_{br}}} \right)^{-m} \right) \quad (\text{II-33})$$

Avec :

$I$ : courant de sortie de la cellule,  $I_{PH}$ : Photo courant,  $I_{01}$ : courant de saturation inverse de la diode,  $V$ : tension de sortie de la cellule,  $q$ : charge d'électron,  $n$ : facteur d'idéalité de la diode,  $K$ : constante de Boltzmann,  $T$ : température en Kelvin,  $R_S$ : résistance série équivalente,  $R_{Sh}$ : résistance parallèle équivalente,  $V_{br}$ : tension de claquage dépendante des compromis technologiques,  $a$ : fraction du courant impliqué dans le phénomène d'avalanche,  $m$ : exposant d'avalanche dépendant de la technologie des cellules PV

### II.7.3. Ombrage partiel et diode de dérivation

Avec les panneaux solaires, il n'est presque pas possible d'obtenir une intensité lumineuse uniforme à cause des ombres des bâtiments, de la saleté et de la poussière, des arbres et des feuilles, du pollen, des excréments d'oiseaux, des nuages, des fluctuations atmosphériques et du changement quotidien de l'angle du soleil [100]. L'impact de l'ombrage dépend de nombreux facteurs tels que le type de module, le facteur de forme, l'emplacement des diodes de dérivation, la sévérité de l'ombrage et la configuration de la chaîne. Généralement, un panneau solaire contient des diodes bypass pour éviter les dommages causés par le courant inverse sur des cellules partiellement ombragées [93, 101]. La Figure II-14 illustre l'importance de l'existence d'une diode de dérivation dans des conditions d'ombrage.



**Figure II-14: Importance de la diode de Bypass pendant l'ombre**

Sans diodes bypass ou en cas de défaillance des diodes en circuit ouvert, une ombre partielle peut entraîner le fonctionnement des cellules avec des tensions de polarisation négatives [102]. Pour obtenir des performances et une fiabilité élevée, en particulier dans les environnements ombragés, certains types de modules PV nécessitent plus des diodes de dérivation par rapport aux d'autres types.

#### **II.7.4. Simulation d'un panneau solaire photovoltaïque sous ombrage partiel**

Pour simuler l'effet de l'ombrage partiel sur les panneaux solaires, un modèle MatLab / Simulink proposé est utilisé et illustré à la Figure II-15.

Les résultats de la simulation de l'effet de l'ombrage partiel à 50% d'une cellule solaire sur les caractéristiques électriques sont illustrés aux Figure II-16 et Figure **II-17**

Les Figure II-16 et Figure **II-17** montrent que l'ombrage partiel de la cellule PV réduit les valeurs de courant (et de puissance) produites par la cellule et, par conséquent, réduit la valeur du courant maximal généré par les cellules connectées en série.

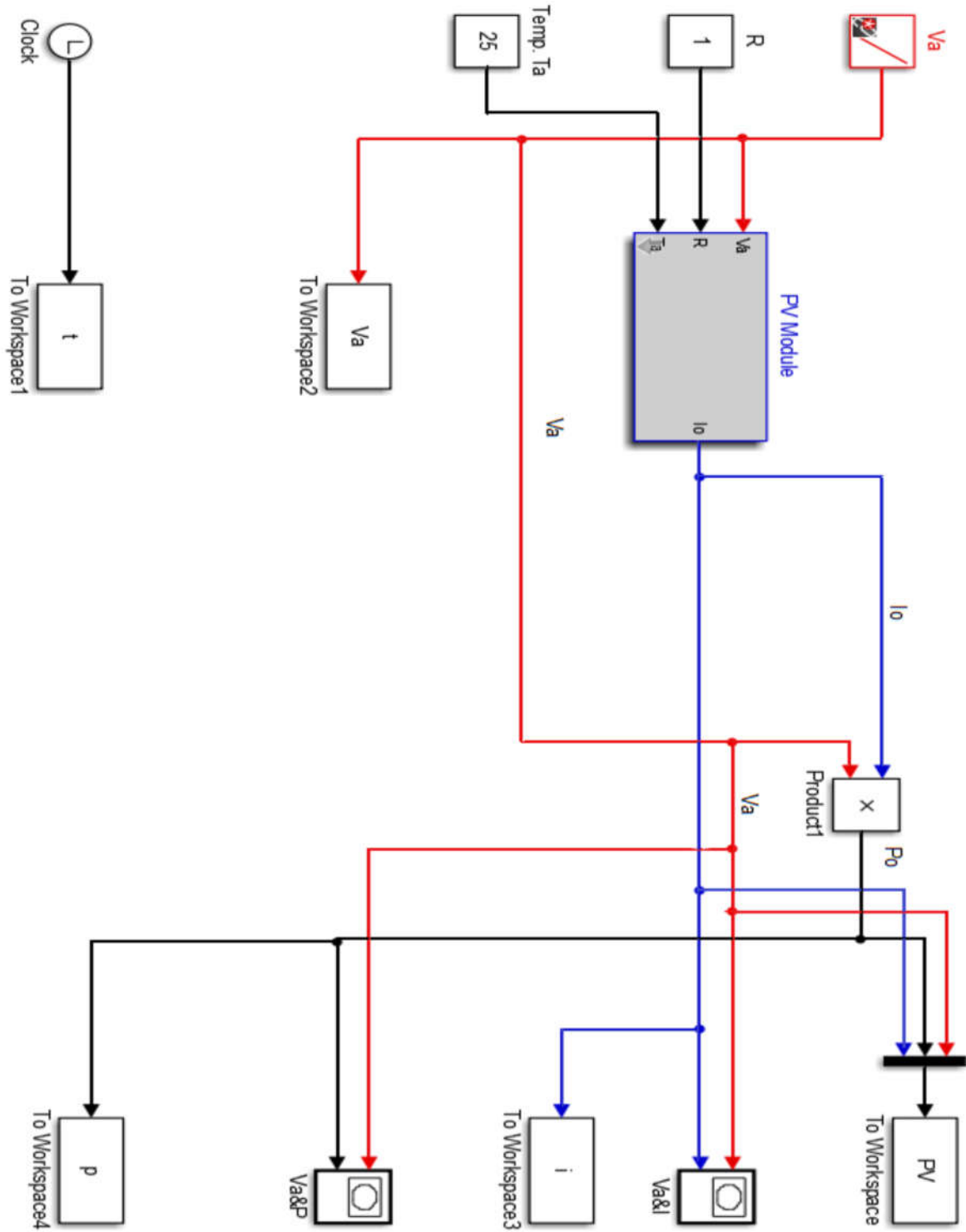
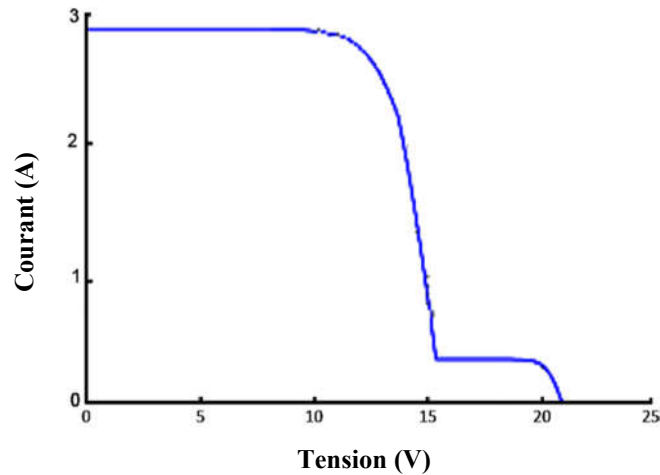
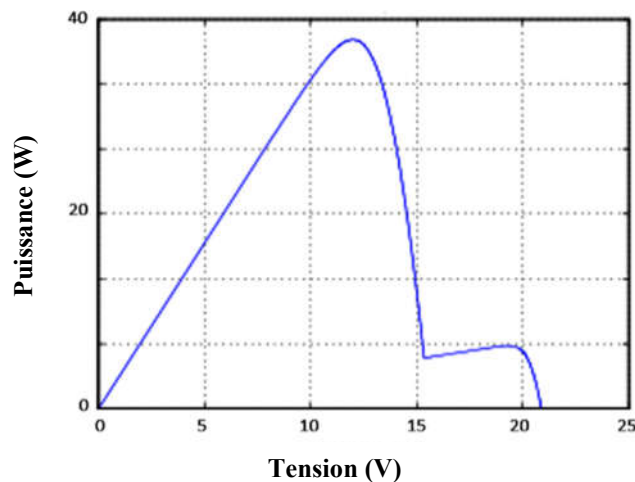


Figure II-15: Modèle Simulink du panneau étudié



**Figure II-16: Caractéristiques I-V d'un panneau photovoltaïque simulé après avoir ombré 50% d'une cellule**



**Figure II-17: Caractéristiques P-V d'un panneau PV simulé après ombrage de 50% d'une cellule**

### II.7.5. Configuration expérimentale et procédure de l'expérience

Une étude expérimentale a été réalisée sur un panneau solaire photovoltaïque de l'unité de recherche sur les énergies renouvelables à Ghardaia au sud de l'Algérie (latitude  $32,36^\circ$  ; longitude  $3,81^\circ$  ; altitude 450 m). Des mesures de la température, de la puissance électrique et du rayonnement sur une période donnée ont été identifiées et ont permis de déterminer de manière pratique toutes les caractéristiques électriques et thermiques de ce panneau.

Les appareils de mesure et d'expérimentation utilisés sont détaillés comme suit :

- Les mesures de température ont été effectuées par PT100 RTD avec une résolution de  $0,0221^\circ\text{C}$  et des thermocouples de type K.

- Le rayonnement global a été mesuré avec un pyromètre de type Kipp et Zonen avec un coefficient de  $0,00000457 \text{ V m}^2 / \text{W}$ .

Les différents capteurs sont reliés à un ordinateur au moyen d'un système d'acquisition de données (Figure II-18).



**Figure II-18: Équipement utilisé dans l'expérience**

Les conditions d'ombrage ont été observées pour différents nombres de cellules ombrées à la fois. Une cellule, une ligne horizontale (3 cellules) et une ligne verticale (12 cellules) d'un panneau constitué de 36 cellules ont été ombrées, générant des niveaux d'ombrage respectifs de 2.78, 8.33 et 33.33%.

## **II.7.6. Résultats and discussions**

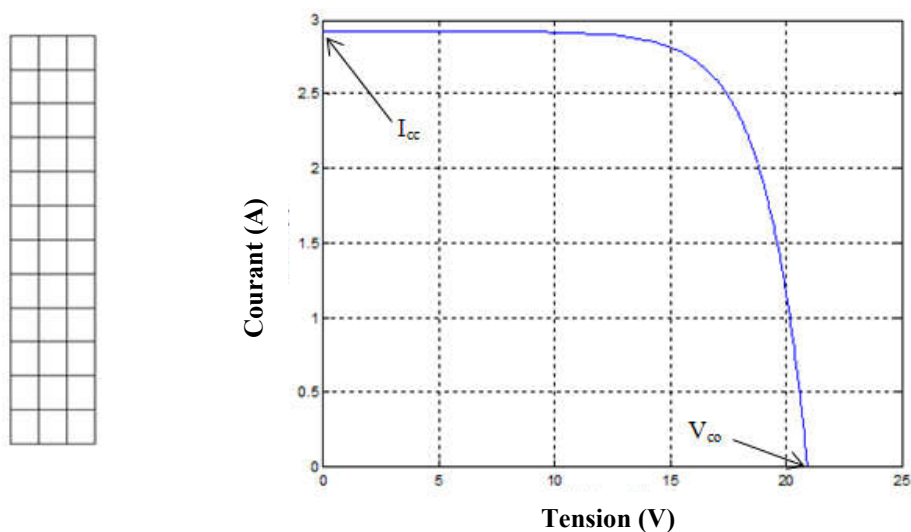
### ***a) 2.7.6.1 Caractéristique I-V du panneau sans ombrage***

La Figure II-19 montre l'évolution du courant avec les variations de tension du panneau pour un éclairage et une température ambiante ; les valeurs de  $I_{CC}$  et de  $V_{CO}$  sont proches de celles du panneau dans des conditions de test standard (STC).

Les caractéristiques du panneau solaire utilisé sont présentées dans le Tableau II-2.

**Tableau II-2: Caractéristiques du panneau photovoltaïque utilisé**

Parameters	Values
Resistance série: $R_s$	1.9 $\Omega$
Resistance Parallèle: $R_p$	0.34 k $\Omega$
Illumination: G	1068 W/m <sup>2</sup>
Facteur de forme: FF	0.631
Courant de court-circuit : $I_{CC}$	2.99 A
Tension de circuit ouvert : $U_{CO}$	20.8 V
Courant à $P_{max}$ : $I_{max}$	2.62 A
Tension à $P_{max}$ : $U_{max}$	14.9 V
Puissance maximale : $P_{max}$	39.1 W

**Figure II-19: Caractéristique I-V du panneau photovoltaïque sans ombrage**

### *b) 2.7.6.2 Caractéristique I-V du panneau après l'ombrage d'une cellule*

La Figure II-20 montre la caractéristique I-V du panneau solaire après occultation d'une seule cellule. Il y a deux parties dans la courbe :

- Dans la première partie, il y a une chute de tension mais elle n'arrive pas à zéro, ce qui est causé par le début de l'effet de la cellule ombrée qui réduit la valeur de la tension totale.

- La deuxième partie montre que la courbe revient au point du circuit ouvert, ce qui est dû à la diode de dérivation.

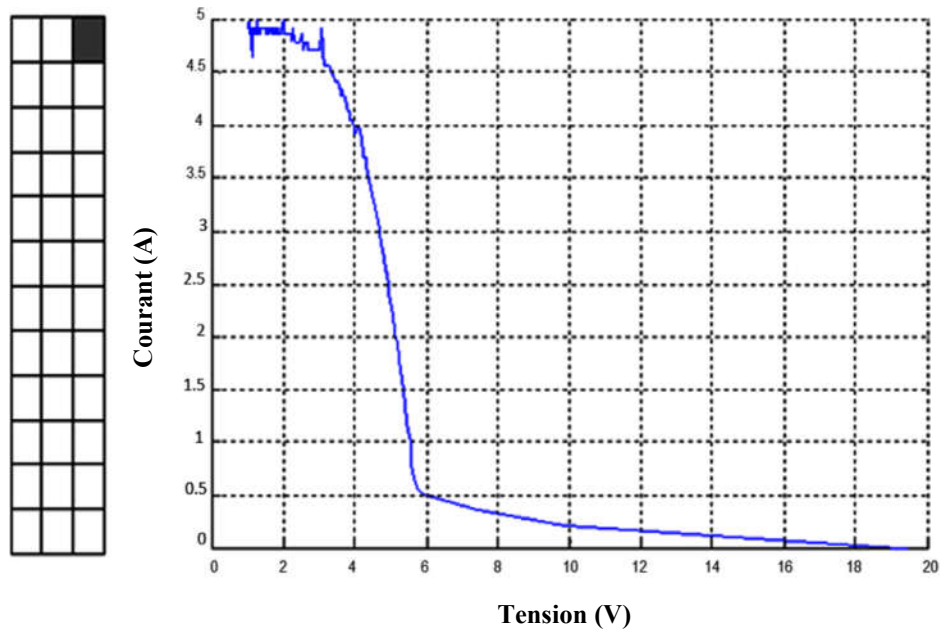


Figure II-20: Caractéristique I-V du panneau solaire après l'ombrage d'une seule cellule

c) 2.7.6.3 Caractéristique I-V du panneau après avoir ombré les cellules d'une branche (33% du panneau)

Sur la Figure II-21, la caractéristique I-V du panneau est présentée après l'ombrage vertical d'un tiers de sa surface. La courbe illustrant cette caractéristique est similaire à celle du cas précédent car les cellules sont connectées en série

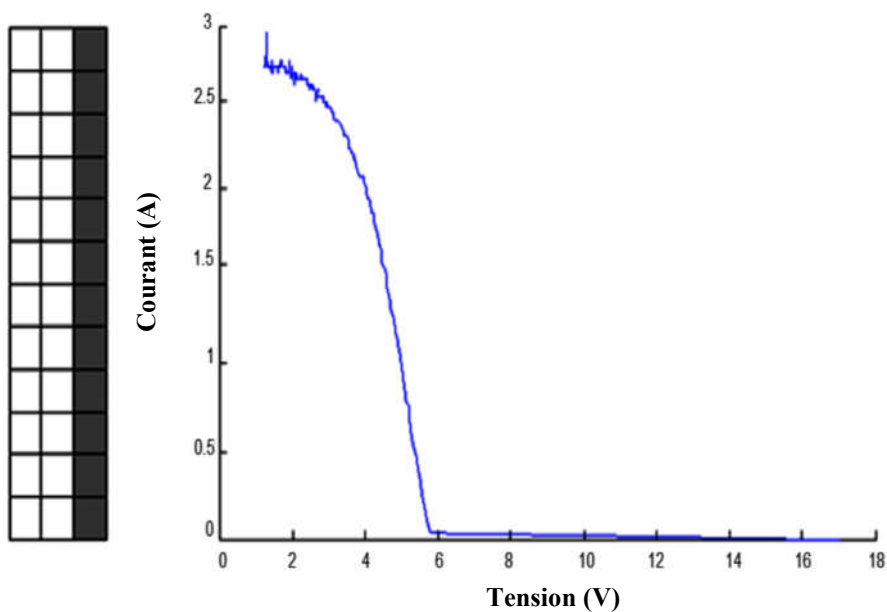


Figure II-21: Caractéristique I-V du panneau après ombrage d'une branche

#### d) Caractéristique I-V du panneau après ombrage d'une ligne horizontale

Après avoir ombré une ligne composée de trois cellules, une de chaque branche, la caractéristique électrique (I-V) de la Figure II-22 montre la diminution de la valeur de court-circuit (valeur basse) car les trois branches sont connectées en parallèle.

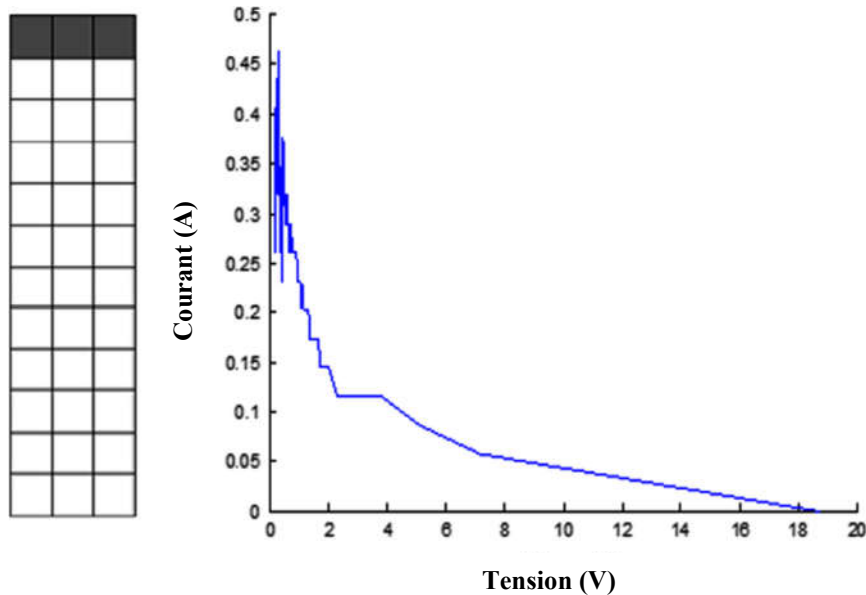


Figure II-22: Caractéristique I-V du panneau après ombrage d'une ligne horizontale

#### e) Discussions

Il ressort clairement de ces observations que si une partie du panneau photovoltaïque est ombrée, il en résulte une perte de puissance dans les cellules ombragées.

Le tableau 2 présente la variation des valeurs maximales de puissance pour les différents niveaux ombrés associés à son courant et à sa tension. La perte de puissance produite par l'effet d'ombrage ( $\Delta P$ ) est estimée à l'aide de la formule suivante :

$$\Delta P_i (\%) = \left(1 - \frac{P_{maxi}}{P_{maxR}}\right) \cdot 100 \quad (\text{II-34})$$

Où :

$P_{maxR}$ : est la puissance maximale délivrée par un panneau non ombré.

$P_{maxi}$ : est la puissance maximale délivrée par le panneau aux différents niveaux d'ombrage.

**Tableau II-3: Pertes en puissance pour différents niveaux d'ombrage**

Cas	$I_{\max}$ (A)	$V_{\max}$ (V)	$P_{\max}$ (W)	$\Delta P$ (%)
Reference (0 Cellule CS*)	2.62	14.9	39.1	--
1 cellule CS	2.5	4	10	74.42
1 branche CS	2	4	8	79.54
1 line horizontal CS	0.1	4	0.4	98.97

\*CS: Completely Shaded.

Selon des études statistiques, la perte de puissance dans des conditions d'ombrage peut varier de 10 à 70% [103]. Cependant, dans le présent travail, la perte de puissance varie de 74 à 99%.

Les courbes I-V des figures Figure II-19, Figure II-20, Figure II-21 et Figure II-22 montrent que la valeur du courant de court-circuit est la même pour les trois premières figures ; Cependant, il tombe pour la dernière expérience.

Le modèle mathématique donnant I fonction de V des panneaux photovoltaïques dépend du nombre de cellules en série et en parallèle ; les expériences montrent que la variation du courant est plus dépendante de la résistance en série et moins dépendante de la résistance parallèle. A partir des courbes des figures Figure II-20 et Figure II-21, pour une même valeur de tension, le courant diminue avec l'augmentation de la zone ombrée, ce qui entraîne une augmentation de la résistance du panneau (application de la loi d'Ohm).

Dans la courbe de la Figure II-22, les augmentations de la tension de circuit ouvert sont dues à l'ombrage de branches parallèles. La variation de la tension dépend davantage de la résistance parallèle et moins de la résistance série.

### II.7.7. Conclusion

Dans cette étude, on a montré que l'ombrage d'une cellule dans une branche dans laquelle toutes les cellules (12 cellules) sont connectées en série a presque le même effet que l'ombrage de la branche entière. Une diminution significative des valeurs délivrées par le panneau est observée après l'occlusion d'une cellule dans les trois branches.

