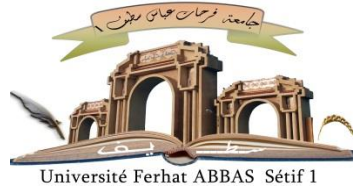


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF1**

**FACULTÉ DE TECHNOLOGIE**

## **THÈSE**

**Présentée au Département d' Electrotechnique**

**Pour l'obtention du diplôme de**

**DOCTORAT EN SCIENCES**

**Option: Commande électrique**

**Par**

**RAHMANI Nassima**

## **THÈME**

**Contribution à la commande et la gestion  
énergétique d'un système hybride (PV/Eolien)  
autonome**

**Soutenue le ....11./2025 devant le Jury:**

<b>RAHMANI Lazhar</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ. Ferhat Abbas Sétif 1</b>	<b>Président</b>
<b>MOSTEFAI Mohammed</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ. Ferhat Abbas Sétif 1</b>	<b>Directeur de thèse</b>
<b>BADOUD AbdEssalam</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ. Ferhat Abbas Sétif 1</b>	<b>Examineur</b>
<b>MAOUEDJ Rachid</b>	<b>Directeur de recherche</b>	<b>URER.MS Adrar</b>	<b>Examineur</b>
<b>LARIBI Sliman</b>	<b>professeur</b>	<b>Univ. Adrar</b>	<b>Examineur</b>
<b>LAYADI Toufik Madani</b>	<b>MCA</b>	<b>Univ B.B.A</b>	<b>Examineur</b>

## Résumé

Le travail présenté dans Cette thèse vise à contribuer à la gestion de l'énergie entre les diverses sources d'un système énergétique hybride, dans le but de fournir de l'électricité à une habitation située sur un site isolé et lui assurer son autonomie grâce à des sources d'énergie renouvelables. Le système multi-sources envisagé intègre des panneaux solaires, une éolienne en tant que sources principales, ainsi que des batteries au plomb-acide pour le stockage de l'énergie.

Dans un premier temps, nous introduisons une modélisation des divers composants du système énergétique multi-sources sous MATLAB/Simulink. Cette étape nous a permis de déterminer de manière optimale la taille du système hybride. Des méthodes d'optimisation ont été envisagées pour gérer et optimiser l'énergie du système, afin d'assurer son fonctionnement optimal tout en tenant compte des contraintes inhérentes aux sources d'énergie variables.

Ensuite, toujours dans le même contexte de gestion d'énergie, nous examinons l'influence de l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment sur l'efficacité énergétique de l'habitat et sur le système multi-source d'énergie. Nous utilisons le logiciel « TRNSYS 18 » comme outil de simulation thermique et d'évaluation afin de réduire les besoins énergétiques en chauffage/climatisation et d'améliorer les performances énergétiques du bâtiment.

Les résultats obtenus ont montré que l'isolation thermique des parois a un impact significatif sur la réduction de la consommation énergétiques est sur le comportement du système d'alimentation en énergie électrique assurer par le système d'énergie renouvelable hybride.

**Mots-clés :** Systèmes d'énergie hybride autonome, Gestion d'énergie, système multi-source, optimisation PSO, efficacité énergétique, TRNSYS, isolation thermique des murs.

## Abstract

The work presented in this thesis aims to contribute to the energy management between the various sources of a hybrid energy system, in order to provide electricity to a home located on an isolated site and ensure its autonomy thanks to renewable energy sources. The multi-source system envisaged integrates solar panels, a wind turbine as main sources, as well as lead-acid batteries for energy storage.

First, we introduce a modeling of the various components of the multi-source energy system under MATLAB/Simulink. This step allowed us to optimally determine the size of the hybrid system. Optimization methods were considered to manage and optimize the energy of the system, in order to ensure its optimal operation while taking into account the constraints inherent to variable energy sources. Then, still in the same context of energy management, we examine the influence of the thermal insulation of the building envelope on the energy efficiency of the habitat and on the multi-source energy system. We use the "TRNSYS 18" software as a thermal simulation and evaluation tool in order to reduce the energy needs in heating/air conditioning and improve the energy performance of the building.