Les résultats obtenus de cette étude permettent de conclure que la puissance délivrée par le panneau n'est pas proportionnelle à la surface ombragée, alors que le mode de connexion des cellules joue un rôle très important sur les caractéristiques électriques des panneaux.

## **II.8. Conclusion du chapitre**

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différents modèles mathématiques des panneaux photovoltaïques, éoliennes, générateurs diesel et batteries de stockage. Une étude de l'influence d'ombrage sur les performances des panneaux photovoltaïques.

Dans le chapitre 3, on exposera la technique d'optimisation linéaire pour le dimensionnement des SHERs.

---

# OPTIMISATION LINEAIRE POUR LE DIMENSIONNEMENT D'UN SHER

CHAPITRE

III

---

## Sommaire

CHAPITRE III. OPTIMISATION LINEAIRE POUR LE DIMENSIONNEMENT D'UN SHER .....	73
III.1. Introduction .....	74
III.2. Notions d'optimisation .....	74
III.3. Généralités sur l'optimisation linéaire .....	75
III.4. Techniques de résolution des problèmes d'optimisation linéaire.....	76
III.4.1. L'algorithme de Simplex.....	76
III.5. État de l'art sur l'utilisation de l'optimisation linéaire dans les SHERs .....	77
III.6. Formulation d'un problème d'optimisation linéaire pour le dimensionnement d'un système hybride PV/éolien .....	80
III.7. Conclusion.....	81

### III.1. Introduction

Parmi les méthodes d'optimisation cités auparavant, l'optimisation linéaire dite parfois programmation linéaire (PL), un outil puissant et mérite d'être utilisé pour dimensionner les SHERs. Dans ce chapitre, une étude détaillée des principes de cette technique, un état de l'art sur leur utilisation dans le domaine de dimensionnement optimale des SHERs, les algorithmes utilisés pour la résolution des problèmes formulés comme PLs ainsi la formulation des problèmes de dimensionnement optimal des SHERs sont présentés.

### III.2. Notions d'optimisation

En mathématique, le terme « optimisation », fait référence à l'étude de problèmes dans lesquels on cherche à minimiser ou à maximiser une fonction réelle appelée fonction objectif [104] ou indice de performance, en choisissant systématiquement les valeurs de variables réelles ou entières dans un ensemble autorisé. Cette fonction peut être une quantité telle que le coût, le profit, la taille, etc.

Les variables de la fonction objectif sont désignées par variables de conception ou de décision. Pour des raisons pratiques, les variables de décision peuvent prendre des valeurs comprises entre une limite inférieure et une limite supérieure. Les variables de conception peuvent être un nombre réel ou discret, binaire ou entier.

Les contraintes sont celles qui permettent aux inconnus de prendre certaines valeurs mais d'en exclure d'autres. Cependant, les contraintes ne sont pas essentielles dans un problème d'optimisation et les problèmes d'optimisation peuvent également être définis sans aucune contrainte.

Un problème d'optimisation peut être formuler mathématiquement comme suit :

$$\max(\text{ou min}) f(x) \tag{III-1}$$

Sous contraint

$$g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m < n \tag{III-2}$$

$$h_j(x) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, r < n \tag{III-3}$$

$$x_l \leq x \leq x_u \tag{III-4}$$

Avec :  $x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$  est un vecteur de  $n$  variables de décision, ces variables sont limitées par une limite inférieure  $x_l$  et une limite supérieure  $x_u$  ;  $g_i$  et  $h_j$  sont les contraintes d'inégalité et les contraintes d'égalité, respectivement.

Les problèmes d'optimisation peuvent être classés en fonction du type de contraintes, de la nature des variables de conception, de la structure physique du problème, de la nature des équations impliquées, des valeurs admissibles des variables de décision, de la nature déterministe des variables et du nombre de fonctions objectif.

### III.3. Généralités sur l'optimisation linéaire

Un cas particulier de la programmation mathématique ou l'optimisation est la programmation linéaire. Elle concerne la maximisation ou la minimisation d'une fonction d'objectif linéaire dans de nombreuses variables soumises à des contraintes d'égalité et d'inégalité linéaires.

La définition mathématique d'un problème d'optimisation linéaire sous forme standard consiste à trouver les valeurs positives de  $x_1, x_2 \dots x_n$  pouvant satisfaire la fonction objectif ( $\max(\text{ou min}) f(x)$ ).

Sous forme matricielle, un problème d'optimisation linéaire peut être formulé comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \max(\text{ou min}) f(x) = C^T x \\ \text{sous contraintes} \\ Ax = b, \quad A = m \times n \\ x \geq 0 \end{array} \right. \quad \text{(III-5)}$$

Le processus de création d'un modèle mathématique est souvent considéré comme aussi important que sa résolution, car il permet de mieux comprendre le fonctionnement du système et d'organiser les informations essentielles le concernant. Les modèles du monde réel ne sont pas toujours faciles à formuler en raison de la richesse, de la variété et de l'ambiguïté existant dans le monde réel ou de notre compréhension ambiguë de celui-ci [104]. Néanmoins, il est possible d'énoncer certains principes qui distinguent les différentes étapes du processus de création de modèle lorsque le système peut être modélisé comme un programme linéaire.

Le problème de la programmation linéaire consiste à déterminer les valeurs des variables du système qui :

- Sont non négatives ou satisfont certaines limites,
- Satisfaire un système de contraintes linéaires, et

- Minimiser ou maximiser une forme linéaire dans les variables appelée objectif

Pour résoudre les problèmes d'optimisation linéaire, on fait appel à des techniques et algorithmes. Les problèmes à deux variables peuvent être résolus graphiquement en traçant les droites des relations contenues dans les contraintes et puis rechercher la solution optimale parmi l'ensemble des solutions réalisables trouvées, alors qu'il est difficile de résoudre des problèmes avec plus de deux variables par la méthode graphique. Il existe d'autres algorithmes pour résoudre des problèmes aussi complexes comme l'algorithme de Simplex et la méthode du point intérieur. Il existe aussi des logiciels dédiés à la résolution des problèmes d'optimisation linéaire comme Lindo, Gurobi, CPLEX, etc.

### **III.4. Techniques de résolution des problèmes d'optimisation linéaire**

Plusieurs méthodes de résolution des problèmes généraux d'optimisation linéaire sont proposées. Une première possibilité consiste à utiliser les résultats de la dualité pour transformer le problème. Le but est de générer un problème transformé ayant une structure plus favorable, en particulier avec moins de lignes dans la matrice de contraintes. Un autre type de transformation pouvant être utilisé est connu sous le nom de décomposition, dans lequel un problème structuré de grande taille est décomposé en un problème maître plus simple, défini en termes de plusieurs sous-problèmes plus petits. Le but est de résoudre une série de problèmes plus petits de manière à déterminer la solution du gros problème initial. Une technique différente, appelée programmation paramétrique, consiste à trouver la solution d'un problème de PL qui est une perturbation d'un autre problème pour lequel la solution est disponible.

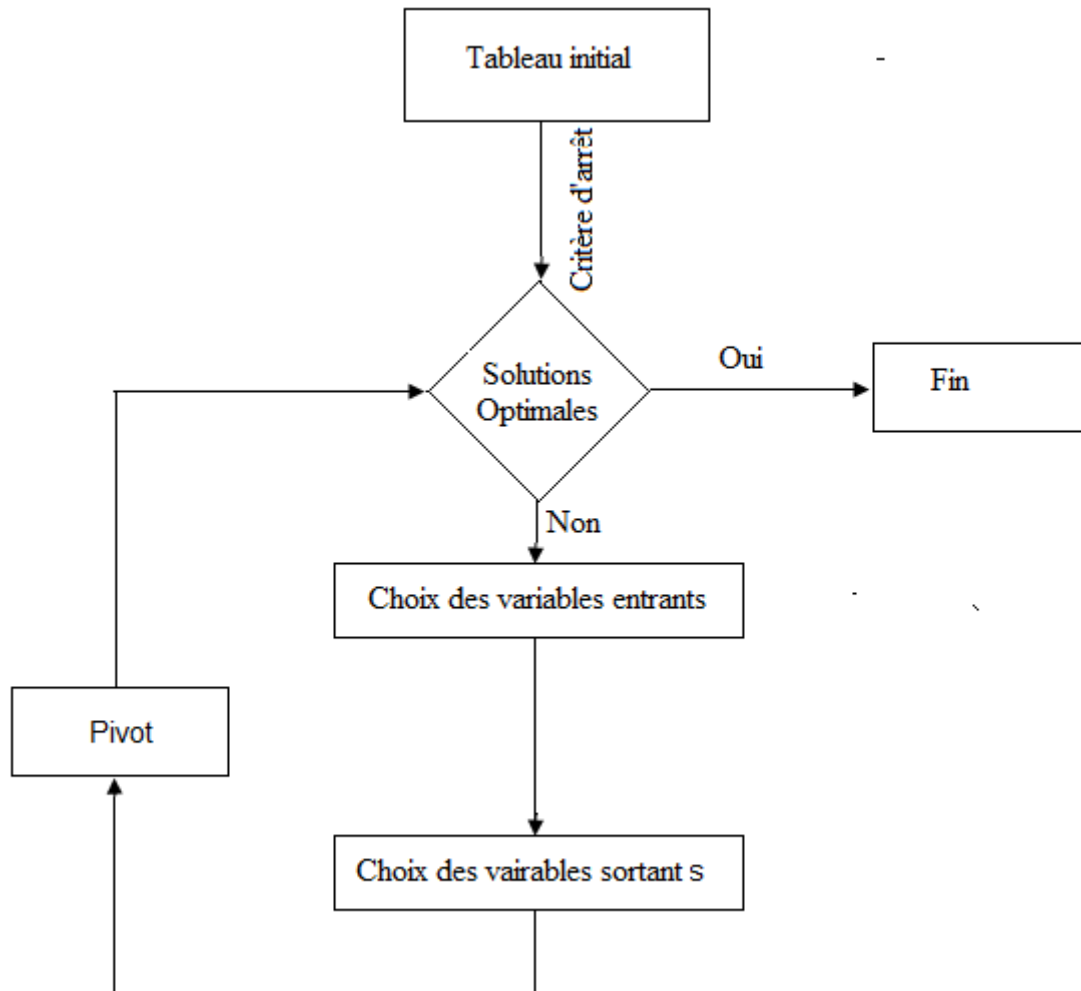
La méthode la plus ancienne pour résoudre ce problème est la méthode de Simplex, qui tente de manière systématique différents ensembles de possibilités. Cette méthode est décrite à la section III.4.1 et est encore prédominante à nos jours, bien que souvent sous des formes plus sophistiquées.

#### **III.4.1. L'algorithme de Simplex**

L'algorithme de Simplex a été proposé par George Dantzing en 1947 [104-108], il fonctionne essentiellement de la manière suivante [104, 106]: pour un problème d'optimisation linéaire donné, il suppose que tous les points extrêmes sont connus. Si les points extrêmes ne sont pas connus, la première étape consiste à déterminer ces points extrêmes ou à vérifier s'il existe des solutions réalisables. Avec les points extrêmes connus, il est facile de tester si un point extrême est optimal en utilisant la relation algébrique et la fonction objectif. Si le test d'optimalité n'est pas réussi, passez ensuite à un point extrême adjacent pour effectuer le même

test. Ce processus s'arrête lorsqu'un point extrême optimal soit trouvé ou si le cas sans limite se produise.

L'organigramme de l'algorithme de simplex est présenté à la figure suivante :



**Figure III-1 : Organigramme de l'algorithme de Simplex**

### III.5. État de l'art sur l'utilisation de l'optimisation linéaire dans les SHERs

La programmation linéaire a été largement utilisée dans la littérature, dans le domaine des énergies renouvelables, pour résoudre les problèmes de conception, de planification, de contrôle, etc. Une synthèse bibliographique de l'utilisation de la programmation linéaire dans les différents axes est établie ci-après.

Une approche basée sur la programmation linéaire a été proposée par Ramakumar et al. [109, 110], pour concevoir un système intégré à énergie renouvelable, qui impliquait l'identification de diverses ressources nécessaires au dimensionnement des périphériques. Les

fonctions objectif de l'optimisation étaient de minimiser le coût total annuel par an, soumis à des contraintes énergétiques. Chedid et Saliba [111] ont employé une technique d'optimisation linéaire afin de minimiser le coût de production d'électricité tout en satisfaisant une alimentation fiable, ainsi que de surveiller et de contrôler le fonctionnement du système d'énergie hybride autonome. Chen et Atta-konadu [112] ont développé un modèle de programmation linéaire pour la conception de systèmes énergétiques dans des régions éloignées. Le système énergétique considéré comporte deux ou trois composants de base ; une unité photovoltaïque, un générateur diesel et une unité de batteries de stockage. L'objectif était de déterminer les capacités optimales des composants du système qui minimiseront le coût global tout en satisfaisant les besoins énergétiques anticipés. Dans le travail présenté par Kaushika et al. [113] Des systèmes solaires photovoltaïques autonomes avec des générateurs interconnectés ont été étudiés pour optimiser le dimensionnement de l'ensemble et du groupe de batteries. L'approche utilisée est la modélisation de la simulation du système, qui prend en compte la production d'électricité dans l'ensemble et son stockage dans le groupe de batteries servant la demande fluctuante. La probabilité de perte d'alimentation (LPSP) est utilisée pour évoquer le risque de ne pas satisfaire la demande de charge. Le schéma de calcul fait appel aux techniques de programmation linéaire et a pour objectif de déterminer la combinaison optimale du nombre de batteries et de modules PV, ce qui pourrait permettre le fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome sans risque de ne pas satisfaire la demande de charge. La recherche conduite par Gupta et al. [114] présente les résultats d'un modèle d'optimisation linéaire d'un système d'énergie hybride composé d'une région éloignée. Le modèle a été développé dans le but de minimiser la fonction coût en fonction de la demande et des contraintes potentielles. Hugo et al. [115], ont proposé une optimisation linéaire en nombre entier mixte afin d'optimiser le fonctionnement des sources d'énergie hybrides renouvelables. Ils ont appliqué la méthode d'optimisation de la planification proposée pour différentes unités de sources d'énergie renouvelables à l'Université de technologie et d'économie de Budapest. Un modèle intégré à énergie renouvelable a été mis au point par Kanase-Patile et al. [116], pour produire de l'électricité en tant que produit final, qui peut être utilisé dans les secteurs industriels domestiques, agricoles, communautaires et ruraux à petite échelle. Ce modèle est basé sur une approche de programmation linéaire. Le modèle développé minimise le COE total des différents systèmes tout en tenant compte de la fiabilité du système, qui est représentée par le rapport d'indice d'énergie (EIR) avec une perte minimale d'énergie attendue non fournie (EENS : de l'anglais Expected Energy Not Supplied) pour le système considéré. Nagabhushana et al. [117] ont présenté une analyse économique et ont étudié l'application des systèmes autonomes

hybrides éolien / photovoltaïque de production d'énergie. La programmation linéaire est utilisée pour calculer la taille des composants d'un système hybride qui minimise la valeur actuelle des coûts d'investissement et de fonctionnement. Jebaraj et al. [118] ont formulé un problème d'optimisation linéaire en nombres entiers mixtes pour satisfaire la demande en électricité avec des dépenses minimales. Ils ont mis en place un système décisionnel multicritères qui permet aux investisseurs et aux agences gouvernementales d'investir de manière appropriée dans les sources d'énergie renouvelables. Huneke et al. [119] ont développé un modèle général de système énergétique hybride hors réseau, qui peut être ajusté en fonction des conditions réelles afin d'optimiser de manière économique et écologique les systèmes énergétiques hors réseau. En utilisant des méthodes de programmation linéaire dans l'environnement GAMS (General Algebraic Modeling System), la configuration optimale du système d'alimentation électrique suit les restrictions caractéristiques, ainsi que les données horaires de la météo et de la demande. À partir de ce modèle, un mélange optimal de générateurs d'énergie solaire et éolien, associé à des dispositifs de stockage et à un groupe électrogène diesel est formé. Kimura et al. [120] ont formulé le problème d'optimisation linéaire pour les systèmes d'alimentation hybrides à grande capacité en utilisant des réseaux de neurones récurrents. Ils ont optimisé le système connecté au réseau comprenant l'énergie éolienne et solaire pour la fonction objectif de minimisation de l'énergie électrique fournie par le réseau électrique. Un modèle générique d'optimisation mathématique pour la conception de systèmes d'alimentation hybrides a été présenté par Lee et al. [34]. Le modèle prend en compte les pertes de puissance lors de l'allocation de l'énergie générée à partir d'énergies renouvelables aux charges d'appareils, et est formulé sous la forme d'un programme linéaire basé sur une superstructure incluant toutes les options d'allocation de puissance possibles dans un SHP typique. Un système intelligent d'énergie renouvelable hybride est optimisé à l'aide de l'algorithme de programmation linéaire dans l'étude présenté par Wang et al. [121] afin de répondre aux besoins électriques d'une communauté sur une période hebdomadaire de 90 jours. Le modèle prend en compte les marchés thermique et électrique dans une grande communauté. Malheiro et al. [122] ont proposé un système hybride composé d'énergie solaire, éolienne et de batteries pour un emplacement au Portugal. Le dimensionnement optimal des composants est obtenu avec MILP afin de minimiser le LCOE. Lauinger et al. [123] ont développé un outil d'aide à la décision sous la forme d'un programme linéaire pour déterminer les décisions optimales d'investissement et de fonctionnement pour les systèmes d'énergie résidentiels. Torreglosa et al. [124] ont présenté un système de gestion de l'énergie pour des systèmes hybrides composé d'une combinaison de sources renouvelables, avec le support de différents dispositifs de stockage (batterie et système à hydrogène), qui

permet son fonctionnement sans nécessiter de connexion réseau. Une analyse économique pouvant influencer sur la décision de choisir la source d'énergie ou le dispositif de stockage a été réalisée. La programmation linéaire a été utilisée pour atteindre l'objectif de minimisation de la valeur actuelle nette du coût de fonctionnement du SH pendant toute sa durée de vie. Bhandari et al. fournit dans [125] une procédure d'optimisation détaillée basée sur la programmation linéaire; afin de minimiser les coûts de fonctionnement en utilisant le potentiel maximal de REPS et en tenant compte des fluctuations mensuelles de la production et de la demande en électricité. Des systèmes hybrides comprenant des systèmes hydroélectriques, photovoltaïques et éoliens ont été pris en compte pour l'optimisation. Bordin et al. [126] ont présenté une approche de programmation linéaire permettant d'analyser la dégradation de la batterie et de l'optimiser pour les systèmes d'alimentation hors réseau avec intégration de l'énergie solaire. La principale contribution de cette étude était de développer une méthode pour inclure les processus de dégradation de la batterie dans les modèles d'optimisation. Szykowski et al. [127] ont utilisé une technique de programmation linéaire en nombres entiers pour montrer comment sélectionner la structure et les paramètres d'alimentation des locaux résidentiels, en tenant compte des caractéristiques de consommation d'électricité et de chaleur et des conditions météorologiques qui influent à la fois sur la consommation d'énergie et sur la production d'énergie renouvelable. La méthode proposée repose sur la minimisation à la fois des coûts d'investissement et des coûts de fonctionnement d'une structure de fourniture d'énergie dans des locaux résidentiels, les paramètres du système énergétique étant représentés par les variables recherchées du processus d'optimisation.

La technique d'optimisation linéaire est considérée comme une approche efficace pour concevoir et optimiser les systèmes hybrides d'énergie. Elle est facile à formuler et sa performance est efficace lors de la recherche de l'optimum global.

### **III.6. Formulation d'un problème d'optimisation linéaire pour le dimensionnement d'un système hybride PV/éolien**

Le problème de la répartition optimale des SHERs autonomes peut être considéré comme suit :

Considérons les SERs suivants : des panneaux solaires photovoltaïques et des éoliennes.  $E_{PV}$  et  $E_W$  sont les quantités d'énergie converties par un panneau photovoltaïque et une éolienne.  $N_{PV}$  et  $N_W$  correspondent au nombre de panneaux PV et d'éoliennes avec des coûts unitaires de

$C_{PV}$  et  $C_W$ , respectivement. Les énergies PV et éolienne peuvent être converties avec des limites  $L_{PV}$  et  $L_W$ . Ce système est utilisé pour satisfaire la demande  $D$  des consommateurs.

Si le problème de disponibilité de la surface totale  $S$  requise par le système hybride complet se pose, où  $S_{PV}$  et  $S_W$  sont les surfaces occupées par les générateurs photovoltaïques et éoliens. La surface des composants du système ne peut pas dépasser un certain pourcentage de la surface totale réservée.

Les coûts unitaires sont considérés comme le coût du cycle de vie ( $LCC$ ) d'une unité de chacun des composants du système hybride initial. Le  $LCC$  pour un composant ( $i$ ) est défini comme la somme du coût en capital ( $CC$ ), du coût de remplacement ( $RC$ ) et des coûts d'exploitation et de maintenance ( $O \& M$ ) de ce composant. Ainsi, le  $LCC$  peut être calculé en utilisant la formule suivante :

$$LCC = C_{PV} + C_W \quad (\text{III-6})$$

Avec

$$C_i = \sum_{i=1}^n (CC_i + RC_i + O\&M_i) \quad (\text{III-7})$$

Par conséquent, le problème d'optimisation peut être formulé comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } C = C_{PV}N_{PV} + C_WN_W \\ \text{SC:} \\ E_{PV}N_{PV} + E_WN_W \geq D \\ S_{PV}N_{PV} + S_WN_W \leq S \\ N_{PV} \geq 0, N_W \geq 0 \\ N_i \text{ Integer} \end{array} \right. \quad (\text{III-8})$$

La programmation linéaire basée sur l'algorithme de simplex est utilisée pour résoudre le problème d'optimisation. L'objectif est de minimiser le  $LCC$ . Deux applications de cette méthode, dédiées au pompage d'eau pour l'irrigation des agricultures, sont illustrées et discutées dans les prochains chapitres.

### III.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des notions sur l'optimisation. Ensuite, nous avons donné quelques généralités sur l'optimisation linéaire, suivi d'une présentation de l'algorithme de Simplex. Puis, nous avons présenté la formulation mathématique d'un problème d'optimisation linéaire pour le dimensionnement d'un système hybride PV/éolien. A la fin de ce chapitre nous avons présenté un état de l'art concernant l'utilisation de l'optimisation linéaire dans les SHERs. Dans le chapitre qui suit, nous présenterons une étude comparative focalisant sur l'efficacité économique de l'utilisation des systèmes distribués pur l'irrigation des plantes.

---

**INVESTIGATION SUR L'UTILISATION D'UN SER  
CENTRAL PAR RAPPORT AUX SYSTEMES  
DISTRIBUEES POUR L'IRRIGATION DES  
CULTURES**

**CHAPITRE**

**IV**

---

Sommaire

CHAPITRE IV. INVESTIGATION SUR L'UTILISATION D'UN SER CENTRAL PAR RAPPORT AUX SYSTEMES DISTRIBUEES POUR L'IRRIGATION DES CULTURES.....	82
IV.1. Introduction.....	83
IV.2. Etat de l'art.....	83
IV.3. Méthodologie.....	86
IV.3.1. Système PV.....	87
IV.3.2. Turbine éolienne.....	87
IV.3.3. Besoin journalier en eau pour les cultures.....	89
IV.3.4. Énergie requise.....	90
IV.3.5. Formulation du problème.....	91
IV.4. Résultats and discussion.....	94
IV.5. Conclusion.....	101

## IV.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à une étude comparative de l'utilisation de systèmes d'énergie à 100% renouvelables dans les déserts et les régions isolées, portant à la fois sur une unité centrale unique et des unités distribuées. Un SHER initial composé d'un générateur photovoltaïque (PV) et d'une éolienne est utilisé pour alimenter une zone agricole de 4 *ha* une fois avec une unité centrale, puis avec quatre unités réparties. La sélection de la taille optimale est réalisée par le biais d'une programmation linéaire basée sur l'algorithme du simplexe afin de minimiser le coût total du cycle de vie. Les résultats montrent pour la première fois que l'utilisation d'un système d'énergie renouvelable distribué contenant un générateur photovoltaïque complet est rentable par rapport à une unité centrale.

## IV.2. Etat de l'art

La demande en systèmes d'énergie renouvelable (SER) augmente pour les applications à distance et connectées au réseau, en tant qu'alternative aux sources d'énergie fossiles, qui ont des impacts négatifs sur l'environnement. En raison du caractère intermittent des sources d'énergie renouvelables, une seule source peut être mal dimensionnée pour un système donné. Pour surmonter cet inconvénient, les systèmes multi-sources sont largement utilisés. Les SERs peuvent être utilisés en mode autonome ou peuvent être connectés au réseau, dans de nombreuses applications telles que les bâtiments [128, 129], les transports [130], le stockage d'énergie [131], dessalement [132], pompage d'eau et irrigation des cultures [133]. La littérature cite de nombreuses études axées sur l'utilisation des SERs pour le pompage de l'eau et l'irrigation des cultures.

Yahyaoui et al. [133] ont proposé une approche visant à dimensionner un système photovoltaïque (PV) alimentant une station de pompage d'eau. Les auteurs ont envisagé un générateur photovoltaïque central et un groupe de batteries de secours pour irriguer 10 *ha* de tomates et remplir un réservoir d'eau garantissant 10.22 et 5.62 jours d'autonomie en mai et juillet, respectivement. L'approche proposée a permis aux auteurs de déterminer la surface optimale des modules PV et la capacité optimale du groupe de batteries et du réservoir de stockage d'eau. Bakelli et al. [134] ont proposé un modèle d'optimisation d'un système de

pompage d'eau PV (PVWP) avec un réservoir de stockage d'eau. L'unité photovoltaïque centrale était supposée fonctionner avec une charge constante (6 m<sup>3</sup> d'eau requis par jour) ; l'impact de la probabilité de perte d'alimentation (LPSP) et l'impact de différentes configurations sur le coût du cycle de vie (LCC) ont été analysés. Hamidat [135] a présenté l'impact de la taille du générateur photovoltaïque et de la hauteur manométrique sur les performances électriques et hydrauliques d'une pompe centrifuge de surface. Le système PV proposé a également été utilisé comme centrale unique et testé dans deux localités dans des conditions sahariennes. La faisabilité économique du pompage et du dessalement à l'énergie solaire en agriculture a été étudiée par Jones et al. [136], qui ont développé un modèle qui fonctionne à vitesse variable sans stockage d'énergie. Reza et al. [137] ont proposé un autre système photovoltaïque central pour l'irrigation des serres en Espagne. Le système proposé devait permettre d'alimenter un système d'irrigation goutte à goutte avec 8720 Wh/ha/jour. Un modèle de simulation a été développé pour analyser la faisabilité du système et trouver la taille optimale. Campana et al. [138] ont étudié les aspects économiques des systèmes PVWP, en prenant en compte les effets des composants clés sur le coût capital initial (CCI), le LCC et les revenus. Deveci et al. [139] ont utilisé un système solaire photovoltaïque central composé de deux panneaux de 10 W générant 132 Wh / jour, 12 VDC pour alimenter l'irrigation d'une culture de 1000 arbres sur 1000 m<sup>2</sup>. Kumar et al. [140] ont utilisé un système photovoltaïque central pour tester un système d'irrigation goutte à goutte alimenté par gravité sur une petite surface de terrain (108 m<sup>2</sup>). Campana et al. [141] ont étudié la distribution géospatiale des prairies afin de mettre en œuvre des systèmes PVWP. Ils ont utilisé un modèle d'optimisation spatialement explicite des sources d'énergie renouvelables basé sur la minimisation des coûts pour déterminer l'emplacement optimal. Campana et al. [142] ont utilisé des algorithmes génétiques (GA) pour trouver la taille optimale des systèmes PVWP pour l'irrigation, dans le but de maximiser le profit annuel. Le système envisagé pour l'optimisation dans ce travail était supposé fonctionner comme une seule unité. Rehman et Sahin [143] ont étudié la possibilité d'utiliser un système hybride photovoltaïque / éolien avec batterie de secours pour pomper de l'eau dans cinq sites isolés d'Arabie saoudite. L'énergie convertie par les composants du système d'énergie est collectée dans un bus à courant continu, convertie en un bus à courant alternatif, puis utilisée pour alimenter le système de pompage.

Tous les travaux cités ci-dessus traitent le problème de l'irrigation des cultures en utilisant une centrale unique d'énergie renouvelable, utilisant dans la plupart des cas des

systèmes énergétiques à une seule source. Il est important de mentionner que l'utilisation des systèmes énergétiques en tant que bloc unique présente certains inconvénients et peut créer de graves problèmes pour l'utilisateur. Une perte d'alimentation totale ou partielle peut survenir si le système de câblage est endommagé ou si différents types de défauts se produisent dans les systèmes de conversion d'énergie, en plus des effets totaux ou partiels des conditions météorologiques. Un autre inconvénient est la surface occupée par les composants du système, qui est un facteur important lors de la conversion de la puissance requise. Malheureusement, cette surface peut être très grande et occupe une portion considérable de la surface à cultiver.

La production décentralisée désigne la production d'énergie électrique proche des points de consommation. Selon l'Institut de recherche sur l'énergie électrique (EPRI), la production généralisée est inférieure à 50 MW [144, 145]. Des unités décentralisées dans les domaines environnemental, technique et économique peuvent apporter d'énormes avantages [146, 147].

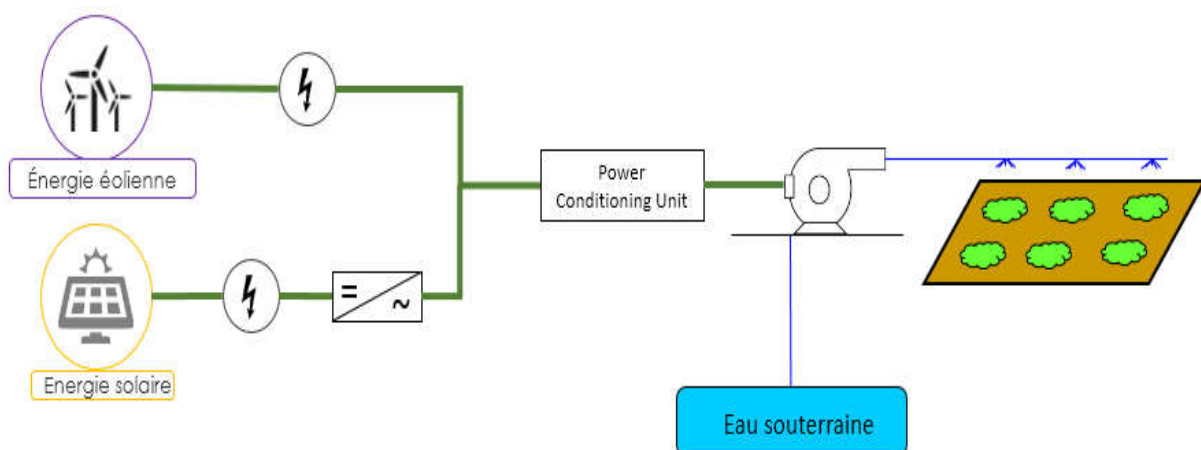
Les systèmes distribués ont été largement discutés auparavant. Quansah et al. [148] ont réalisé une évaluation économique d'un système photovoltaïque installé au Ghana. Ils ont utilisé le concept de parité réseau (grid parity) pour comparer le coût de l'électricité normalisé (LCOE) du système photovoltaïque au prix de détail de l'électricité. Les résultats ont montré que les consommateurs ont besoin d'un soutien à l'investissement pour atteindre la parité pour un coût installé et un coût LCOE donnés. Flores et al. [129] ont proposé un modèle qui sélectionne les technologies de production d'électricité (basé sur des sources renouvelables locales) pour un système distribué tout en minimisant le LCOE et a mené une étude de cas dans le secteur résidentiel rural hondurien. Les auteurs ont appliqué l'étude à trois cas (hors réseau, mini-réseau et réseau connecté) en fonction de la capacité de production. Ils ont proposé un modèle de programmation non linéaire pour estimer le LCOE, la fraction d'électricité partagée pour chaque technologie et la taille avec la capacité de puissance requise pour satisfaire la charge. Mohanty et Modi [149] ont étudié l'effet de l'insertion d'une unité décentralisée sur le profil de tension et les pertes de ligne d'un système de distribution d'énergie. Les auteurs ont réalisé une évaluation financière pour examiner la viabilité de la mise en œuvre. Cette étude a montré une amélioration du profil de tension et une réduction des pertes, et par conséquent des avantages financiers peuvent être obtenus par le service public.

D'après l'étude bibliographique, nous avons constatés que la faisabilité économique de l'utilisation des unités décentralisées basées sur les énergies renouvelables par rapport à une unité centrale en mode isolé appliquée à l'irrigation n'a pas été présentée dans aucun autre travail.

La principale contribution de cette étude est de mettre en lumière la faisabilité d'alimenter les systèmes d'irrigation en utilisant des sources d'énergies renouvelables distribuées autonomes, chaque sous-système étant chargé d'alimenter une partie de la charge au lieu d'utiliser un seul système central. Nous présentons une application illustrative de l'étude développée pour la région de Skikda (latitude : 36,8762, longitude : 6,90921) en Algérie. L'analyse de faisabilité est effectuée en premier, en recherchant la taille optimale des systèmes. Ensuite, une comparaison économique est effectuée sur la base du *LCC* de chaque système.

### IV.3. Méthodologie

Typiquement, un système de pompage à énergie renouvelable utilisé pour l'irrigation est composé d'un SER associé au système de conditionnement d'énergie, au système de pompage et au système d'irrigation associés. Dans cette étude, le SER est initialement composé d'un générateur photovoltaïque et d'un générateur éolien destinés à alimenter une pompe à eau centrifuge à courant alternatif pour l'irrigation directe. La structure du système est illustrée à la IV.1.



**Figure IV-1: Schéma global du système proposé**

La zone irriguée de 4 ha a été divisée en quatre parties égales. Les tomates sont utilisées dans les quatre parcelles en raison de la saison et pour simplifier la comparaison. La période d'irrigation allait de mai à octobre.

Les différents paramètres introduits dans le problème d'optimisation ainsi que la formulation du problème sont présentés dans cette section.

### IV.3.1. Système PV

Les panneaux photovoltaïques sont constitués de plusieurs cellules distinctes connectées en série ou en parallèle, ou en un mélange des deux. Ils convertissent les rayons du soleil en électricité via l'effet PV. L'énergie convertie par un panneau photovoltaïque sur une période donnée dépend d'un ensemble de facteurs. Les principaux facteurs sont la surface des panneaux, leur puissance crête et l'irradiation influencée par l'emplacement, la saison, l'ensoleillement et les conditions météorologiques. L'énergie convertie par un panneau photovoltaïque peut être estimée à l'aide de la formule suivante :

$$E_{ph} = P_r \cdot F_0 \cdot \left( \frac{G_{eff}}{G_0} \right) \cdot P_C \quad (IV-1)$$

Avec :

$P_r$  : Rapport de performance (valeur moyenne 0,72 ou 0,75, avec 0,75 pour une orientation optimale du panneau);

$F_0$  : Facteur qui prend en compte les pertes ;

$G_{eff}$  : Eclairement énergétique annuel effectif incident (W/m<sup>2</sup>) ;

$G_0$  : Eclairement énergétique dans des conditions standard (1000 W/m<sup>2</sup>) ;

$P_C$  : Puissance nominale dans les conditions standard fournies par le fabricant (W).

Les modules PV utilisés dans cette étude sont en silicium polycristallin avec une puissance maximale d'environ 235 W. Une unité PV peut convertir 470 kWh / an. L'énergie convertie par un panneau photovoltaïque pendant la période d'irrigation est estimée à 235 kWh.

### IV.3.2. Turbine éolienne

Une éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique au moyen d'un générateur électrique. La puissance convertie par une éolienne dépend de l'interaction entre son rotor et le vent. La puissance disponible dans le vent est donnée par :

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 \quad (IV-2)$$

et le puissance extractible peut être écrit comme:

$$P_{Rotor} = \frac{1}{2} C_p \rho A V_w^3 \quad (IV-3)$$

Où :

$\rho$  : masse volumique de l'air ( $\text{kg/m}^3$ ) ;

A : surface balayée par les pâles de la turbine ( $\text{m}^2$ );

$V_w$  : vitesse du vent (m/s);

$C_p$  : coefficient de puissance du rotor, défini comme le rapport entre la puissance extractible et la puissance disponible. Betz [63] a prouvé que  $C_p = 0,5926$  dans des conditions idéales.

La hauteur de l'éolienne peut améliorer les performances de l'éolienne en augmentant la vitesse du vent selon l'expression suivante :

$$V = V_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha \quad (IV-4)$$

Avec :

$h$  : hauteur du mât (m);

$h_0$  : hauteur de référence (10 m);

$V$  : vitesse du vent (m/s) à la hauteur  $h$  du mât,

$V_0$  : vitesse du vent (m/s) à la hauteur de référence  $h_0$ ;

$\alpha$  : exposant de la loi de puissance (pris comme 1/7).

La vitesse moyenne du vent pendant la période d'irrigation est égale à 4,41 m / s.

En utilisant l'équation IV.3, la puissance convertie par l'éolienne s'avère être égale à 73 W pour une pale de 1,5 m de longueur, et  $C_p = 0,2$ . En supposant une période de fonctionnement continu de 1000 h, l'énergie convertie est estimée à 73 kWh.

### IV.3.3. Besoin journalier en eau pour les cultures

Les besoins en eau d'irrigation (IWR) sont définis comme la différence entre les besoins en eau des cultures (CWR) et la précipitation effective ( $P_{ef}$ ), augmentés d'une quantité d'eau pour la lixiviation des sels et la compensation de la non uniformité de l'application de l'eau [150]. L'irrigation régulière des cultures est importante à certains stades de leur cycle de vie [151]. Le volume d'eau nécessaire à l'irrigation dépend de nombreux facteurs, tels que le sol, le type de culture et les conditions météorologiques. Elle peut être estimée en calculant les précipitations effectives, l'évapotranspiration de référence ( $ET_0$ ) et l'évapotranspiration en conditions standard ( $ET_C$ ) [79, 80]. Dans cette étude, la demande en eau des cultures est calculée à l'aide de l'équation de la FAO Penman – Monteith [150]. Le  $ET_0$  est donné par la formule :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(G_n - D) + \gamma \frac{900}{T + 273} V_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34V_2)} \quad (IV-5)$$

Avec :

$ET_0$  : évapotranspiration quotidienne de référence (mm/jour) ;

$\Delta$  : pente de la courbe de pression de vapeur (kPa/°C) ;

$G_n$  : rayonnement net à la surface de la culture (MJ/m<sup>2</sup>·day) ;

$D$  : densité de flux de chaleur du sol (MJ/m<sup>2</sup>·day) ;

$\gamma$  : constante psychrométrique (kPa/°C) ;

$T$  : température quotidienne moyenne de l'air à une hauteur de 2 m (°C) ;

$V_2$  : vitesse moyenne du vent à 2 m de hauteur (m/s) ;

$e_s$  : pression de saturation de vapeur (kPa) ; et  $e_a$  est la pression de vapeur réelle (kPa).

L' $ET_C$  est calculé à partir de la relation du coefficient de culture  $K_C$ , comme suit :

$$K_C = \frac{ET_C}{ET_0} \quad (IV-6)$$

Le CWR et l'IWR sont calculés en utilisant les équations IV.7 et IV.8 respectivement [79]:

$$CWR = ET_C - P_{ef} \quad (IV-7)$$

$$IWR = \frac{CWR}{\eta_{irr}(1-L_r)} \quad (IV-8)$$

Avec :

$\eta_{irr}$  : rendement du système d'irrigation, suppose être 80% ;

$L_r$  : exigences de lixiviation des sels.

#### IV.3.4. Énergie requise

L'énergie hydraulique requise dépend des besoins quotidiens en eau et de la charge hydraulique. L'énergie requise peut être calculée à l'aide de la relation suivante :

$$E_h = \frac{g \cdot \rho \cdot V \cdot h}{3600} \quad (IV-9)$$

Où :

$E_h$  : énergie hydraulique requise quotidiennement (Wh/jour) ;

$g$  : l'accélération de la pesanteur ;

$\rho$  : la densité de l'eau (1000 kg/m<sup>3</sup>) ;

$V$  : le volume d'eau requis par jour (m<sup>3</sup>) ;

$h$  : la hauteur manométrique totale (m).

La hauteur manométrique totale est calculée par :

$$h = h_s + h_{dd} + \delta \frac{Lv^2}{2gd} + \beta \frac{v^2}{2g} \quad (IV-10)$$

Avec :

$h_s$  : niveau statique ;

$h_{dd}$  : niveau dynamique (m) ;

$\delta$  : un coefficient lié au frottement du pipeline et dépendant du nombre de Reynolds ;

$\beta$  : un coefficient lié au type de composant [152, 153];

$L$  : longueur du pipeline (m) ;

$d$  : diamètre intérieur du pipe (m) ;

$g$  : accélération du pesanteur ( $m/s^2$ ) ;

$v$  : vitesse linéaire moyenne (m/s), liée au diamètre intérieur du tuyau et au débit d'eau comme ci-dessous :

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (IV-11)$$

L'énergie électrique équivalente est estimée à l'aide de la formule suivante :

$$E_{elec} = \frac{E_h}{\eta} \quad (IV-12)$$

Avec :  $E_{elec}$  est l'énergie électrique requise ; et  $\eta$  est le rendement du système motopompe.

#### IV.3.5. Formulation du problème

Le problème de la répartition optimale des SHERs autonomes peut être considéré comme suit :

Nous Considérons les SERs suivants : des panneaux solaires photovoltaïques et des éoliennes, avec :

- $E_{PV}$  et  $E_W$  sont les quantités d'énergie converties par un panneau photovoltaïque et une éolienne.
- $N_{PV}$  et  $N_W$  correspondent au nombre de panneaux PV et d'éoliennes avec des coûts unitaires de  $C_{PV}$  et  $C_W$ , respectivement.
- Les énergies PV et éolienne peuvent être converties avec des limites  $L_{PV}$  et  $L_W$ .
- Ce système est utilisé pour satisfaire la demande  $D$  des consommateurs.

Si le problème de disponibilité de la surface totale  $S$  requise par le système hybride complet se pose, pour une ou plusieurs des raisons susmentionnées, où  $S_{PV}$  et  $S_W$  sont la surface occupée par les générateurs photovoltaïques et éoliens. La surface des composants du système ne peut pas dépasser 10% de la surface cultivée.