The results obtained showed that the thermal insulation of the walls has a significant impact on the reduction of energy consumption and on the behavior of the electrical energy supply system provided by the hybrid renewable energy system.

**Keywords:** Autonomous hybrid energy systems, Energy management, multi-source system, PSO optimization, energy efficiency, TRNSYS, thermal insulation of walls.

## ملخص

يهدف العمل المقدم في هذه الأطروحة إلى المساهمة في إدارة الطاقة بين المصادر المختلفة لنظام الطاقة الهجين، بهدف توفير الكهرباء لمنزل يقع في موقع معزول وضمان استقلاليتته بفضل مصادر الطاقة المتجددة. يدمج النظام متعدد المصادر الألواح الشمسية وتوربينات الرياح كمصادر أولية، بالإضافة إلى بطاريات الرصاص الحمضية لتخزين الطاقة.

أولاً، نقدم نمذجة المكونات المختلفة لنظام الطاقة متعدد المصادر باستخدام MATLAB/Simulink. أتاحت لنا هذه الخطوة تحديد حجم النظام الهجين بشكل مثالي. لقد تم أخذ أساليب التحسين في الاعتبار لإدارة قوة النظام وتحسينها، من أجل ضمان التشغيل الأمثل له مع مراعاة القيود الكامنة في مصادر الطاقة المتغيرة. بعد ذلك، وفي نفس سياق إدارة الطاقة، نقوم بدراسة تأثير العزل الحراري لغلاف المبنى على كفاءة استخدام الطاقة في المنزل وعلى نظام الطاقة متعدد المصادر. نستخدم برنامج "TRNSYS 18" كأداة للمحاكاة والتقييم الحراري من أجل تقليل احتياجات الطاقة للتدفئة/تكييف الهواء وتحسين أداء الطاقة في المبنى. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن العزل الحراري للجدران له تأثير كبير على تقليل استهلاك الطاقة وعلى سلوك نظام إمداد الطاقة الكهربائية الذي يوفره نظام الطاقة المتجددة الهجين.

لكلمات المفتاحية: أنظمة الطاقة الهجينة المستقلة، إدارة الطاقة، نظام متعدد المصادر، تحسين PSO، كفاءة الطاقة، TRNSYS، العزل الحراري للجدران.

## ***Remerciements***

Je remercie tout d'abord **ALLAH** le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme cette thèse.

Je formule mes chaleureux remerciements à mon directeur de thèse **M<sup>r</sup> MOSTEFAI Mohammed**, Professeur à l'Université Ferhat Abbas Sétif, qui a eu confiance en moi, en m'accepté comme doctorante et me donné l'opportunité de travailler sur une thématique fort intéressante et d'actualité qui est la gestion énergétique des systèmes hybride. Qu'il trouve ici, l'expression de ma profonde gratitude pour son appui scientifique et sa disponibilité à mes diverses sollicitations. Je le remercie vivement pour ses qualités scientifiques et sa personnalité exceptionnelle et son encouragement permanent. J'ai pris un grand plaisir à travailler avec lui.

Remerciements et profonde gratitude vont également à **M<sup>r</sup> RAHMANI Lazhar**, Professeur à l'Université de Sétif, d'avoir accepté de juger mon travail et de présider le jury de soutenance de cette thèse.

J'exprime également mes profonds remerciements à **M<sup>r</sup> MAOUEDJ Rachid**, Directeur de recherche à URERMS Adrar, qui ma donné l'opportunité d'effectuer un stage au sein de URERMS Adrar, et d'avoir accepté d'examiner cette thèse.