Les coûts unitaires sont considérés comme le coût du cycle de vie (*LCC*) d'une unité de chacun des composants du système hybride initial. Le *LCC* pour un composant (*i*) est défini comme la somme du coût en capital (*CC*), du coût de remplacement (*RC*) et des coûts d'exploitation et de maintenance (*O & M*) de ce composant. Ainsi, pour cette étude, il peut être calculé en utilisant la formule suivante :

$$LCC = C_{PV} + C_W \quad (IV-13)$$

Avec

$$C_i = \sum_{i=1}^n (CC_i + RC_i + O\&M_i) \quad (IV-14)$$

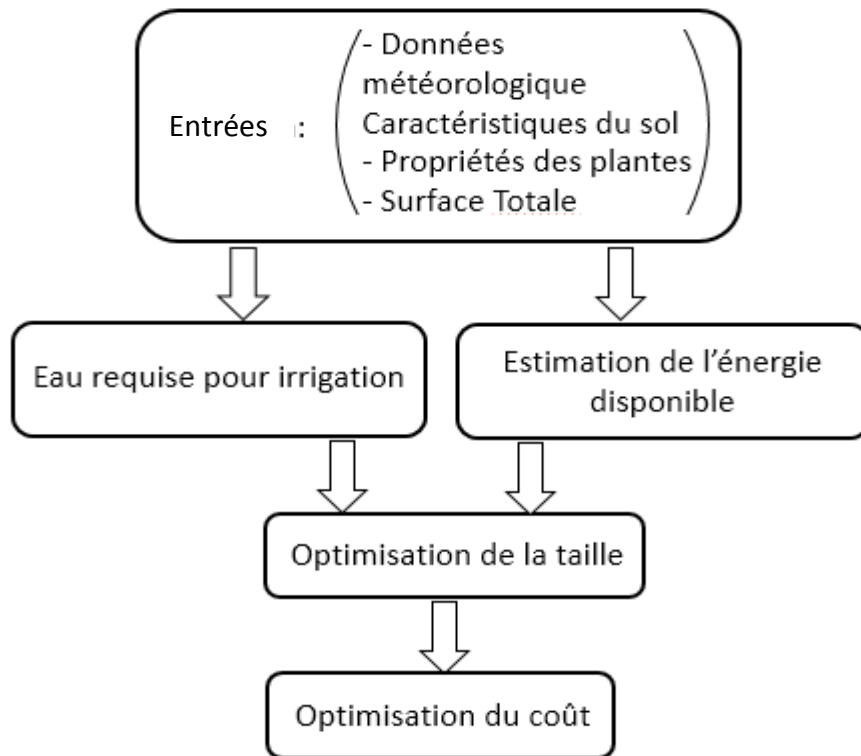
Par conséquent, le problème d'optimisation peut être formulé comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } C = C_{PV}N_{PV} + C_W N_W \\ \text{SC:} \\ E_{PV}N_{PV} + E_W N_W \geq D \\ S_{PV}N_{PV} + S_W N_W \leq S \\ N_{PV} \geq 0, N_W \geq 0 \\ N_i \text{ Integer} \end{array} \right. \quad (IV-15)$$

La programmation linéaire basée sur l'algorithme de simplex [154, 155] est utilisée pour résoudre le problème d'optimisation. L'objectif est de minimiser le *LCC*. Le problème d'optimisation est soumis aux contraintes suivantes :

- L'énergie totale convertie par le système doit répondre aux besoins de la culture ;
- Les variables de décision sont des entiers positifs ;
- La surface utilisable par le système énergétique ne peut excéder 10% de la surface à irriguer.

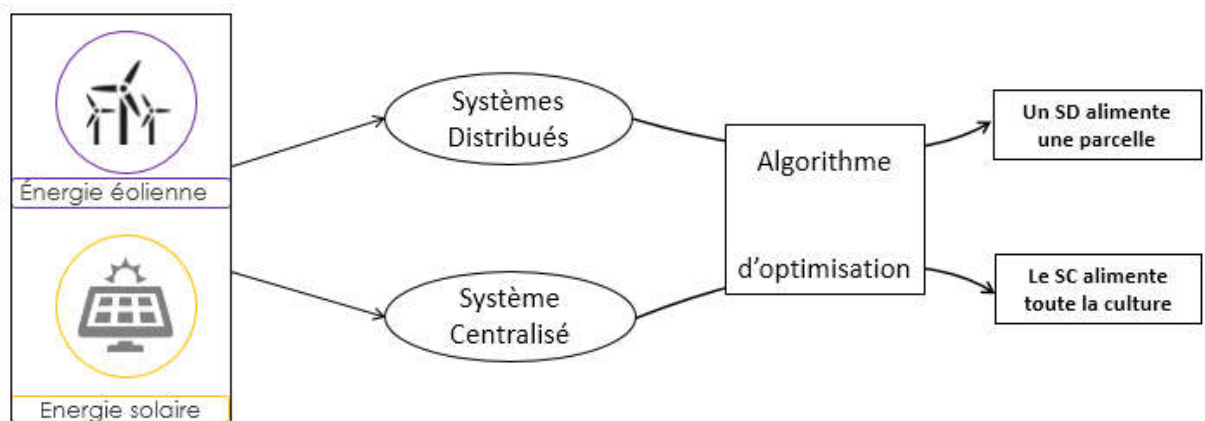
L'optimisation est effectuée sur la base des valeurs quotidiennes de l'eau d'irrigation simulée requise. La Figure IV-2 résume la méthodologie suivie pour optimiser le système.



**Figure IV-2: Schéma de l'algorithme d'optimisation**

Deux cas sont discutés et optimisés :

- a) Dans le premier cas, chaque parcelle est initialement alimentée par un système hybride PV- éolien distribué ;
- b) Dans le second cas, toutes les parcelles sont initialement alimentées par une unité centrale, comme indiqué à la figure IV.3



**Figure IV-3: Schéma d'optimisation du système distribué et de la centrale**

#### IV.4. Résultats and discussion

La période d'irrigation est caractérisée par de faibles précipitations et des valeurs d'irradiation plus élevées, tandis que la vitesse du vent est faible.

Il est bien connu que les précipitations dépendent de la localisation géographique. Le climat du nord algérien et de l'ensemble de la Méditerranée est caractérisé par un été chaud et sec. En effet, le Tableau IV-1 montre que les précipitations dans la zone choisie varient entre 38.5 et 69.8 mm entre mai et octobre, avec des précipitations minimales de 2.8 mm observées en juillet. Ces précipitations ne peuvent satisfaire les IWRs ; d'où la nécessité de compenser le déficit par l'irrigation.

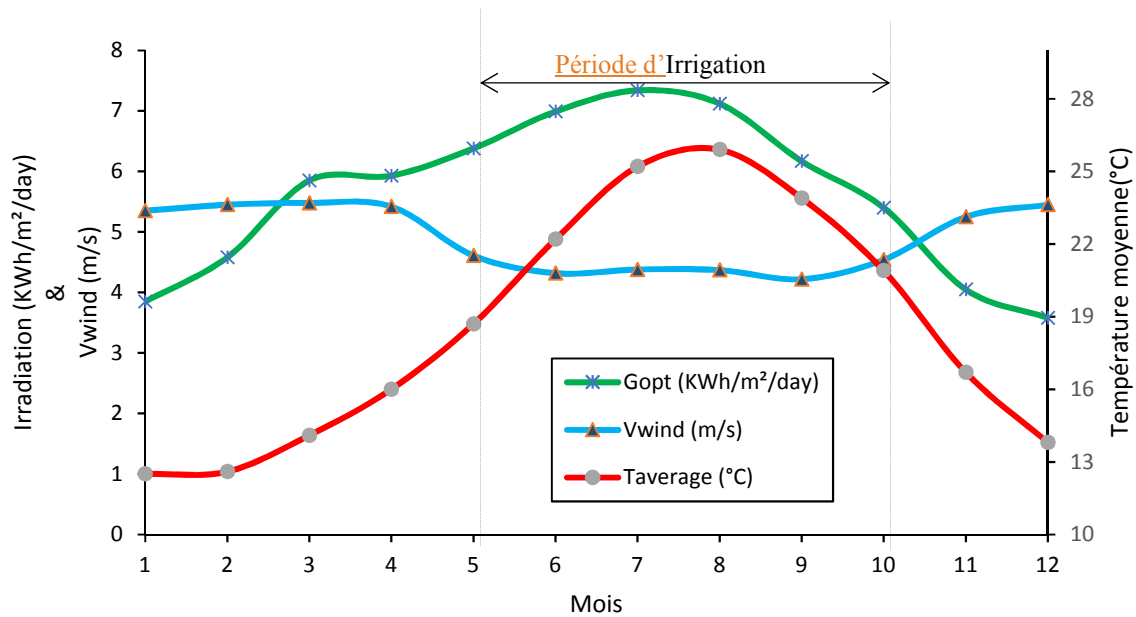
**Tableau IV-1. Moyennes mensuelles des précipitations durant la période d'irrigation**

	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
Précipitation moyenne mensuelle (en mm) (*)	38.5	15.5	2.8	10.1	47.7	69.8

(\*) Station de météo de Skikda

Les données de vitesse du vent et la température ambiante ont été obtenues du modèle de météorologie de surface et d'énergie solaire (SSE) de la NASA [77], tandis que les données d'irradiation ont été acquises du système d'information géographique photovoltaïque (PVGIS) [78]. Les données ont été consultées en se connectant sur les deux sites Web et en saisissant la latitude et la longitude de la zone étudiée. Une fois que l'emplacement a été saisi, le programme génère des données météorologiques mensuelles pour une période déterminée.

La Figure IV-4 montre la variation moyenne mensuelle de la vitesse moyenne du vent, de l'irradiation solaire sur une surface inclinée et de la température ambiante. Les valeurs de rayonnement ont été moyennées sur une base mensuelle pour une période de 20 ans (1985-2004). Les valeurs les plus élevées et les plus basses du rayonnement solaire moyen mensuel pour les mois de mai et octobre sont respectivement de 6.38 et 5.4 kWh/m<sup>2</sup>/jour, avec une irradiation maximale de 7.34 kWh/ m<sup>2</sup>/jour observée en juillet. Néanmoins, la région enregistre une petite variation dans la distribution du profil de vitesse du vent au cours de la période d'irrigation. La valeur moyenne de la vitesse du vent pour cette période est estimée à 4.4 m/s (pour une valeur moyenne sur 22 ans entre 1983 et 2005), comme le montre la Figure IV-4. La variation de la vitesse du vent et du rayonnement solaire montre une bonne complémentarité entre les systèmes photovoltaïques et éoliens. Cependant, pendant la période de culture, l'énergie convertie par le soleil via le générateur photovoltaïque est dominante.



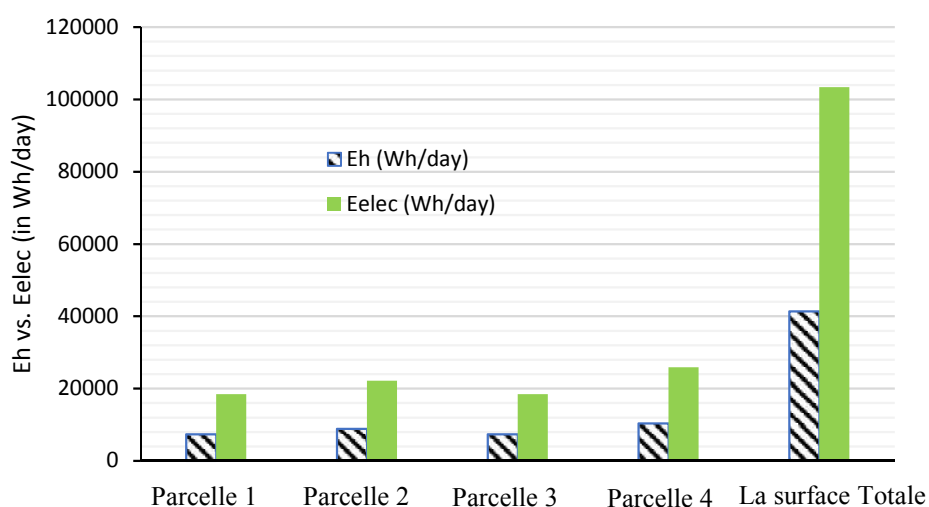
**Figure IV-4: Données météorologiques**

La hauteur manométrique totale ( $h$ ) fournie par la pompe et le volume quotidien maximum d'eau requis pour l'irrigation ( $IWR_{max}$ ) ont été calculés en fonction des équations IV.8 et IV.10 respectivement. Le tableau IV.2 montre l'évolution de ces deux derniers paramètres au cours de la période d'irrigation pour chaque parcelle. La variation de la hauteur totale est due aux pertes de charge dans le système d'irrigation, qui dépendent du nombre de coudes et de vannes dans le système ainsi que de la rugosité de l'intérieur du tuyau. Dans cette étude de cas, la longueur des tuyaux utilisés pour l'irrigation est supposée différer d'une parcelle à l'autre. De plus, le nombre de coudes et de vannes n'est pas le même. Par conséquent, la tête totale change d'une parcelle à l'autre.

**Tableau IV-2. La hauteur manométrique totale et l'IWR des plantes pour les 4 parcelle pendant la période d'irrigation (Mai à Octobre).**

	Parcelle 1	Parcelle 2	Parcelle 3	Parcelle 4	la surface Totale
Période d'irrigation	du 26/05 au 17/10 (144 jours)				
Besoin en eau max (m <sup>3</sup> /ha/jour)	54.2	54.2	54.2	54.2	216.8
Hauteur manométrique total (m)	50	60	50	70	70

Les valeurs maximales de l'énergie hydraulique quotidienne et de l'énergie électrique quotidienne correspondante requise par les différentes parties de la surface cultivée sont illustrées dans la figure IV.5.



**Figure IV-5 : Les énergies hydraulique et électrique requise**

L'énergie hydraulique requise ( $E_h$ ) dépend du volume d'eau nécessaire et de la hauteur totale (équation IV.13). Étant donné que la même culture est considérée dans cette étude pour les quatre parcelles, et comme les parcelles ont des surfaces égales, les besoins en énergie restent les mêmes pour toutes les parcelles (Figure IV-5). Par conséquent, seule la tête totale affecte les valeurs d'énergie.

L'énergie électrique correspondante qui doit être convertie par le système d'énergie hybride dépend du rendement de la motopompe, qui varie de manière dynamique. Cependant, dans un souci de simplicité, cet aspect n'est pas pris en compte dans ce travail. Ainsi, le rendement de la motopompe est supposé être de 40%.

Les coûts détaillés du système énergétique sont présentés dans le Tableau IV-3. Vu le manque d'informations sur les coûts locaux des systèmes photovoltaïques et éoliens, les données sur les coûts proviennent de [156]. Les coûts en capital par kWh sont supposés être de 342 et 749 \$ pour le système photovoltaïque et l'éolien, avec des coûts de remplacement de 300 \$ chacun. Les coûts de maintenance sont considérés comme 10 \$ pour le système PV et 30 \$ pour l'éolienne. Étant donné que la technologie des éoliennes est encore onéreuse comparée à la photovoltaïque, l'évolution de ces coûts ne peut affecter le résultat de cette étude.

**Tableau IV-3. Coûts détaillés du système hybride**

	System PV	Système éolien
Coût en capital (\$)	342	749
Coût de remplacement (\$)	300	300
Coût d'exploitation et de maintenance (\$)	10	30

Les tailles optimales de l'unité centrale et des quatre unités réparties sont illustrées au Tableau IV-4.

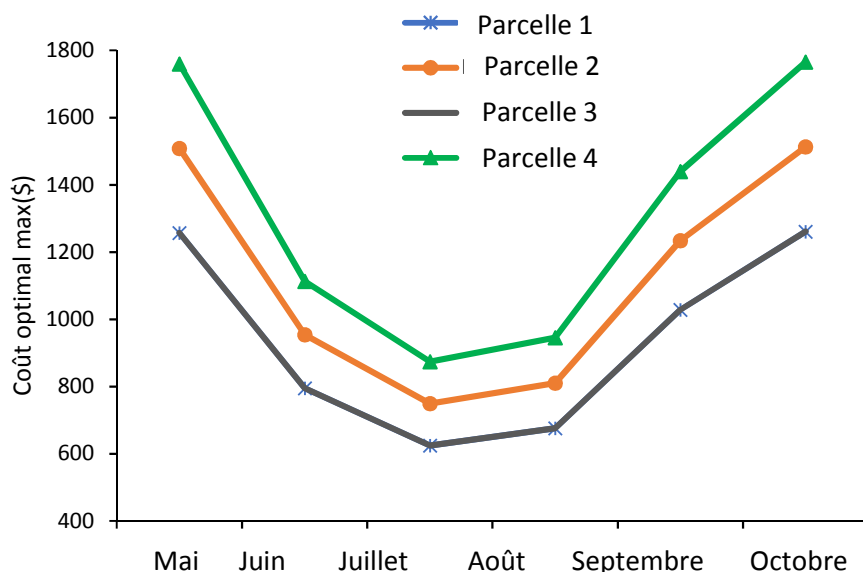
**Tableau IV-4: Les tailles optimales pour les différents systèmes**

	Mai		Juin		Juillet		Août		Septembre		Octobre	
	$N_{PV}$	$N_{wind}$	$N_{PV}$	$N_{wind}$	$N_{PV}$	$N_{wind}$	$N_{PV}$	$N_{wind}$	$N_{PV}$	$N_{wind}$	$N_{PV}$	$N_{wind}$
Parcelle 1	2	0	2	0	1	0	2	0	2	0	2	0
Parcelle 2	3	0	2	0	2	0	2	0	2	0	3	0
Parcelle 3	2	0	2	0	1	0	2	0	2	0	2	0
Parcelle 4	3	0	2	0	1	0	2	0	3	0	3	0
La surface totale	11	0	7	0	6	0	6	0	9	0	11	0

Les résultats présentés montrent que la configuration optimale conduit dans tous les cas à la configuration avec un générateur photovoltaïque complet. Cela est dû au fait que la vitesse du vent est trop faible pour la région au cours de la période de cette étude de cas, mais également à la différence de coûts entre les deux systèmes, car l'éolienne est plus chère que les panneaux solaires.

Les résultats optimaux concernant le coût total du système pour les quatre parcelles sont illustrés à la figure IV.6.

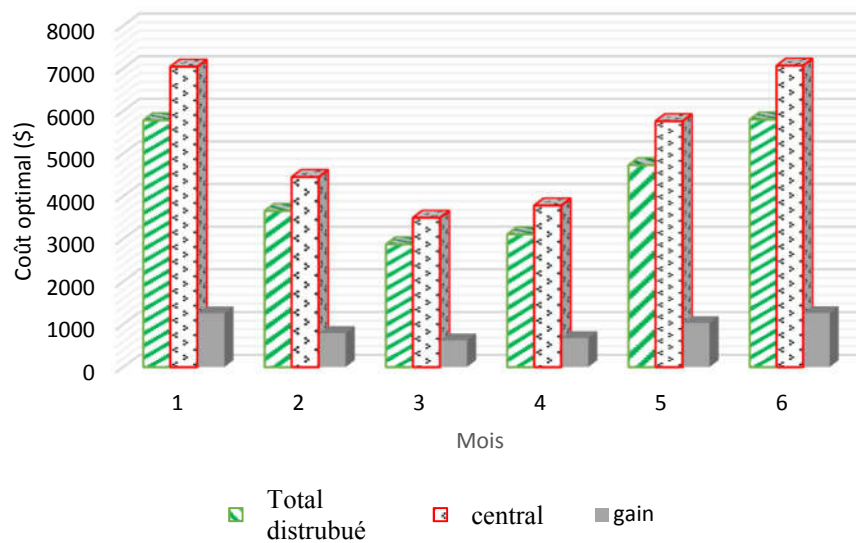
La variation du coût dépend des composants du système énergétique ; il est donc directement lié au volume d'eau d'irrigation nécessaire. Les courbes représentant les coûts des parcelles 1 et 3 sont superposées, car les deux parcelles ont les mêmes besoins en eau.



**Figure IV-6: les coûts de cycle de vie des 4 configurations distribuées**

Les systèmes ont leur coût maximal à la période initiale de la plante (mai) et à la période finale de culture (octobre), lorsque l'irradiation présente de faibles valeurs pendant la période de culture. Dans ces deux étapes, et puisque les précipitations ont des valeurs élevées, le système est surdimensionné.

Une comparaison entre le coût total des sources distribuées (DRES) utilisées pour l'alimentation des quatre parcelles et le coût de l'unité centrale est illustré sur la Figure IV-7.



**Figure IV-7: Comparaison du coût total de la vie optimale basée sur un système distribué et une unité centrale**

Selon la Figure IV-7, on peut observer que le coût des composants du système est dépendant et directement lié au IWR. Par conséquent, le coût est plus élevé lorsqu'il est utilisé en mode central et réduit lorsque les quatre parcelles sont alimentées séparément. Cela est dû à la hauteur manométrique totale. Le calcul du IWR est toujours effectué en utilisant une valeur unique de la hauteur totale, qui représente la valeur la plus grande (70 m dans le cas de l'unité centrale). Par conséquent, en ce qui concerne le coût total, l'alimentation du système d'irrigation par un système distribué à énergie renouvelable (SDER) est optimale pour toutes les étapes du cycle de vie de la plante. L'utilisation du SDER, dans cette étude, peut réduire les coûts d'environ 17.86% du coût initial au cours de la période d'irrigation. Il y a eu un gain total d'environ 5642 \$ pendant cette période, ce qui n'est pas négligeable pour un agriculteur.

## IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté l'utilisation d'un système multi-sources à 100% énergie renouvelable dans l'irrigation. La programmation linéaire avec contraintes est utilisée pour optimiser le système en fonction du LCC total. Nous avons étudié l'utilisation d'une centrale unique de SER par rapport à des unités distribuées pour irriguer une zone agricole divisée en quatre parcelles égales et cultivée par la même plante.

Les résultats montrent que l'utilisation d'unités d'énergie renouvelable distribuées contenant un générateur photovoltaïque est la solution optimale en ce qui concerne le LCC, la fiabilité et la disponibilité du système. Le bénéfice total réalisé grâce à l'utilisation des SDER dans cette application est d'environ 5642 \$ (17.86% du coût total).

De plus, les unités distribuées peuvent être techniquement meilleures qu'une unité centrale car la qualité de l'énergie fournie en cas de dysfonctionnement de certaines parties du système est toujours meilleure dans le cas de systèmes distribués (par exemple, les défauts d'ombrage dans le cas des systèmes PV). De plus, en raison de la perte totale d'alimentation qui peut apparaître dans le cas d'une unité centrale, en cas de défaillance de câblage ou de l'onduleur. Un autre facteur est le fait que les pertes dans le système de câblage augmentent avec l'augmentation de la puissance fournie et pour minimiser ces pertes, la section du câble doit être élevée et le prix du système de câblage le sera également. Enfin, dans le cas d'unités distribuées, si un sous-système tombe en panne, d'autres systèmes peuvent aider à s'assurer que sa mission est accomplie.

Le nombre de parcelles a été arbitrairement fixé à quatre afin de démontrer économiquement l'utilité des systèmes distribués. Ce nombre peut lui-même être optimisé et fera l'objet d'une étude ultérieure.

---

# OPTIMISATION DE L'UTILISATION DES ENERGIES VERTES, UNE APPLICATION A L'IRRIGATION

CHAPITRE

V

---

## Sommaire

CHAPITRE V. OPTIMISATION DE L'UTILISATION DES ENERGIES VERTES, UNE APPLICATION A L'IRRIGATION .....	102
V.1. Introduction .....	103
V.2. Etat de l'art .....	103
V.3. Méthodologie .....	104
V.3.1. Profil de charge .....	105
V.3.2. Modélisation du système .....	105
V.4. Etude de cas .....	106
V.5. Résultats et discussions.....	109
V.5.1. Scenario 1 .....	109
V.5.2. Scenario 2 .....	111
V.6. Conclusion.....	112

## V.1. Introduction

Ce chapitre évalue les surfaces optimales des terres agricoles pouvant être irriguées par un système d'énergie renouvelable prédéterminé. La surface optimale irriguée d'une zone agricole, cultivée avec des pommes de terre et des tomates et alimentée par un système PV, est étudiée. Deux scénarios sont discutés : les contraintes appliquées au premier scénario sont la superficie limitée de la zone agricole. Dans le second scénario, une autre contrainte est ajoutée, la surface cultivée avec des tomates doit être au moins égale à  $\frac{1}{4}$  de celle cultivée avec des pommes de terre. La programmation linéaire basée sur l'algorithme de Simplex est utilisée pour résoudre le problème d'optimisation. Les résultats obtenus montrent que, pour la zone de culture spécifiée et pour 10 panneaux, une surface optimale d'environ 5.6 ha et 4.7 ha, respectivement pour le premier et le second scénario peut être satisfaite.

## V.2. Etat de l'art

L'énergie est une clé dans les vies humaines. Lorsqu'elle est convertie en différentes formes, les sources d'énergie peuvent alimenter tous les utilitaires importants, tels que l'eau ou l'électricité. Les systèmes d'énergie renouvelable (SER) sont des systèmes qui utilisent de l'énergie provenant de ressources naturelles et qui sont naturellement renouvelables [157]. Ce sont des composants majeurs pour réduire l'effet de serre et agir contre les sources d'énergie épuisantes [158].

Les SERs sont utilisés en deux modes : connecté au réseau ou autonome. Ils peuvent être utilisés seuls ou en mixture. Des techniques d'optimisation telles que la minimisation des coûts [159, 160], la maximisation de la production [22] et l'optimisation du stockage [161] sont appliquées aux SER afin de les déployer de la meilleure façon possible.

La combinaison de la production d'énergie à partir d'énergies renouvelables et de l'agriculture constitue une réponse naturelle à une énergie durable. L'irrigation des cultures est l'une des principales applications de l'agriculture, elle peut promouvoir la conservation des terres agricoles et arrêter la dégradation des prairies.

L'application de techniques d'optimisation à l'irrigation en utilisant des sources d'énergie renouvelables est largement couverte dans la littérature. Campana et al. [141] ont étudié la répartition géospatiale des prairies afin de mettre en œuvre des systèmes de pompage d'eau photovoltaïques. Ils ont utilisé un modèle d'optimisation spatialement explicite des SER basé sur la minimisation des coûts pour évaluer l'emplacement optimal pour la mise en œuvre du

système de pompage d'eau photovoltaïque (PVWP). Un système d'irrigation goutte à goutte alimenté par des sources à énergies renouvelables et un groupe électrogène diesel est proposé par [23], dans lequel le coût actualisé de l'énergie (LCE) basé sur le coût actuel net (NPC) est optimisé à l'aide des algorithmes génétiques (GA). Les auteurs de [142] ont utilisé les AGs pour trouver la taille optimale des systèmes PVWP pour l'irrigation. Leur objectif était de maximiser le profit annuel. Tsang et Jim [162] ont noté que l'irrigation à partir des panneaux installés sur toiture manquait de mesures de conservation de l'eau fiables et rentables et utilisait un réseau de neurones et de logique floue formés à l'aide de variables météorologiques en temps réel pour élaborer une stratégie d'irrigation optimale. Les auteurs de [163] ont intégré une technique de traitement des commandes par similarité à la méthode de solution idéale (TOPSIS) avec la méthode de processus d'hierarchie analytique (AHP) afin de dimensionner de manière optimale un PVWP tout en respectant le côté économique.

Toutes les publications citées ci-dessus ont étudié le problème d'optimisation d'un seul côté ; elles étudient l'optimisation du système énergétique pour atteindre certains objectifs et / ou avantages, tels que la maximisation de l'énergie convertie par les systèmes et la minimisation du coût de l'énergie ainsi obtenue. Mais que se passe-t-il si les gens ne disposent pas de capitaux pour financer la taille requise du système ?

Cet article étudie l'utilisation d'un système photovoltaïque de taille fixe pour irriguer de manière optimale une terre agricole. Le document présente une application sur l'irrigation des cultures où l'hypothèse est qu'un agriculteur a des composants de système énergétique prédéfinis et limités. L'objectif est de maximiser la surface pouvant être irriguée avec un système déjà dimensionné.

### **V.3. Méthodologie**

La méthodologie est divisée en trois étapes principales :

**Étape 1** : Les données météorologiques (irradiations, vitesse du vent, humidité, température ambiante, précipitations effectives) sont collectées à l'aide du logiciel CLIMWAT de la FAO [164].

**Étape 2** : Ces données sont ensuite utilisées d'une coté, avec les caractéristiques techniques des panneaux photovoltaïques, pour calculer l'énergie produite par le système photovoltaïque en utilisant l'équation. V.3. D'autre coté, ils sont utilisés avec les propriétés des plantes et les caractéristiques du sol pour estimer l'eau nécessaire pour l'irrigation de chaque plante à l'aide du logiciel FAO CROPWAT.

**L'étape 3** : résolution du problème d'optimisation à l'aide de l'algorithme simplexe.

Le calcul de L'IWR est évalué à l'aide des données météorologiques telles que la vitesse du vent, la température ambiante, les irradiances solaires à la surface des cultures, les précipitations effectives et les propriétés des cultures telles que l'évapotranspiration, le coefficient des plantes et le type de sol. L'IWR est estimé à l'aide du logiciel CROPWAT.

### V.3.1. Profil de charge

Dans cette application, le système doit alimenter une motopompe pour pomper l'IWR. L'énergie électrique requise ( $E_{elec.}$ ) est donnée par :

$$E_{elec.} = \frac{E_h}{\eta} \quad (V-1)$$

Avec :  $\eta$ : le rendement du système motopompe ;  $E_h$ (Wh/day) : est l'énergie hydraulique requise, qui dépend du besoin journalier en eau et la hauteur manométrique totale. Elle peut être calculer par :

$$E_h = \frac{g \cdot \rho \cdot V \cdot h}{3600} \quad (V-2)$$

$g$ : gravité ;  $\rho$ : densité de l'eau (1000 kg/m<sup>3</sup>) ;  $V$ : volume journalier nécessaire en eau (m<sup>3</sup>);  
 $h$ : la hauteur manométrique totale (m)

### V.3.2. Modélisation du système

#### a) Modèle du système PV

L'énergie électrique quotidienne produite par le système PV est donnée conformément à [165] par la formule suivante :

$$E_{PV} = F_m \cdot [1 - \gamma \cdot (T_c - T_{c,ref})] \cdot \eta_g \cdot A \cdot G(\beta) \quad (V-3)$$

Avec :

$E_{PV}$ : énergie électrique quotidienne produite par le système photovoltaïque (en  $\frac{kWh}{m^2} / day$ ).

$F_m$ : facteur de couplage.

$\gamma$ : coefficient de température de la cellule.

$T_c$ : température quotidienne moyenne des cellules pendant les heures d'ensoleillement. Elle est calculée par la formule suivante :

$$T_c = T_a + (NOCT - 20) * \frac{G}{800} \quad (V-4)$$

$T_{c,ref}$ : température de la cellule dans les conditions de référence

$\eta_g$ : rendement du générateur à la température de référence.

$A$ : surface active du générateur en (m<sup>2</sup>).

$G(\beta)$ : irradiation moyenne quotidienne incidente sur le module incliné de  $\beta$ .

### b) Formulation du problème

Le problème de l'exploitation optimale de l'énergie générée par une source d'énergie renouvelable autonome de taille fixe afin de maximiser la surface irriguée par ce système peut être discuté comme suit :

Considérez qu'un SER peut générer une quantité d'énergie  $E_{PV}(t)$ . Ce système est utilisé pour satisfaire la demande  $D$  du client. Cette demande peut être estimée comme la quantité d'énergie nécessaire pour pomper le volume d'eau ( $V_i$ ) nécessaire pour irriguer différentes parcelles cultivées par certaines plantes. Ces parcelles ont une surface  $S_i(t)$  et peuvent avoir des hauteurs manométriques différentes.

Le problème d'optimisation peut être formulé comme suit :

$$\begin{cases} \text{Max } S(t) = \sum_{i=1}^n S_i(t) \\ \text{ST:} \\ \sum_{i=1}^n E_i(t) \cdot \frac{S_i(t)}{S_u} \leq E_{PV}(t) \\ S_i(t) \geq 0 \end{cases} \quad (\text{V-5})$$

$E_i(t)$ : énergie électrique nécessaire pour pomper l'eau d'irrigation de la parcelle ( $i$ ), exprimée en Wh/ha.

$$E_i(t) = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{g \cdot \rho \cdot V_i(t) \cdot h_i}{3600} \quad (\text{V-6})$$

$V_i(t)$ : IWR de la plante ( $i$ ) (in  $m^3/ha$ )

$S_u$ : unité de surface suppose égale à 1 ha.

Substituant (V.6) dans (V.5) :

$$\begin{cases} \text{Max } S(t) = \sum_{i=1}^n S_i(t) \\ \text{ST:} \\ \sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{\eta} \cdot \frac{g \cdot \rho \cdot V_i(t) \cdot h_i}{3600} \right) \cdot \frac{S_i(t)}{S_u} \leq E_{PV}(t) \\ S_i(t) \geq 0 \end{cases} \quad (\text{V-7})$$

Ce problème d'optimisation linéaire va être résolu en utilisant l'algorithme de Simplex, détaillé dans le chapitre III.

## V.4. Etude de cas

Considérant que 2 cultures doivent être irriguées. L'IWR pour la plante 1 est  $V_1(t)$ , et pour la plante 2 est  $V_2(t)$ . Cette eau nécessaire varie en fonction de l'âge de la culture, des données météorologiques et des propriétés du sol.  $S_1(t)$  et  $S_2(t)$  sont les surfaces cultivé par

les plantes 1 and 2 respectivement.

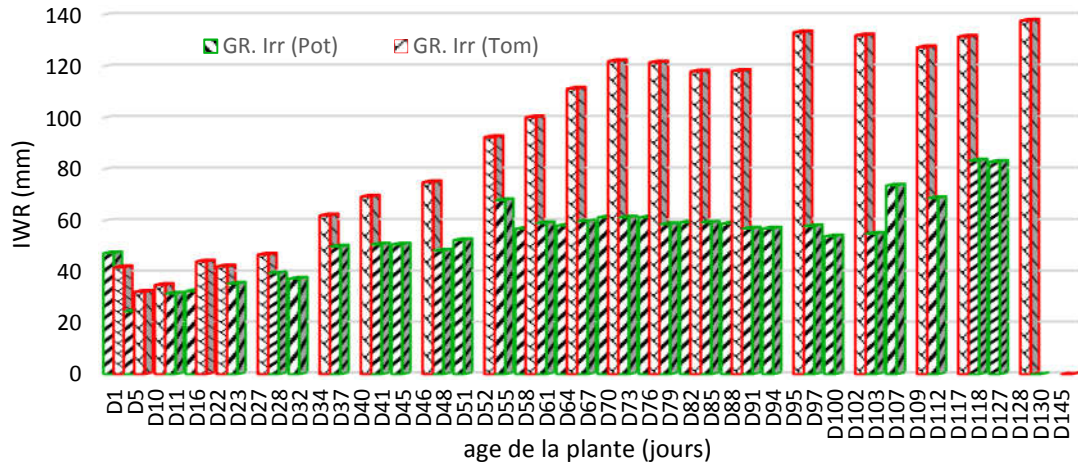
Les deux cultures sont choisies d'être des pommes de terre et des tomates, l'IWR pour ces deux cultures, lorsqu'elles sont cultivées dans la région de Skikda, en Algérie (Latitude : 36.8762, Longitude : 6.90921), est évalué à l'aide du logiciel CROPWAT. Les données météorologiques utilisées proviennent du logiciel CLIMWAT de la FAO. Le tableau V-1 illustre les variations annuelles des données météorologiques au cours d'une année typique dans la zone spécifiée. La figure V-1 représente l'IWR pour différents âges. La période de culture est censée commencer le 6 mai.

**Tableau V-1: Propriétés Météorologique du site choisi [164].**

Mois	Min Temp °C	Max Temp °C	Humidité %	Wind km/day	Sun hours	Rad MJ/m <sup>2</sup> /day	ETo mm/day
Janvier	7.1	13.8	76	156	3.4	7.3	1.20
Février	7.1	14.3	69	156	4.8	10.4	1.67
Mars	8.8	17.1	76	190	6.3	14.9	2.29
Avril	10.0	18.8	75	138	6.8	18.1	2.85
Mai	13.2	21.6	77	138	8.7	22.4	3.67
Juin	16.6	25.0	69	138	9.6	24.3	4.52
Juillet	19.3	28.2	74	138	11.3	26.2	5.08
Août	20.5	28.8	75	147	10.2	23.3	4.72
Septembre	18.8	26.6	76	147	8.7	18.7	3.69
Octobre	15.0	22.7	79	138	6.0	12.5	2.30
<i>Novembre</i>	<i>11.6</i>	<i>18.2</i>	<i>74</i>	<i>147</i>	<i>4.2</i>	<i>8.3</i>	<i>1.60</i>
<i>Décembre</i>	<i>8.8</i>	<i>15.0</i>	<i>78</i>	<i>173</i>	<i>3.5</i>	<i>6.7</i>	<i>1.22</i>
<i>Moyennes annuelles</i>	<i>13.1</i>	<i>20.8</i>	<i>75</i>	<i>150</i>	<i>6.9</i>	<i>16.1</i>	<i>2.90</i>

Le tableau V-1 montre que la période de culture est caractérisée par :

- Des valeurs élevées de température ambiante, les valeurs minimales et maximales apparaissent au mois de mai et août, respectivement, avec une moyenne journalière maximale de 24.6 ° C.
- Le rayonnement le plus élevé atteint 26,2 MJ / m<sup>2</sup> / jour (7277.8 Wh / m<sup>2</sup> / jour) en juillet.



**Figure V-1: Volumes d'eau nécessaires pour les deux plantes pendant leurs cycles de vie**

La figure V-1 présente les besoins en eau d'irrigation des deux cultures au cours des différentes étapes du cycle de vie.

Pendant les 145 jours qui représentent la période du cycle de vie, les observations suivantes peuvent être faites :

- Les tomates ont besoin de plus d'eau que les pommes de terre au cours de leur cycle de vie, sauf pour le premier jour.
- - 45 cycles d'irrigation doivent être programmés dont 9 fois les deux cultures sont irriguées le même jour.
- - IWR augmente avec l'âge des deux cultures.

Pour alimenter le système d'irrigation, un système photovoltaïque autonome constitué de 10 panneaux (Sunmodule Plus SW 250 poly) est utilisé. Les caractéristiques techniques des panneaux utilisés sont présentées dans le Tableau V.2.

**Tableau V-2: caractéristiques Techniques des panneaux PV.**

Item	Value
$P_{max}$	250 Wc
$U_{OC}$	38.0 V
$U_{mpp}$	30.5 V
$I_{Sc}$	8.88 A
$I_{mpp}$	8.27 A
Dimensions	1675/1001/31 (mm)
Poids	21.2 kg
Nombre de cellule	60
Technologie de cellule	Polycrystalline silicon
Dimensions de cellules	156/156 (mm)

## V.5. Résultats et discussions

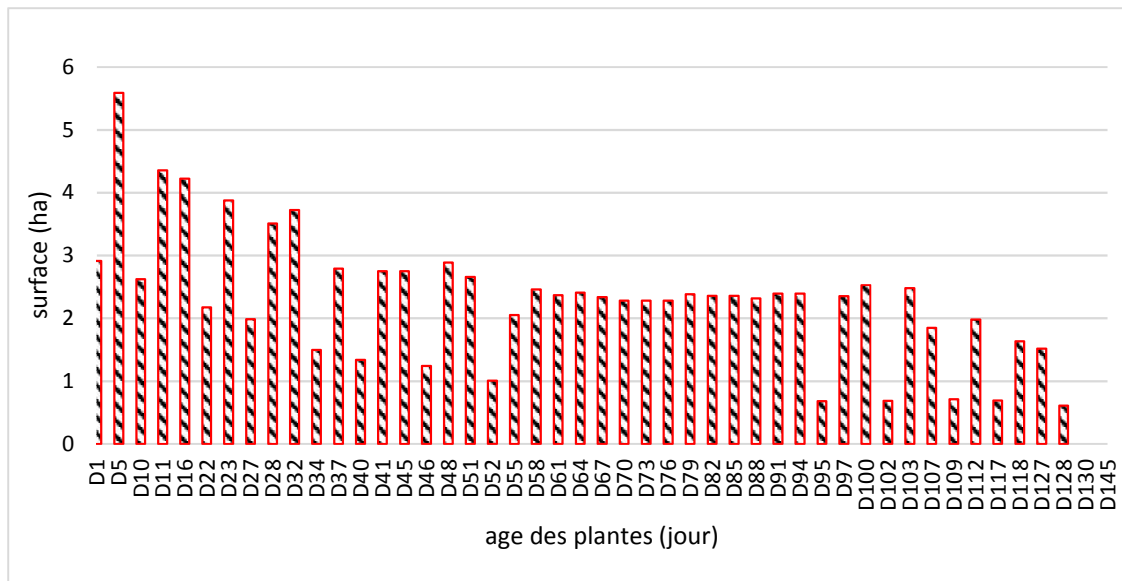
La présente étude de cas traite de deux scénarios, dans lesquels la limite maximale est fixée à 10 ha pour l'ensemble de la surface (c.-à-d.  $S_1 + S_2$ ) dans le premier. Cependant, une autre contrainte est imposée au modèle présenté dans (V.7).

### V.5.1. Scenario 1

Dans ce scénario, le nombre de panneaux disponibles est fixé à 10, la surface maximale à irriguer est fixée à 10 ha. Le problème formulé en (V.7) devient :

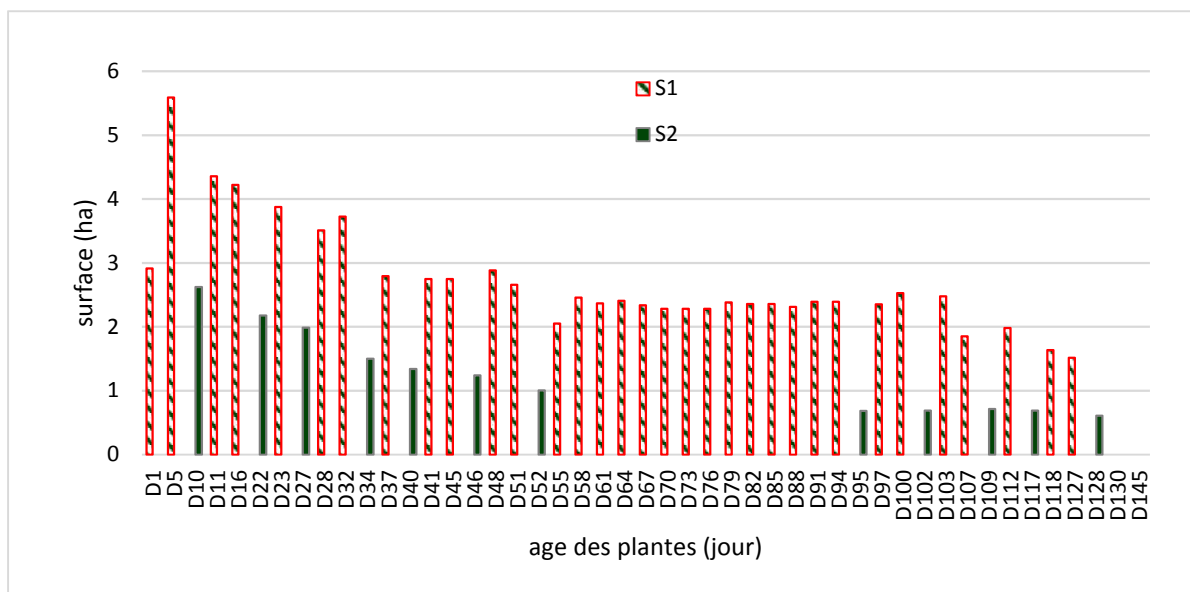
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max } S(t) = S_1(t) + S_2(t) \\ \text{ST:} \\ \left( \frac{1}{\eta} \cdot \frac{g \cdot \rho \cdot V_1(t) \cdot h_1}{3600} \right) \cdot S_1(t) + \left( \frac{1}{\eta} \cdot \frac{g \cdot \rho \cdot V_2(t) \cdot h_2}{3600} \right) \cdot S_2(t) \leq E_{PV}(t) \\ S_1(t) + S_2(t) \leq 10 \\ S_i(t) \geq 0 \end{array} \right. \quad (\text{V-8})$$

La figure V-2 illustre les résultats de l'optimisation. La surface optimale dépend de la quantité d'eau nécessaire à la culture. La surface irriguée au cinquième jour (D5) représente la surface optimale pouvant être irriguée par le système, cette surface est égale à 5.6 ha cultivés en pommes de terre. Le système photovoltaïque génère 9493 watts et le système de pompage pompe un volume d'environ  $138.3 \text{ m}^3$  d'eau.



**Figure V-2: Les surfaces optimale irrigué par le système implémenté**

La répartition des surfaces optimales pouvant être irriguées par le système sur les deux parcelles est illustrée sur la figure V.3. Selon cette figure, et en fonction de la contrainte imposée, la surface optimale couvre la majeure partie du cycle de vie des surfaces cultivées par la pomme de terre ( $S_1$ ). Cela est dû au fait que l'eau d'irrigation requise par les pommes de terre est inférieure à celle requise par les tomates. L'historgramme de la figure V.3 montre douze cas de surfaces optimales cultivées par des tomates ( $S_2$ ) correspond aux jours où l'irrigation des pommes de terre n'est pas programmée.