Je tiens à remercier tout particulièrement **Mr. ARIBI Sliman**, Professeur à universités Adrar pour avoir accepté d'examiner cette thèse. De même **Mr. LAYADI Toufik Madani**, Professeur à l'Université de Bordj Bou Arreridj qui nous a fait l'honneur de participer à ce jury.

Je remercie vivement **Mr BADOUD Abdessalem**, Professeur à l'universités Ferhat Abbas Sétif, d'avoir accepté de rapporter sur cette thèse

Je suis très reconnaissante a **M<sup>me</sup> ROUMMANI Khaira** attaché de recherche à URERMS Adrar, pour l'accueil chaleureux et pour m'avoir aider pour réaliser ce travail.

Je tiens à remercier également **M<sup>me</sup> AMARA Fatima**, Maître de conférence à l'Université d'Adrar, pour l'accueil chaleureux pour m'avoir aider tout au long de mon séjour à Adrar.

J'exprime mes plus sincères remerciements à tous **mes enseignants** qui ont contribué à ma formation tout au long de mon parcours scientifique et à toute personne m'ayant aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Un immense merci à ma famille, en particulier à ***mes parents*** , pour m'avoir soutenu non seulement durant ma thèse mais également tout au long de mes études. Un grand merci à mon frère ***Khallil***, pour tout le travail que tu as fait et ta bonne humeur quotidienne.

Enfin, J'adresse un remerciement tout particulier à ma sœur, ***Sihem*** qui a toujours fait preuve de compréhension envers moi lorsque je traversais de moments difficiles. Merci pour tes inconditionnels soutiens multiformes pour l'aboutissement de mes travaux.



## *Dédicace*

En premier lieu, nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la santé, pour achever ce travail dans les meilleures conditions.

Je dédie ce modeste travail en signe de reconnaissance à tous ceux que j'aime  
particulièrement :

A mes très chers parents dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

A mes adorables sœurs .

A mes frères.

Qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité  
Ainsi À mes neveux ANIS et en particulier à **Adam**, qui a apporté une joie indescriptible dans ma vie, je lui souhaite tout le meilleur et le bonheur.

A mes nièces TASNIME, AYA ,RACHA et AMANI,ZINEB ;

A tous ceux qui m'ont nourri de leur savoir.

## Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des acronymes

Introduction générale.....1

### Chapitre I: Contexte énergétique mondial et national

1.1.	Introduction.....	5
1.2.	Contexte énergétique mondial.....	5
1.2.1.	Demande mondiale d'électricité.....	5
1.2.2.	Consommation d'énergie mondial par secteur.....	6
1.2.3.	Emission CO2.....	7
1.2.4.	Capacité mondiale en énergies renouvelables.....	8
1.3.	Contexte énergétique en Algérie.....	9
1.3.1.	Production énergétique nationale (en Algérie).....	9
1.3.2.	Consommation d'énergie finale par produit.....	10
1.3.3.	Potentiel des énergies renouvelables en Algérie.....	11
1.3.3.1.	Potentiel Solaire .....	11
1.3.3.2.	Potentiel éolien.....	11
1.3.4.	Programme d'énergies renouvelables en Algérie.....	12
1.4.	Programme national pour l'efficacité énergétique : .....	13
1.4.1.	Domaine du bâtiment : .....	13
1.5.	Conclusion.....	13

### Chapitre II: Energie solaire & éolienne

2.1.	Introduction.....	15
2.2.	L'effet photovoltaïque.....	15
2.3.	Les cellules solaires.....	15
2.4.	Différents types de cellules solaires : .....	16
2.4.1.	Cellules mono- cristallines : .....	16
2.4.2.	Cellules poly-cristallines : .....	17
2.4.3.	Cellules amorphes : .....	17
2.5.	Association en série et en parallèle.....	18