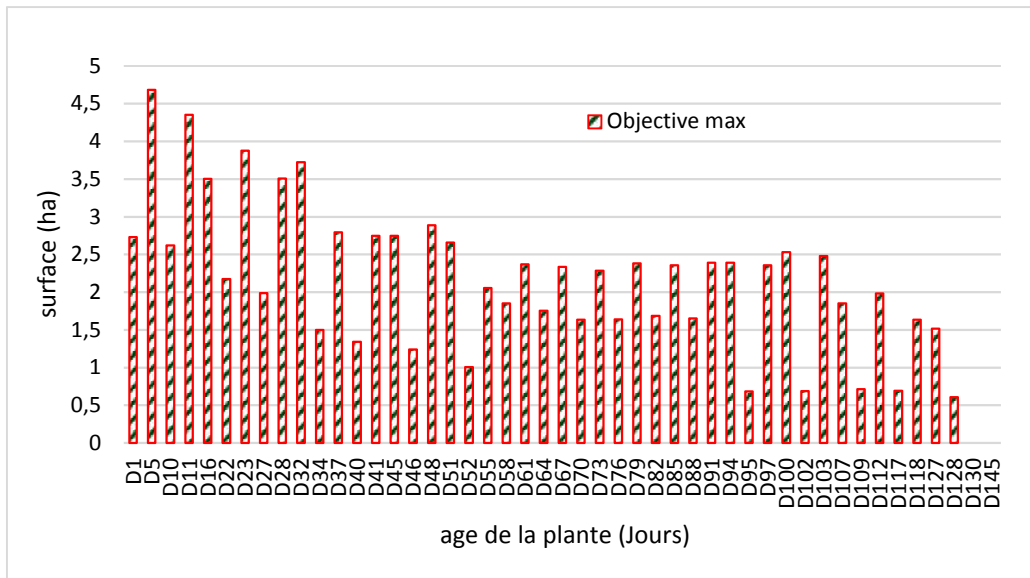
**Figure V-3: Répartition des surfaces optimales irrigués dans les deux parcelles**

### V.5.2. Scenario 2

Dans ce scénario, le nombre de panneaux disponibles est fixé à 10, la surface maximale à irriguer est fixée à 10 ha et lorsque les deux parcelles doivent être irriguées le même jour, la surface irriguée à partir de la parcelle cultivée en tomates ( $S_2$ ) doit être au moins égale au quart de la surface irriguée à partir de la parcelle cultivée en pommes de terre ( $S_1$ ). Le problème d'optimisation présenté par l'équation V.6 devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max } S(t) = S_1(t) + S_2(t) \\ \text{ST:} \\ \left( \frac{1}{\eta} \cdot \frac{g \cdot \rho \cdot V_1(t) \cdot h_1}{3600} \right) \cdot S_1(t) + \left( \frac{1}{\eta} \cdot \frac{g \cdot \rho \cdot V_2(t) \cdot h_2}{3600} \right) \cdot S_2(t) \leq E_{PV}(t) \\ S_1(t) + S_2(t) \leq 10 \\ S_2(t) \geq \frac{1}{4} \cdot S_1(t) \\ S_i(t) \geq 0 \end{array} \right. \quad (\text{V-9})$$

La figure V.4 représente les résultats d'optimisation pour tous les jours d'irrigation programmés. Dans ce cas, la surface optimale est toujours au cinquième jour (D5) et comparée à celle du premier scénario la surface totale devient 4.68 ha, où 3.74 ha proviennent de ( $S_1$ ) et environ 0.93 ha de ( $S_2$ ), comme indiqué dans la figure V.4. Dans ce cas, le volume total d'eau pompée est de  $122.51 \text{ m}^3$  et le système génère environ 9405 watts.

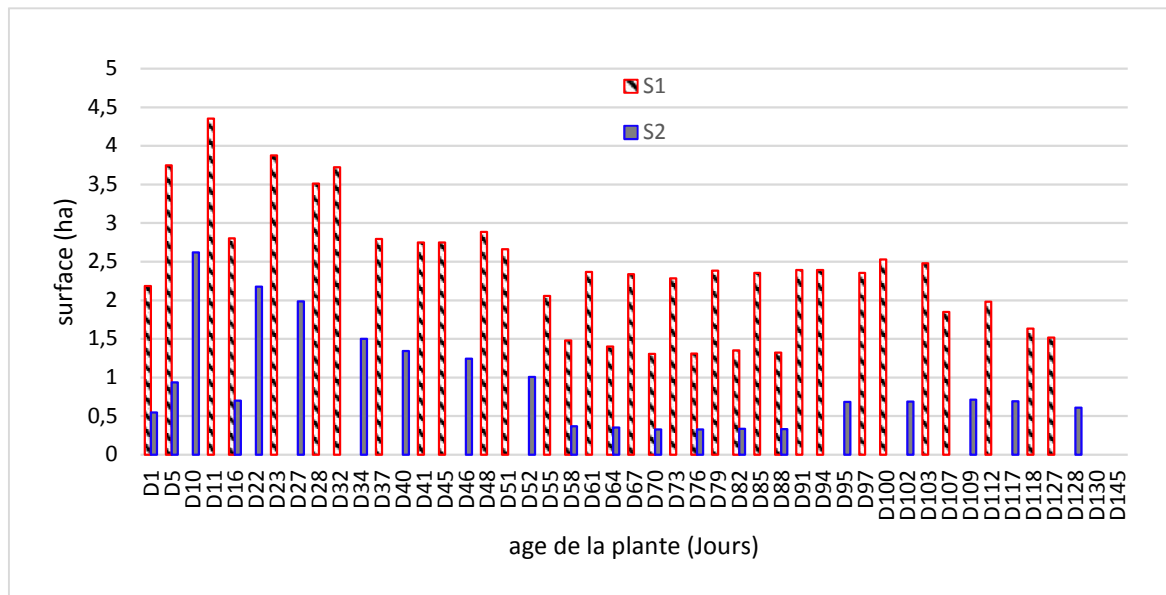


**Figure V-4: Les surfaces optimale irriguée par le système PV pour le 2<sup>ème</sup> scénario**

La surface optimale irriguée par le système à partir de ( $S_1$ ) est au jour (D11) avec 4.33 ha irrigués par  $137.3 \text{ m}^3$  et consomme 9394.3 watts. Alors que la surface optimale irriguée à partir de ( $S_2$ ) est au jour (D10) avec une surface de 2.62 ha, irriguée avec un volume d'eau égal

à  $91.96 \text{ m}^3$ . Le système de pompage est alimenté par 9397.4 watts générés par le système photovoltaïque.

La figure V.5 illustre la répartition des surfaces optimales pouvant être irriguées par le système sur les deux parcelles pour le deuxième scénario. La surface optimale irriguée à partir de  $S_1$  dans ce scénario est atteinte durant le jour (D11) avec environ 4.35 ha où l'irrigation de  $S_2$  n'est pas programmée. Alors que la surface optimale irriguée à partir de  $S_2$  est atteinte au jour D10 avec environ 2.62 ha



**Figure V-5: Répartition des surfaces optimales irriguées dans les deux parcelles pour le 2<sup>ème</sup> scénario**

## V.6. Conclusion

Les systèmes de pompage photovoltaïque constituent une solution alternative aux systèmes d'irrigation à base des générateurs diesel. C'est une solution propre et renouvelable au développement durable de l'agriculture en Algérie. Le dimensionnement optimal des systèmes PVWP est une tâche importante pour satisfaire la demande du client. Cependant, l'utilisation optimale de l'énergie produite par les systèmes d'énergie renouvelable est nécessaire pour réduire les coûts.

L'étude effectuée dans ce chapitre, présente une solution méthodique pour optimiser l'utilisation d'un système PV de taille fixe et prédéterminée dans l'irrigation des cultures. La méthodologie proposée peut être appliquée à différents endroits et à plusieurs cultures.

---

# Dimensionnement optimal d'un SHER pour alimenter un centre de santé dans la région de Tamanrasset

CHAPITRE

VI

---

## Sommaire

CHAPITRE VI. Dimensionnement optimal d'un SHER pour alimenter une clinique dans la région de Tamanrasset .....	113
VI.1. Introduction .....	114
VI.2. Localisation et ressources .....	114
VI.3. Profil de charge .....	116
VI.4. Composants du système .....	116
VI.5. Modélisation des composants du système .....	117
VI.5.1. Système PV .....	117
VI.5.2. Turbine éolienne .....	118
VI.5.3. Générateur GPL .....	118
VI.5.4. Caractéristiques technico-économiques .....	119
VI.6. Résultats et discussion .....	119
VI.7. CONCLUSION .....	121

## VI.1. Introduction

Un des défis importants en Algérie est la fourniture d'électricité pour renforcer les services de soins de santé dans les régions sahariennes isolées. Les systèmes d'énergie renouvelables hybrides autonomes peuvent jouer un rôle stratégique dans la résolution de ce problème et dans le développement durable de ces régions.

L'Algérie possède notamment le potentiel solaire le plus élevé au monde. L'Algérie a aussi un gisement éolien important. 78% de sa surface est caractérisée par des vitesses supérieures à 3 m/s ; dont environ 40% sont supérieures à 5 m/s [166]. Elle dispose également du GPL à un prix compétitif, et qui est caractérisé par son aspect écologique.

Tamanrasset est une grande province située au sud de l'Algérie. Elle se caractérise par une irradiation solaire globale annuelle moyenne de 6300 Wh/m<sup>2</sup> et une durée d'ensoleillement moyenne de 9.32 h/jour.

Ce chapitre mène une étude technico-économique pour le dimensionnement optimal d'un SHER dédié à l'électrification d'une clinique installée dans la région de Tamanrasset, à l'extrême sud de l'Algérie. Le système hybride proposé est constitué de générateurs photovoltaïques, d'éoliennes, de batteries de stockage, d'onduleurs, de régulateurs et d'un groupe électrogène au gaz de pétrole liquéfié (GPL) comme un système d'appoint. L'analyse de notre système hybride, et son dimensionnement optimal sont effectués au moyen du logiciel HOMER mis au point pour la conception et l'analyse de SHER intégrant différents types de sources d'énergie. La configuration du système ainsi obtenue peut générer de l'électricité avec un coût du kWh au 14.74 DA.

## VI.2. Localisation et ressources

La clinique sera située à Tamanrasset, en Algérie (22 ° 47'19 "N, 5 ° 31'32" E). Les figures VI-1 et V-2 montrent la vitesse moyenne mensuelle du vent [167] et le rayonnement solaire [78], respectivement, pour cet endroit.

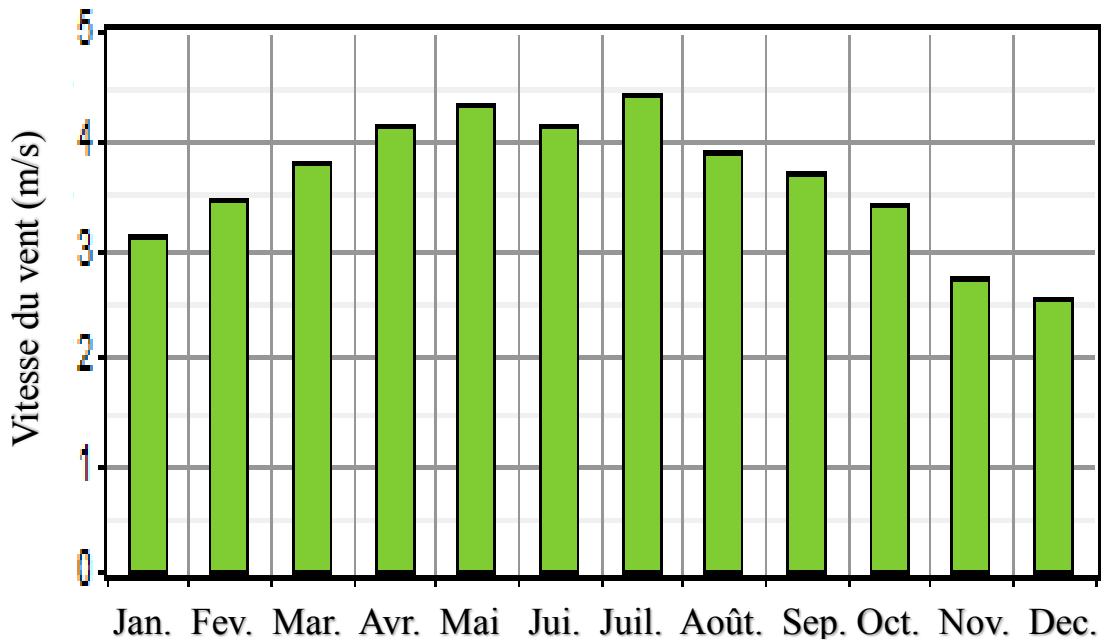


Figure VI-1 : Variation mensuelle of de la Vitesse moyenne du vent à Tamanrasset

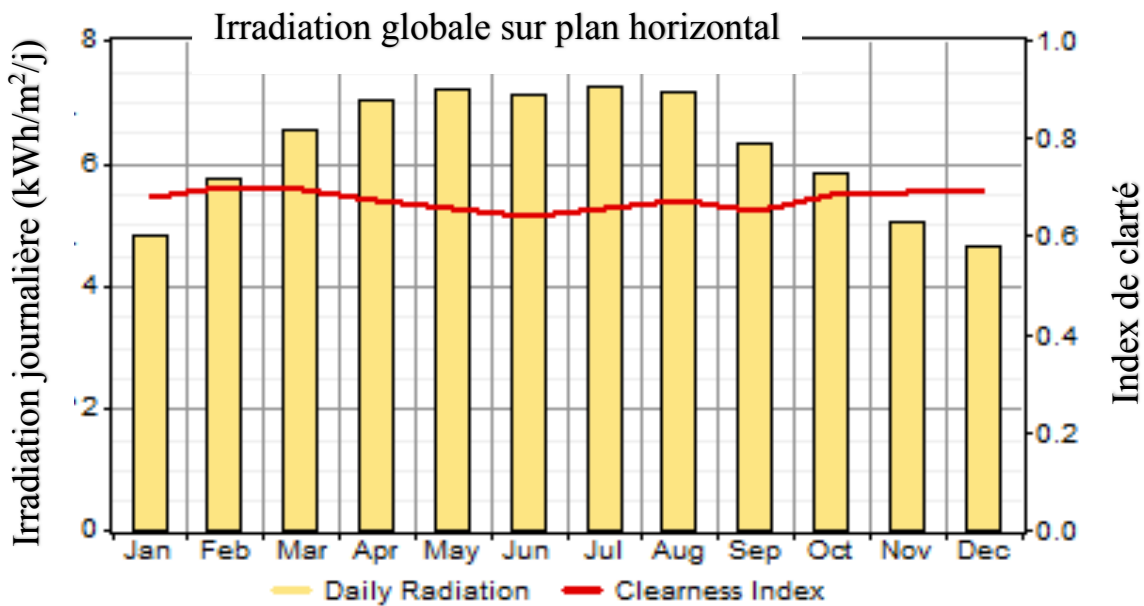


Figure VI-2: Irradiation Solaire moyenne à Tamanrasset

Le site étudié a un rayonnement solaire élevé et une vitesse de vent considérable. Le rayonnement moyen est de 6.3 kW/m<sup>2</sup>/jour et la vitesse moyenne du vent est estimée à 3.63 m/s. Ces données sont utilisées comme entrées pour le logiciel HOER.

### VI.3. Profil de charge

Une clinique peut comprendre : une salle de médecin, une salle d'infirmières, deux salles de traitement, une salle d'administration, une petite pharmacie, deux toilettes et une salle d'attente. Les équipements médicaux, l'éclairage et les autres dispositifs utilisés dans la clinique, ainsi que la consommation électrique requise sont résumés dans le Tableau VI-1.

**Tableau VI-1 : Illustration du profil de charge de la clinique [168, 169]**

	Quantité	Puissance (Watts)	Temps d'utilisation (h)	Energie requisse (W/h)
Lampes	13	20	12	3120
Lampes (extérieurs)	2	20	2	80
Réfrigérateur	1	80	14	1120
Congélateur	1	80	14	1120
Vaporisateur	1	50	3	150
Concentrateur d'oxygène	1	300	2	600
Stérilisateur électrique	1	1500	3	4500
Pompe à eau	1	100	6	600
Poste de télévision	1	150	12	1800
Ventilateur de plafond	7	60	12	3840
Evaporative cooler	3	500	12	18000
Charge journalière moyenne AC = 34.93 KWh				

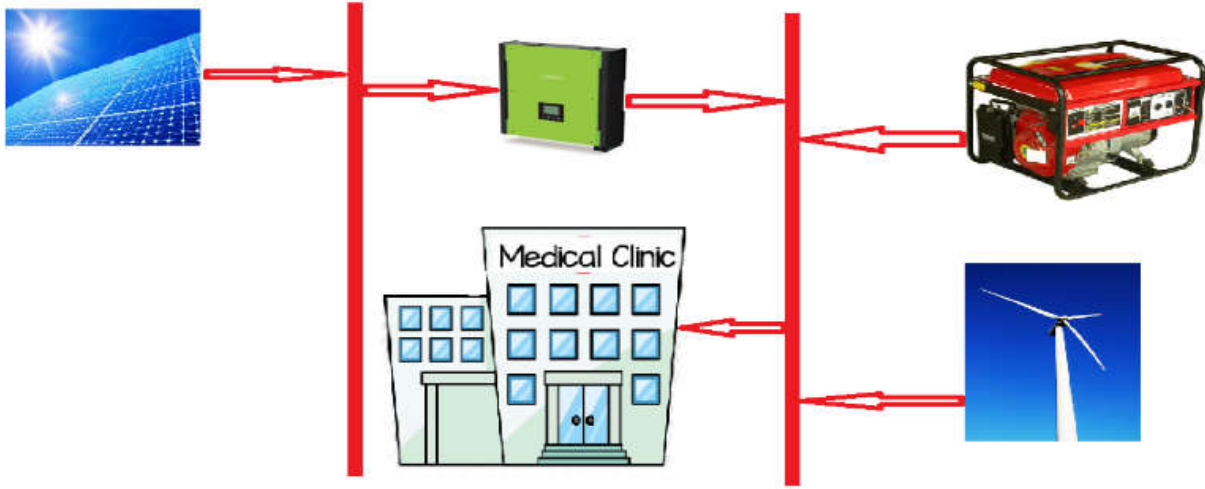
### VI.4. Composants du système

Le système hybride proposé est composé de :

- Un générateur photovoltaïque,
- Une éolienne,
- Des batteries de stockage,
- Un onduleur,
- Un régulateur de charge et,
- Un groupe électrogène au GPL comme système de secours.

Le choix initial de la taille des composants est basé sur un profil de charge.

L'architecture du système hybride proposé est illustrée dans la figure VI-3.



**Figure VI-3: Architecture du système proposé**

## VI.5. Modélisation des composants du système

### VI.5.1. Système PV

Le modèle mathématique du champ PV est exprimé par les équations suivantes [87].

1) la caractéristique I (V) du panneau photovoltaïque :

$$I = N_p I_{PH} - N_p I_S \left[ \exp \left( \frac{q}{K_1 T_{CA}} * \left( \frac{V}{N_S} + \frac{I_{RS}}{N_P} \right) \right) - 1 \right] - \frac{1}{R_{SH}} * \left( \frac{N_p V}{N_S} + I_{RS} \right) \quad (VI-1)$$

Avec :

$I_{PH}$  : Le photocourant, donné par :

$$I_{PH} = [I_{SC} + K_1 (T_C - T_{ref})] * G \quad (VI-2)$$

$I_S$  et  $I_{RS}$  Les courant de saturation et de saturation inverse de la cellule, ils sont donnés par les formules VI-3 et VI-4, respectivement :

$$I_S = I_{RS} \left( \frac{T_C}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[ \frac{q E_G}{K A} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_C} \right) \right] \quad (VI-3)$$

$$I_{RS} = \frac{I_{SC}}{\exp \left( \frac{q V_{OC}}{N_S k A T_C} \right) - 1} \quad (VI-4)$$

$T_C$  : La température de la cellule peut être calculée par Equation VI-5 :

$$T_C = T_{Air} + \frac{NOCT-20}{800} A \quad (VI-5)$$

2) La puissance fournie par les panneaux solaires est exprimée par la formule suivante [170]:

$$P(t) = \eta_r [1 - \beta (T_c - T_{cref}) A G(t)] \quad (VI-6)$$

### VI.5.2. Turbine éolienne

L'éolienne convertie l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique au moyen d'un générateur électrique.

La puissance produite par une éolienne dépend principalement de l'interaction entre son rotor et le vent. La puissance éolienne disponible peut être exprimée par :

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho S V_w^3 \quad (VI-7)$$

La puissance extractible peut être écrite comme :

$$P_{Rotor} = \frac{1}{2} C_p \rho S V_w^3 \quad (VI-8)$$

$C_p$ : coefficient de puissance du rotor, défini comme le rapport entre la puissance extractible et la puissance disponible. Betz [63] a prouvé que  $C_p = 0.59$  dans des conditions idéales.

Le rapport de la vitesse linéaire de la pointe de la lame à la vitesse du vent, appelé rapport de vitesse de pointe et noté  $\lambda$  peut-être exprimé par [171]:

$$\lambda = \frac{w_r \cdot R_r}{V_w} \quad (VI-9)$$

### VI.5.3. Générateur GPL

Le choix du groupe électrogène au GPL proposé est dû à la disponibilité du GPL en Algérie, à son prix concurrent et à son impact écologique moindre. Le courant délivré par le générateur est donné par la formule VI-10 et la puissance nominale par la formule VI-11

$$I_{DG}(t) = I_{DG\_max} \cdot x_{DG}(t) \quad (VI-10)$$

$$P_{DG}(t) = \sqrt{3} \cdot I_{DG}(t) \cdot U_{DG_{nom.AC}} \cdot \cos\varphi \quad (VI-11)$$

#### VI.5.4. Caractéristiques technico-économiques

Le *Tableau VI-2* récapitule les données techniques et économiques relatives aux différents composants du système hybride proposé, conformément aux exigences de HOMER.

**Tableau VI-2 : Détails des composants du SHER**

Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs
Générateur PV (CEM235-P 60 / polycristallin)		Turbine éolienne (FD4.0-3000)	
Puissance crête	235 w	Puissance	3KW
Coût en Capitale	30000 DA	Hauteur du mât	3.8 m
Coût de remplacement	30000 DA	Coût en Capitale	552812,86 DA
Coût d'exploitation et de maintenance	2332,36 DA	Coût de remplacement	552812,86 DA
Cycle de vie estimé	25 ans	Cycle de vie estimé	25 ans
		Coût d'exploitation et de maintenance	4442,58DA
Générateur GPL		Convertisseur	
Puissance nominale	4,5 kW, 8 A	Puissance nominale	2kW
Coût en Capitale	39000 DA	Rendement	90%
Coût de remplacement	39000 DA	Coût en Capitale	21000 DA/kW
Coût d'exploitation et de maintenance	300 DA/h	Coût de remplacement	21000 DA/kW
Prix du carburant (GPL)	9 DA/l	Coût d'exploitation et de maintenance	1200 DA/an
Vie opérationnelle	15,000hrs	Vie opérationnelle	15 ans

#### VI.6. Résultats et discussion

Cette étude vise le dimensionnement du système hybride avec les hypothèses suivantes :


- a) La pénétration des énergies renouvelables doit être supérieur ou égale 90% de l'énergie totale produite.

- b) La valeur de probabilité de perte de charge annuelle doit être inférieure ou égale 5% max.
- c) Il n'y a pas de probabilité de perte de puissance.

Le système proposé est simulé à l'aide du logiciel Homer. Les intrants économiques fournis (coûts d'investissement, de remplacement et d'exploitation, frais de carburant, etc.) permettent au logiciel d'évaluer les aspects économiques du projet.

Le résultat optimal obtenu par simulation est illustré dans le Tableau VI-3. La configuration proposée nécessite 15 kW issus de l'installation photovoltaïque, 2 éoliennes, 0.1 kW obtenue du groupe GPL et un onduleur de 3 kW.

**Tableau VI-3. Évaluation de la performance de la solution optimale**

		Paramètres						
	Architecture	PV (kW)	Générateur éolien (N°)	Générateur GPL (kW)	Convertisseur (kW)			
		15	2	0.1	3			
	Coûts	Coût Initial (DA)	Coût d'exploitation (DA/an)	NPC Total (DA)	COE (DA/kWh)	Coût annuel du carburant (DA)		
		1545823	51202	2200704	14.74	35576		
	Environnement (kg/an)	Dioxyde de Carbon	Monoxyde de Carbon	Hydrocarbures non brûlés	Matériau particulaire	Dioxyde de soufre	Oxydes d'azote	
		60.6	0.204	0.0226	0.0154	0.16	1.82	

Le coût du kWh est estimé à 14.74 DA, avec un coût initial du système de 154523 DA et un coût annuel du carburant de 35576 DA. D'après ces résultats, le kWh est obtenu avec un prix élevé, par rapport au prix du kWh vendu par Sonelgaz, qui est subventionné par l'état. Néanmoins ce prix est raisonnable en tenant compte les frais à dépenser pour faire une extension du réseau.

Ce système a un impact mineur sur l'environnement avec des émissions en CO<sub>2</sub> de 60.6 Kg/an, 0.2 Kg/an de CO et 1.82 Kg/an de NO<sub>2</sub>. Les autres émissions sont négligeables avec des valeurs inférieures à 0.1 kg/an.

## **VI.7. CONCLUSION**

Dans cette étude, nous avons présenté une analyse technico-économique de la faisabilité de l'alimentation d'un centre de santé, dans la région de Tamanrasset par l'exploitation des énergies renouvelables combinées avec un générateur GPL. La solution proposée est économique et respecte l'environnement (minimise les effets indésirables sur l'environnement). Elle comprend un générateur photovoltaïque de 15 kW, 2 éoliennes, un générateur GPL de 0,1 kW et un onduleur de 3 kW.

---

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

---

Les sources d'énergies renouvelables sont considérées comme des alternatives viables pour les services hors réseau, y compris les zones éloignées, sans qu'il soit nécessaire de créer une infrastructure pour les connexions au réseau.

Le grand défi de l'utilisation des technologies renouvelables réside dans les fluctuations de la production d'électricité. Les systèmes hybrides combinant énergies renouvelables et systèmes d'appoint constituent une bonne solution pour l'installation de systèmes autonomes capables d'assurer la disponibilité d'énergie électrique et présentent l'avantage de réduire les moyens de stockage (à cause de la complémentarité des différentes ressources) et de respecter d'avantage l'environnement.

Tenant compte des raisons invoquées, nous nous sommes fixés pour objectif principal dans cette thèse de proposer des solutions à des cas relatifs à ce contexte. Une attention particulière est portée à la collecte des données météorologiques, qui sont utilisées par la suite dans une approche basée sur l'optimisation linéaire, pour trouver le dimensionnement optimal de ces systèmes hybrides qui combinent des systèmes à énergie renouvelables (PV + éolien), des batteries pour stockage et des systèmes conventionnels comme appoint (Générateur GPL). Cette approche est principalement axée sur la réduction des coûts, et la protection de l'environnement tout en assurant l'approvisionnement en électricité. Comme applications de cette approche, nous avons choisi deux domaines stratégiques dans notre pays : l'agriculture et le tourisme.

Ensuite, Une analyse approfondie, des SHERs, portant sur leur définition, leurs classifications, suivie d'un état de l'art sur leur utilisation, puis d'une analyse des différentes techniques, et quelques logiciels utilisés pour l'optimisation de ces systèmes.

Le modèle mathématique, simulant le comportement de chaque sous-système, est ensuite proposé, ainsi que la méthode suivie pour collecter les données, notamment, les différents composants de l'irradiation solaire, et les données du vent. Une analyse de ces

données pour un endroit choisi est aussi performée.

Ensuite, une analyse des méthodes mathématiques du problème d'optimisation des SHERs a été conduite. Elle a permis de sélectionner la programmation linéaire qui a permis de donner des solutions exactes, et se caractérise par sa convergence rapide vers l'optimum local. Parmi les différents algorithmes de solution des problèmes formulés en programmation linéaire, l'algorithme de simplex est jugé efficace et conforme avec les propriétés du problème

L'approche proposée est organisée comme suit :

- *Collecte des données météorologiques,*
- *Évaluation besoins énergétiques de la charge*
- *Choix des sous- systèmes,*
- *Modélisation des sous-systèmes,*
- *Évaluation des critères de performance,*
- *Définitions des contraintes pour la structure du système choisi,*
- *Formulation mathématique du problème d'optimisation linéaire,*
- *Application de l'algorithme de simplex pour la résolution du problème,*
- *Choix des composants du système optimisé.*

Le pompage d'eau pour irrigation a été choisi pour tester l'efficacité de l'approche proposée, deux applications ont été considérées, dans la première on a pu démontrer, l'efficacité économique de l'utilisation des systèmes distribués utilisés pour irriguer quatre parcelles cultivées par la même plante. Nous avons constaté qu'un important profit a été réalisé, en comparaison avec l'utilisation d'un seul système central.

La deuxième application a été consacrée à l'optimisation de l'utilisation d'un SHER pour irriguer un champ agricole, deux scénarios ont été supposés pour permettre à un agriculteur de définir ces propriétés et fixer un calendrier d'irrigation bien déterminé pour exploiter ce système d'une façon optimale.

Pour contribuer à la promotion du tourisme dans le grand sud dans notre pays, le dernier chapitre a été consacré à trouver la taille optimale d'un SHER, dédié à l'électrification d'un centre de soin médical, dans la région de Tamanrasset. Le problème a été formulé en un problème d'optimisation linéaire, et a été résolu en utilisant le logiciel Homer.

## **PERSPECTIVES**

Les performances des systèmes hybrides peuvent être évoluées en tenant compte d'autres conditions. Le développement futur de ce travail tiendra compte les points suivants :

1. Introduction d'autres sources d'énergie renouvelable comme la biomasse,
2. Nouveaux dispositifs de stockage peuvent être introduit (comme le stockage d'hydrogène),
3. L'étude sera réalisée en utilisant d'autre méthodes en comparant les résultats de chaque méthode,
4. Validation expérimentale par l'installation de quelques SHERs,
5. Développement de systèmes « redondants » efficaces pour améliorer la disponibilité du réseau SHERs,
6. Etude des systèmes dimensionnés avec application à des problèmes divers tel que la production du froid, etc.

## PRODUCTION SCIENTIFIQUE DANS LE CADRE DE CETTE THESE

### Publication dans des revues de renommée internationale avec comité de lecture

- 1) Sebbagh, T., Kelaiaia, R., & Zaatri, A. (2018). An experimental validation of the effect of partial shade on the IV characteristic of PV panel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(9-12), 4165-4172. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1858-4>
- 2) Sebbagh, T., Kelaiaia, R., Zaatri, A., Bechara, T., & Abdelouahed, L. (2018). Investigation of the use of a central unique renewable energy system versus distributed units for crop irrigation. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(10), 2365-2373. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1599-y>
- 3) Sebbagh, T., Kelaiaia, R., Abdelouahed, A., & Zaatri, A. (2018). OPTIMIZING THE USE OF GREEN ENERGIES, AN APPLICATION TO CROP IRRIGATION. *Carpathian Journal of Electrical Engineering*, 12(1), 87-98.
- 4) Sebbagh, T., Kelaiaia, R., Zaatri, A., Bechara, T., & Abdelouahed, L.; Exergetic Efficiency Evaluation of a Solar Photovoltaic Energy Converter; Article soumis dans la revue romaine des sciences techniques (under review)

### Conferences internationales

- 1) Sebbagh, T., Kelaiaia, R., Zaatri, A., Bechara, T., & Abdelouahed, L.; Optimal sizing of PV solar pumping system to the irrigation of crops using homer; The 3rd International conference on electromechanical engineering ICEE'2018; Skikda
- 2) Sebbagh, T., Kelaiaia, R., Zaatri, A., Lab-based Experimental validation of the influence of pitch angle and the number of blades on the performance of wind turbine; The 3rd International conference on electromechanical engineering ICEE'2018; Skikda
- 3) Sebbagh, T., Zaatri, A.; Optimal Sizing of a Hybrid Renewable Energy System to feed a Clinic in the region of Tamanrasset; Third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution (ICEMAEP'16), Constantine, Algeria.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] RADP. (2011). *Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique*. Available: [https://portail.cder.dz/IMG/pdf/Programme\\_des\\_energies\\_renouvelables\\_et\\_de\\_l\\_efficacite\\_energetique\\_FR.pdf](https://portail.cder.dz/IMG/pdf/Programme_des_energies_renouvelables_et_de_l_efficacite_energetique_FR.pdf)
- [2] RADP. (2016). *Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique actualisé*. Available: [http://www.energy.gov.dz/francais/uploads/2016/Projets\\_du\\_Secteur/Programme\\_EnR\\_2016/Plaqueette\\_PNEREE\\_2016\\_Fr.pdf](http://www.energy.gov.dz/francais/uploads/2016/Projets_du_Secteur/Programme_EnR_2016/Plaqueette_PNEREE_2016_Fr.pdf)
- [3] SKTM. (2016). *Chiffres Clés 31 Décembre 2016*. Available: <http://www.sktm.dz/?page=article&id=64>
- [4] D. Abbes, "Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome," *Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs-Poitiers*, 2012.
- [5] M. Fadaee and M. Radzi, "Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 3364-3369, 2012.
- [6] M. Deshmukh and S. Deshmukh, "Modeling of hybrid renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp. 235-249, 2008.
- [7] S. Goel and R. Sharma, "Performance evaluation of stand alone, grid connected and hybrid renewable energy systems for rural application: A comparative review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 1378-1389, 2017.
- [8] W. D. Kellogg, M. H. Nehrir, G. Venkataramanan, and V. Gerez, "Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/PV systems," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 13, pp. 70-75, 1998.
- [9] S. Aissou, D. Rekioua, N. Mezzai, T. Rekioua, and S. Bacha, "Modeling and control of hybrid photovoltaic wind power system with battery storage," *Energy Conversion and Management*, vol. 89, pp. 615-625, 2015.
- [10] T. Ma, H. Yang, L. Lu, and J. Peng, "Optimal design of an autonomous solar-wind-pumped storage power supply system," *Applied Energy*, vol. 160, pp. 728-736, 2015.
- [11] H. A. Kazem, H. A. Al-Badi, A. S. Al Busaidi, and M. T. Chaichan, "Optimum design and evaluation of hybrid solar/wind/diesel power system for Masirah Island," *Environment, Development and Sustainability*, vol. 19, pp. 1761-1778, 2017.
- [12] M. A. Mohamed, A. M. Eltamaly, and A. I. Alolah, "Sizing and techno-economic analysis of stand-alone hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery power generation systems," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 7, p. 063128, 2015.
- [13] M. Smaoui and L. Krichen, "Design and energy control of stand-alone hybrid wind/photovoltaic/fuel cell power system supplying a desalination unit," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 6, p. 043111, 2014.
- [14] A. Kaabeche, S. Diaf, and R. Ibtouen, "Firefly-inspired algorithm for optimal sizing of renewable hybrid system considering reliability criteria," *solar energy*, vol. 155, pp. 727-738, 2017/10/01/ 2017.
- [15] A. González, J.-R. Riba, A. Rius, and R. Puig, "Optimal sizing of a hybrid grid-connected photovoltaic and wind power system," *Applied Energy*, vol. 154, pp. 752-762, 2015.
- [16] G. Bekele and B. Palm, "Feasibility study for a standalone solar-wind-based hybrid energy system for application in Ethiopia," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 487-495, 2010.
- [17] M. M. Rahman, M. M. Hasan, J. V. Paatero, and R. Lahdelma, "Hybrid application of biogas and solar resources to fulfill household energy needs: A potentially viable option in rural areas of developing countries," *Renewable Energy*, vol. 68, pp. 35-45, 2014/08/01/ 2014.
- [18] H. Yang, W. Zhou, L. Lu, and Z. Fang, "Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm," *solar energy*, vol. 82, pp. 354-367, 2008.
- [19] H. Yang, L. Lu, and W. Zhou, "A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system," *solar energy*, vol. 81, pp. 76-84, 2007.
- [20] M. I. Abdel-Karim Daud, Marwan M. Mahmoud, Walid Kukhun, "Simulation of a Hybrid Power System Consisting of Wind Turbine, PV, Storage Battery and Diesel Generator: Design, Optimization and Economical Evaluation," *International Journal of Energy Engineering*, vol. 1, pp. 56-61, 2011.

- [21] M. Ismail, M. Moghavvemi, and T. Mahlia, "Techno-economic analysis of an optimized photovoltaic and diesel generator hybrid power system for remote houses in a tropical climate," *Energy Conversion and Management*, vol. 69, pp. 163-173, 2013.
- [22] X. Wang, A. Palazoglu, and N. H. El-Farra, "Operational optimization and demand response of hybrid renewable energy systems," *Applied Energy*, vol. 143, pp. 324-335, 2015/04/01/ 2015.
- [23] J. Carroquino, R. Dufo-López, and J. L. Bernal-Agustín, "Sizing of off-grid renewable energy systems for drip irrigation in Mediterranean crops," *Renewable Energy*, vol. 76, pp. 566-574, 2015.
- [24] B. D. Vick and B. A. Neal, "Analysis of off-grid hybrid wind turbine/solar PV water pumping systems," *solar energy*, vol. 86, pp. 1197-1207, 2012.
- [25] J. Ramos and H. Ramos, "Sustainable application of renewable sources in water pumping systems: Optimized energy system configuration," *Energy Policy*, vol. 37, pp. 633-643, 2009.
- [26] B. S. Borowy and Z. M. Salameh, "Methodology for optimally sizing the combination of a battery bank and PV array in a wind/PV hybrid system," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 11, pp. 367-375, 1996.
- [27] T. Markvart, "Sizing of hybrid photovoltaic-wind energy systems," *solar energy*, vol. 57, pp. 277-281, 1996.
- [28] S. Diaf, D. Diaf, M. Belhamel, M. Haddadi, and A. Louche, "A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system," *Energy Policy*, vol. 35, pp. 5708-5718, 2007.
- [29] A. Bagul, Z. M. Salameh, and B. Borowy, "Sizing of a stand-alone hybrid wind-photovoltaic system using a three-event probability density approximation," *solar energy*, vol. 56, pp. 323-335, 1996.
- [30] S. Karaki, R. Chedid, and R. Ramadan, "Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 14, pp. 766-772, 1999.
- [31] G. Tina, S. Gagliano, and S. Raiti, "Hybrid solar/wind power system probabilistic modelling for long-term performance assessment," *solar energy*, vol. 80, pp. 578-588, 2006.
- [32] R. Chedid and S. Rahman, "Unit sizing and control of hybrid wind-solar power systems," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 12, pp. 79-85, 1997.
- [33] F. Huneke, J. Henkel, J. A. B. González, and G. Erdmann, "Optimisation of hybrid off-grid energy systems by linear programming," *Energy, Sustainability and Society*, vol. 2, p. 7, 2012.
- [34] J.-Y. Lee, C.-L. Chen, and H.-C. Chen, "A mathematical technique for hybrid power system design with energy loss considerations," *Energy Conversion and Management*, vol. 82, pp. 301-307, 2014.
- [35] J. F. Gonçalves, J. J. Mendes, and M. G. Resende, "A genetic algorithm for the resource constrained multi-project scheduling problem," *European Journal of Operational Research*, vol. 189, pp. 1171-1190, 2008.
- [36] S. Sinha and S. Chandel, "Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic-wind based hybrid energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 50, pp. 755-769, 2015.
- [37] E. Koutroulis and D. Kolokotsa, "Design optimization of desalination systems power-supplied by PV and W/G energy sources," *Desalination*, vol. 258, pp. 171-181, 2010.
- [38] L. Zhang, G. Barakat, and A. Yassine, "Deterministic optimization and cost analysis of hybrid PV/wind/battery/diesel power system," *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 2, pp. 686-696, 2012.
- [39] B. O. Bilal, V. Sambou, P. Ndiaye, C. Kébé, and M. Ndong, "Optimal design of a hybrid solar-wind-battery system using the minimization of the annualized cost system and the minimization of the loss of power supply probability (LPSP)," *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 2388-2390, 2010.
- [40] B. O. Bilal, D. Nourou, V. Sambou, P. Ndiaye, and M. Ndong, "Multi-objective optimization of hybrid PV/wind/diesel/battery systems for decentralized application by minimizing the levelized cost of energy and the CO2 emissions," *International Journal of Physical Sciences*, vol. 10, pp. 192-203, 2015.
- [41] F. A. Khan, N. Pal, and S. H. Saeed, "Review of solar photovoltaic and wind hybrid energy systems for sizing strategies optimization techniques and cost analysis methodologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 92, pp. 937-947, 2018.
- [42] M. Sharafi and T. Y. ELMekkawy, "Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach," *Renewable Energy*, vol. 68, pp. 67-79, 2014.
- [43] A. Maleki, M. Ameri, and F. Keynia, "Scrutiny of multifarious particle swarm optimization for finding the optimal size of a PV/wind/battery hybrid system," *Renewable Energy*, vol. 80, pp. 552-563, 2015.

- [44] H. Borhanazad, S. Mekhilef, V. G. Ganapathy, M. Modiri-Delshad, and A. Mirtaheri, "Optimization of micro-grid system using MOPSO," *Renewable Energy*, vol. 71, pp. 295-306, 2014.
- [45] A. Maleki and F. Pourfayaz, "Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms," *solar energy*, vol. 115, pp. 471-483, 2015.
- [46] O. Ekren and B. Y. Ekren, "Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing," *Applied Energy*, vol. 87, pp. 592-598, 2010.
- [47] Y. A. Katsigiannis, P. S. Georgilakis, and E. S. Karapidakis, "Hybrid simulated annealing–tabu search method for optimal sizing of autonomous power systems with renewables," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, pp. 330-338, 2012.
- [48] M. Alsayed, M. Cacciato, G. Scarcella, and G. Scelba, "Design of hybrid power generation systems based on multi criteria decision analysis," *solar energy*, vol. 105, pp. 548-560, 2014.
- [49] S. Sinha and S. Chandel, "Review of software tools for hybrid renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, pp. 192-205, 2014.
- [50] EUROBATS Secretariat. (2004, April 1). *EUROBATS: The Agreement on the Conservation of Populations of European Bats*. Available: <http://www.eurobats.org/index.htm>
- [51] C. Chiu and C. F. Moss, "The role of the external ear in vertical sound localization in the free flying bat, *Eptesicus fuscus*," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 121, 2007.
- [52] IEA. (2018). *IEA PVPS Trends 2018 in Photovoltaic Applications*.
- [53] P. Gevorkian, *Alternative energy systems in building design*: McGraw-Hill, 2010.
- [54] I. PVPS., "Trends 2017 in Photovoltaic Applications," 2017 2017.
- [55] L. Guimarães, R. Santos, and B. Almada-Lobo, "Scheduling wafer slicing by multi-wire saw manufacturing in photovoltaic industry: a case study," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 53, pp. 1129-1139, 2011.
- [56] D. Beckman, "Duffie, JA; Beckman, WA: Solar Engineering of Thermal Processes," ed: New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2006.
- [57] T. Markvart and K. Bogus, *Solar electricity* vol. 6: John Wiley & Sons, 2000.
- [58] M. Habib, S. Said, M. El-Hadidy, and I. Al-Zaharna, "Optimization procedure of a hybrid photovoltaic wind energy system," *Energy*, vol. 24, pp. 919-929, 1999.
- [59] M. Stiebler, *Wind energy systems for electric power generation*: Springer Science & Business Media, 2008.
- [60] E. Hau and H. Von Renouard, *The wind resource*: Springer, 2006.
- [61] (03/02/2019). Available: <https://www.uka-gruppe.de/en/citizens-and-communities/operating-principle-of-a-wind-turbine/>
- [62] S. Ashok, "Optimised model for community-based hybrid energy system," *Renewable Energy*, vol. 32, pp. 1155-1164, 2007.
- [63] A. Betz, "Theoretical limit for best utilization of wind by wind-motors," *Magazine for the Entire Turbine System*, vol. 20, pp. 307-309, 1920.
- [64] J. Sloopweg, S. De Haan, H. Polinder, and W. Kling, "General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations," *IEEE Transactions on power systems*, vol. 18, pp. 144-151, 2003.
- [65] I. Yahyaoui, *Advances in Renewable Energies and Power Technologies: Volume 1: Solar and Wind Energies*: Elsevier, 2018.
- [66] A. Kébé, "Contribution au pré dimensionnement et au contrôle des unités de production d'énergie électrique en site isolé à partir des énergies renouvelables: Application au cas du Sénégal," Université Paris Sud-Paris XI, 2013.
- [67] B. Ai, H. Yang, H. Shen, and X. Liao, "Computer-aided design of PV/wind hybrid system," *Renewable Energy*, vol. 28, pp. 1491-1512, 2003.
- [68] F. O. Hocaoglu, Ö. N. Gerek, and M. Kurban, "A novel hybrid (wind–photovoltaic) system sizing procedure," *solar energy*, vol. 83, pp. 2019-2028, 2009.
- [69] R. Dufó-López and J. L. Bernal-Agustín, "Multi-objective design of PV–wind–diesel–hydrogen–battery systems," *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 2559-2572, 2008.
- [70] R. M. a. M. Sengupta. *Why Solar Resource Data Are Important to Solar Power*

- [71] D. R. Myers, "Solar radiation modeling and measurements for renewable energy applications: data and model quality," *Energy*, vol. 30, pp. 1517-1531, 2005.
- [72] M. B. Turnhouse, "Role of 14C dating in paleontology," *Journal of Paleontology*, vol. 75, pp. 11-15, 1987.
- [73] V. Badescu, C. A. Gueymard, S. Cheval, C. Oprea, M. Baciú, A. Dumitrescu, F. Iacobescu, I. Milos, and C. Rada, "Computing global and diffuse solar hourly irradiation on clear sky. Review and testing of 54 models," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 1636-1656, 2012/04/01/ 2012.
- [74] J. R. Whiting, T. V. Billoski, and V. R. Jones, "Herding instincts of cretaceous duck-billed dinosaurs," *Journal of Paleontology*, vol. 75, pp. 112-132, 1987.
- [75] M. Thiry, M. B. Ayrault, and J. C. Grisoni, "Ground-water silicification and leaching in sands - Example of the Fontainebleau sand (Oligocene) in the Paris basin," ed, 2002, p. 12.
- [76] E. I. A/S. (04/02/2019). *WindPRO / PARK Introduction to the Estimation of Extreme Wind Speeds and Wind Loads*. Available: [http://www.emd.dk/files/windpro/manuals/for\\_print/Appendices-all\\_UK.pdf](http://www.emd.dk/files/windpro/manuals/for_print/Appendices-all_UK.pdf)
- [77] N. s. m. a. s. energy-location. <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>.
- [78] P. p. e. utility. <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvpgis/apps4/pvest.php?lang=en&map=africa#>.
- [79] P. E. Campana, H. Li, and J. Yan, "Techno-economic feasibility of the irrigation system for the grassland and farmland conservation in China: Photovoltaic vs. wind power water pumping," *Energy Conversion and Management*, vol. 103, pp. 311-320, 2015.
- [80] Y. Shen, S. Li, Y. Chen, Y. Qi, and S. Zhang, "Estimation of regional irrigation water requirement and water supply risk in the arid region of Northwestern China 1989–2010," *Agricultural Water Management*, vol. 128, pp. 55-64, 2013.
- [81] J. Gow and C. Manning, "Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies," *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 146, pp. 193-200, 1999.
- [82] G. Bhuvanewari and R. Annamalai, "Development of a solar cell model in MATLAB for PV based generation system," in *India Conference (INDICON), 2011 Annual IEEE*, 2011, pp. 1-5.
- [83] D. Kapoor, P. Sodhi, and D. Deb, "Solar panel simulation using adaptive control," in *2012 IEEE International Conference on Control Applications*, 2012, pp. 1124-1130.
- [84] Y. Jiang, J. A. A. Qahouq, and I. Batarseh, "Improved solar PV cell Matlab simulation model and comparison," in *Circuits and Systems (ISCAS), Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on*, 2010, pp. 2770-2773.
- [85] H.-L. Tsai, C.-S. Tu, and Y.-J. Su, "Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK," in *Proceedings of the world congress on Engineering and computer science*, 2008, pp. 1-6.
- [86] T. SEBBAGH and A. ZAATRI, "Optimal sizing of a hybrid renewable energy system to feed a clinic in the region of Tamanrasset," Third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution (ICEMAEP'16), Constantine, Algeria 2016.
- [87] T. Sebbagh and A. Abdelouahed, "Etude de l'impact des facteurs climatique (Température, ensoleillement) sur la puissance des cellules Photovoltaïques," presented at the JSN2, . ENSET, Skikda, 2014.
- [88] C.-M. Lai, D. Lee, and Y.-H. Cheng, "An isolated AC module for photovoltaic energy conversion," *International journal of green energy*, vol. 13, pp. 1460-1466, 2016.
- [89] E. S. Hasyim, S. Wenham, and M. Green, "Shadow tolerance of modules incorporating integral bypass diode solar cells," *Solar cells*, vol. 19, pp. 109-122, 1986.
- [90] S. Silvestre and A. Chouder, "Effects of shadowing on photovoltaic module performance," *Progress in Photovoltaics: Research and applications*, vol. 16, pp. 141-149, 2008.
- [91] H. S. Rauschenbach, "Electrical output of shadowed solar arrays," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 18, pp. 483-490, 1971.
- [92] V. Quaschnig and R. Hanitsch, "Numerical simulation of photovoltaic generators with shaded cells," *simulation*, vol. 2, p. 6, 1995.
- [93] M. Alonso-Garcia, J. Ruiz, and F. Chenlo, "Experimental study of mismatch and shading effects in the I–V characteristic of a photovoltaic module," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, pp. 329-340, 2006.

- [94] B. A. Alsayid, S. Y. Alsadi, S. J. Ja'far, and M. H. Dradi, "Partial shading of PV system simulation with experimental results," *Smart Grid and Renewable Energy*, vol. 4, p. 429, 2013.
- [95] H. H. Khaing, Y. J. Liang, N. N. M. Htay, and J. Fan, "Characteristics of different solar PV modules under partial shading," *Int. J. Electr. Comput. Electr. Commun. Eng.*, vol. 8, pp. 1328-1332, 2014.
- [96] E. Lorenzo, *Solar electricity: engineering of photovoltaic systems*: Earthscan/James & James, 1994.
- [97] H. Zheng, S. Li, T. A. Haskew, and Y. Xiao, "Impact of uneven shading and bypass diodes on energy extraction characteristics of solar photovoltaic modules and arrays," *International Journal of Sustainable Energy*, vol. 32, pp. 351-365, 2013.
- [98] M. Grätzel, "Photoelectrochemical cells," *Nature*, vol. 414, p. 338, 2001.
- [99] J. Bishop, "Computer simulation of the effects of electrical mismatches in photovoltaic cell interconnection circuits," *Solar cells*, vol. 25, pp. 73-89, 1988.
- [100] A. Kajihara and A. Harakawa, "Model of photovoltaic cell circuits under partial shading," in *Industrial Technology, 2005. ICIT 2005. IEEE International Conference on*, 2005, pp. 866-870.
- [101] D. Sera and Y. Baghzouz, "On the impact of partial shading on PV output power," in *WSEAS/IASME International Conference on Renewable Energy Sources*, 2008, pp. 229-234.
- [102] A. E. Brooks, D. Cormode, A. D. Cronin, and E. Kam-Lum, "PV system power loss and module damage due to partial shade and bypass diode failure depend on cell behavior in reverse bias," in *Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015 IEEE 42nd*, 2015, pp. 1-6.
- [103] M. R. Maghami, H. Hizam, C. Gomes, M. A. Radzi, M. I. Rezadad, and S. Hajighorbani, "Power loss due to soiling on solar panel: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 1307-1316, 2016.
- [104] G. B. Dantzig and M. N. Thapa, *Linear Programming I: Introduction*. Verlag New York: Springer, 1997.
- [105] S. I. Gass, "Linear Programming," in *Encyclopedia of Statistical Sciences*, ed, 2006.
- [106] X.-S. Yang, *Engineering optimization: an introduction with metaheuristic applications*: John Wiley & Sons, 2010.
- [107] R. K. Arora, *Optimization: algorithms and applications*: Chapman and Hall/CRC, 2015.
- [108] S. Toufik, K. Rida, A. Assia, and Z. Abdelouahab, "OPTIMIZING THE USE OF GREEN ENERGIES, AN APPLICATION TO CROP IRRIGATION," *Carpathian Journal of Electrical Engineering*, vol. 12, pp. 87-98, 2018.
- [109] R. Ramakumar, I. Abouzahr, K. Krishnan, and K. Ashenayi, "Design scenarios for integrated renewable energy systems," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 10, pp. 736-746, 1995.
- [110] R. Ramakumar, P. S. Shetty, and K. Ashenayi, "A linear programming approach to the design of integrated renewable energy systems for developing countries," *IEEE Transactions on energy conversion*, pp. 18-24, 1986.
- [111] R. Chedid and Y. Saliba, "Optimization and control of autonomous renewable energy systems," *International Journal of Energy Research*, vol. 20, pp. 609-624, 1996.
- [112] M. Chen and R. Atta-Konadu, "Mathematical programming model for energy system design," *Energy sources*, vol. 19, pp. 789-801, 1997.
- [113] N. Kaushika, N. K. Gautam, and K. Kaushik, "Simulation model for sizing of stand-alone solar PV system with interconnected array," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 85, pp. 499-519, 2005.
- [114] A. Gupta, R. Saini, and M. Sharma, "Design of an optimal hybrid energy system model for remote rural area power generation," in *Electrical Engineering, 2007. ICEE'07. International Conference on*, 2007, pp. 1-6.
- [115] H. Morais, P. Kádár, P. Faria, Z. A. Vale, and H. Khodr, "Optimal scheduling of a renewable micro-grid in an isolated load area using mixed-integer linear programming," *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 151-156, 2010.
- [116] A. Kanase-Patil, R. Saini, and M. Sharma, "Integrated renewable energy systems for off grid rural electrification of remote area," *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 1342-1349, 2010.
- [117] A. Nagabhusana, R. Jyoti, and A. Raju, "Economic analysis and comparison of proposed HRES for stand-alone applications at various places in Karnataka state," in *ISGT2011-India*, 2011, pp. 380-385.
- [118] S. Jebaraj, S. Iniyar, and R. Goic, "An optimal electricity allocation model for sustainable resource use in India," *International Journal of Energy Research*, vol. 37, pp. 923-935, 2013.
- [119] F. Huneke, J. Henkel, J. A. Benavides González, and G. Erdmann, "Optimisation of hybrid off-grid energy systems by linear programming," *Energy, Sustainability and Society*, vol. 2, p. 7, 2012/04/16 2012.

- [120] K. Kimura and T. Kimura, "Neural networks approach for wind-solar energy system with complex networks," in *Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2013 IEEE 10th International Conference on*, 2013, pp. 1-5.
- [121] H. Wang, E. Abdollahi, R. Lahdelma, W. Jiao, and Z. Zhou, "Modelling and optimization of the smart hybrid renewable energy for communities (SHREC)," *Renewable Energy*, vol. 84, pp. 114-123, 2015.
- [122] A. Malheiro, P. M. Castro, R. M. Lima, and A. Estanqueiro, "Integrated sizing and scheduling of wind/PV/diesel/battery isolated systems," *Renewable Energy*, vol. 83, pp. 646-657, 2015.
- [123] D. Lauinger, P. Caliendo, and D. Kuhn, "A linear programming approach to the optimization of residential energy systems," *Journal of Energy Storage*, vol. 7, pp. 24-37, 2016.
- [124] J. P. Torreglosa, P. García-Triviño, L. M. Fernández-Ramirez, and F. Jurado, "Control based on techno-economic optimization of renewable hybrid energy system for stand-alone applications," *Expert Systems with Applications*, vol. 51, pp. 59-75, 2016.
- [125] B. Bhandari, S.-H. Ahn, and T.-B. Ahn, "Optimization of hybrid renewable energy power system for remote installations: Case studies for mountain and island," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 17, pp. 815-822, 2016/06/01 2016.
- [126] C. Bordin, H. O. Anuta, A. Crossland, I. L. Gutierrez, C. J. Dent, and D. Vigo, "A linear programming approach for battery degradation analysis and optimization in offgrid power systems with solar energy integration," *Renewable Energy*, vol. 101, pp. 417-430, 2017/02/01/ 2017.
- [127] M. Szykowski, T. Siewierski, and A. Wędzik, "Optimization of Energy-Supply Structure in Residential Premises Using Mixed-Integer Linear Programming," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, pp. 1368-1378, 2019.
- [128] E. Heiskanen and K. Matschoss, "Understanding the uneven diffusion of building-scale renewable energy systems: A review of household, local and country level factors in diverse European countries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, pp. 580-591, 2017.
- [129] H. F. V. Flores, T. Furubayashi, and T. Nakata, "Decentralised electricity generation system based on local renewable energy sources in the Honduran rural residential sector," *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 18, pp. 883-900, 2016.
- [130] S. Tabatabaee, S. S. Mortazavi, and T. Niknam, "Stochastic scheduling of local distribution systems considering high penetration of plug-in electric vehicles and renewable energy sources," *Energy*, vol. 121, pp. 480-490, 2017.
- [131] A. Aktas, K. Erhan, S. Ozdemir, and E. Ozdemir, "Experimental investigation of a new smart energy management algorithm for a hybrid energy storage system in smart grid applications," *Electric Power Systems Research*, vol. 144, pp. 185-196, 2017.
- [132] A. Ali, R. A. Tufa, F. Macedonio, E. Curcio, and E. Drioli, "Membrane technology in renewable-energy-driven desalination," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 1-21, 2018.
- [133] I. Yahyaoui, A. Atieh, A. Serna, and F. Tadeo, "Sensitivity analysis for photovoltaic water pumping systems: Energetic and economic studies," *Energy Conversion and Management*, vol. 135, pp. 402-415, 2017.
- [134] Y. Bakelli, A. H. Arab, and B. Azoui, "Optimal sizing of photovoltaic pumping system with water tank storage using LPSP concept," *solar energy*, vol. 85, pp. 288-294, 2011.
- [135] A. Hamidat, B. Benyoucef, and T. Hartani, "Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions," *Renewable Energy*, vol. 28, pp. 1081-1096, 2003.
- [136] M. Jones, I. Odeh, M. Haddad, A. Mohammad, and J. Quinn, "Economic analysis of photovoltaic (PV) powered water pumping and desalination without energy storage for agriculture," *Desalination*, vol. 387, pp. 35-45, 2016.
- [137] J. Reça, C. Torrente, R. López-Luque, and J. Martínez, "Feasibility analysis of a standalone direct pumping photovoltaic system for irrigation in Mediterranean greenhouses," *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 1143-1154, 2016.
- [138] P. E. Campana, A. Olsson, H. Li, and J. Yan, "An economic analysis of photovoltaic water pumping irrigation systems," *International journal of green energy*, vol. 13, pp. 831-839, 2016.
- [139] O. Deveci, M. Onkol, H. O. Unver, and Z. Ozturk, "Design and development of a low-cost solar powered drip irrigation system using Systems Modeling Language," *Journal of Cleaner Production*, vol. 102, pp. 529-544, 2015.
- [140] M. Kumar, K. Reddy, R. Adake, and C. Rao, "Solar powered micro-irrigation system for small holders of dryland agriculture in India," *Agricultural Water Management*, vol. 158, pp. 112-119, 2015.

- [141] P. E. Campana, S. Leduc, M. Kim, A. Olsson, J. Zhang, J. Liu, F. Kraxner, I. McCallum, H. Li, and J. Yan, "Suitable and optimal locations for implementing photovoltaic water pumping systems for grassland irrigation in China," *Applied Energy*, vol. 185, pp. 1879-1889, 2017.
- [142] P. E. Campana, H. Li, J. Zhang, R. Zhang, J. Liu, and J. Yan, "Economic optimization of photovoltaic water pumping systems for irrigation," *Energy Conversion and Management*, vol. 95, pp. 32-41, 2015.
- [143] S. Rehman and A. Z. Sahin, "A wind-solar PV hybrid power system with battery backup for water pumping in remote localities," *International journal of green energy*, vol. 13, pp. 1075-1083, 2016.
- [144] T. Ackermann and V. Knyazkin, "Interaction between distributed generation and the distribution network: operation aspects," in *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, 2002, pp. 1357-1362.
- [145] S. Jain, S. Kalambe, G. Agnihotri, and A. Mishra, "Distributed generation deployment: State-of-the-art of distribution system planning in sustainable era," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 77, pp. 363-385, 2017.
- [146] W. El-Khattam and M. M. Salama, "Distributed generation technologies, definitions and benefits," *Electric Power Systems Research*, vol. 71, pp. 119-128, 2004.
- [147] P. Chiradeja and R. Ramakumar, "An approach to quantify the technical benefits of distributed generation," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 19, pp. 764-773, 2004.
- [148] D. A. Quansah, M. S. Adaramola, and E. K. Anto, "Cost-competitiveness of distributed grid-connected solar photovoltaics in Ghana: case study of a 4 kWp polycrystalline system," *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 19, pp. 2431-2442, 2017.
- [149] A. Mohanty and P. Modi, "Optimal location and sizing of distributed generation in a power distribution system," *Cogeneration and Distributed Generation Journal*, vol. 25, pp. 20-39, 2010.
- [150] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, "Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56," *Fao, Rome*, vol. 300, p. D05109, 1998.
- [151] I. Yahyaoui, F. Tadeo, and M. V. Segatto, "Energy and water management for drip-irrigation of tomatoes in a semi-arid district," *Agricultural Water Management*, vol. 183, pp. 4-15, 2017.
- [152] A. Acakpovi, F. F. Xavier, and R. Awuah-Baffour, "Analytical method of sizing photovoltaic water pumping system," in *2012 IEEE 4th International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST)*, 2012, pp. 65-69.
- [153] D. H. Muhsen, A. B. Ghazali, and T. Khatib, "Multiobjective differential evolution algorithm-based sizing of a standalone photovoltaic water pumping system," *Energy Conversion and Management*, vol. 118, pp. 32-43, 2016.
- [154] R. Fourer, "A simplex algorithm for piecewise-linear programming I: Derivation and proof," *Mathematical programming*, vol. 33, pp. 204-233, 1985.
- [155] R. Hu and Y.-P. Fang, "A parametric simplex algorithm for biobjective piecewise linear programming problems," *Journal of Industrial & Management Optimization*, vol. 13, pp. 573-586, 2017.
- [156] A. Shiroudi, R. Rashidi, G. Gharehpetian, S. Mousavifar, and A. Akbari Foroud, "Case study: Simulation and optimization of photovoltaic-wind-battery hybrid energy system in Taleghan-Iran using homer software," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 4, p. 053111, 2012.
- [157] R. Banos, F. Manzano-Agugliaro, F. Montoya, C. Gil, A. Alcayde, and J. Gómez, "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 1753-1766, 2011.
- [158] M. Iqbal, M. Azam, M. Naeem, A. Khwaja, and A. Anpalagan, "Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, pp. 640-654, 2014.
- [159] L. Noel, J. F. Brodie, W. Kempton, C. L. Archer, and C. Budischak, "Cost minimization of generation, storage, and new loads, comparing costs with and without externalities," *Applied Energy*, vol. 189, pp. 110-121, 2017.
- [160] S. J. a.-D. Hosseini, M. Moazzami, and H. Shahinzadeh, "Optimal Sizing of an Isolated Hybrid Wind/PV/Battery System with Considering Loss of Power Supply Probability," *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, vol. 11, 2017.
- [161] Y. Zhang, P. E. Campana, A. Lundblad, and J. Yan, "Comparative study of hydrogen storage and battery storage in grid connected photovoltaic system: Storage sizing and rule-based operation," *Applied Energy*, vol. 201, pp. 397-411, 2017.

- [162] S. Tsang and C. Y. Jim, "Applying artificial intelligence modeling to optimize green roof irrigation," *Energy and Buildings*, vol. 127, pp. 360-369, 2016.
- [163] D. H. Muhsen, T. Khatib, and T. E. Abdulabbas, "Sizing of a standalone photovoltaic water pumping system using hybrid multi-criteria decision making methods," *solar energy*, vol. 159, pp. 1003-1015, 2018.
- [164] fao. (05/05/2018). Available: <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/climwat-for-cropwat/en/>
- [165] A. H. Arab, M. Benghanem, and A. Gharbi, "Dimensionnement de systèmes de pompage photovoltaïque," *Revue des énergies renouvelables*, vol. 8, pp. 19-26, 2005.
- [166] F. Chellali, A. Khellaf, A. Belouchrani, and A. Recioui, "A contribution in the actualization of wind map of Algeria," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 993-1002, 2011.
- [167] ONM, "Données Météorologiques," ed, 2014.
- [168] U. S. Kumar and P. Manoharan, "Optimization and Cost of Energy of Renewable Energy System in Health Clinic Building for a Coastal Area in Tamil Nadu, India Using Homer," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 8, pp. 2048-2056, 2014.
- [169] A. Al-Karaghoul and L. Kazmerski, "Optimization and life-cycle cost of health clinic PV system for a rural area in southern Iraq using HOMER software," *solar energy*, vol. 84, pp. 710-714, 2010.
- [170] A. Acakpovi, E. B. Hagan, and M. B. Michael, "Cost benefit analysis of self-optimized hybrid solar-wind-hydro electrical energy supply as compared to HOMER optimization," *International Journal of Computer Applications*, vol. 114, 2015.
- [171] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind energy explained: theory, design and application*: John Wiley & Sons, 2010.