2.5.1.	Association en série.....	19
2.5.2.	Association en parallèle.....	19
2.6.	Modélisation de la cellule PV .....	22
2.7.	Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques.....	23
2.8.	L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P(v)$ , $I(V)$ .....	24
2.9.	L'influence de la température sur la caractéristique $P(V)$ , $I(V)$ .....	25
2.10.	L'énergie éolienne.....	26
2.11.	Constitution d'une éolienne.....	26
2.11.1.	1 Rotor .....	27
2.11.2.	Nacelle :.....	27
2.12.	Types des éoliennes :.....	29
2.12.1.	Eolienne à axe vertical.....	29
2.12.2.	Eoliennes à axe Horizontal (Hawt) :.....	30
2.12.3.	Avantage et inconvénient des éolienne à axe vertical et horizontal .....	31
2.13.	Éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable.....	32
2.13.1.	Les éoliennes à vitesse constante.....	32
2.13.2.	Les éoliennes à vitesse variable :.....	32
2.13.3.	Avantage et inconvénients des éolienne à vitesse variable et fixe.....	32
2.14.	Éoliennes terrestres et en mer.....	33
2.15.	Puissance aérodynamique capturée par une éolienne et coefficient de puissance .	33
2.16.	Systèmes de stockage :.....	35
2.16.1.	Accumulateurs .....	37
2.16.2.	Les différentes technologies de batteries :.....	38
2.16.2.1.	Batterie Plomb-Acide (PbA) .....	38
2.16.2.2.	Batteries au lithium.....	39
2.16.2.3.	Batteries au nickel.....	40
2.16.3.	Comparaison techno-économique des technologies de batteries.....	41
2.17.	Conclusion.....	41

### **Chapitre III** Système d'énergie hybride

3.1.	Introduction.....	42
3.2.	Classification des systèmes hybrides.....	42
3.3.	Composants d'un SEH.....	43
3.4.	Configuration des SEHs.....	44

3.4.1.	Architecture à bus DC (courant continu) :	44
3.4.2.	Architecture à bus AC (courant Alternatif):	45
3.4.3.	Architecture à bus DC/AC (continu/alternatif) :	45
3.4.4.	Avantage /inconvénient de chaque topologie	46
3.5.	Mode de fonctionnement d'un SEH	47
3.6.	Gamme de puissance des SEHs	47
3.7.	Etudes des structures des systèmes hybrides	48
3.8.	Etude de cas	48
3.8.1.	configuration du système hybride	49
3.8.2.	Modélisation énergétique du système multi-source (SMS)	49
3.8.2.1.	Modélisation du générateur photovoltaïque	49
3.8.2.2.	Modélisation du générateur éolienne	50
3.8.2.3.	Banc de stockage	51
3.8.2.4.	Modèle énergétique du banc de stockage	52
3.8.3.	Stratégie de gestion du système	53
3.8.4.	modélisation sous MATLAB/Simulink du système	54
3.8.5.	Situation géographique d'Adrar	54
3.8.6.	Conditions climatiques à Adrar	54
3.8.6.1.	Acquisition des données météorologique	55
3.8.7.	Bilan énergétique et profil de consommation	59
3.8.7.1.	Puissances actives des équipements et besoin énergétique	59
3.8.7.2.	Profil de consommation jour de la semaine été	61
3.8.7.3.	consommation jour weekend	61
3.8.7.4.	consommation jour hiver	62
3.8.7.5.	consommation jour printemps/ automne	63
3.9.	Conclusion	63

## **Chapitre IV: Dimensionnement et critères d'optimisation**

4.1.	Introduction	64
4.2.	Dimensionnement des systèmes hybrides	64
4.3.	dimensionnement sans logiciel	65
4.3.1.	Méthode de dimensionnement traditionnelle des Systèmes hybride	65
4.3.2.	Méthode des moyennes mensuelles annuelles	66
4.3.3.	Méthode du mois le plus défavorable	66

4.4.	Logiciel de dimensionnement et critères d'optimisation.....	67
4.4.1.	HOMER.....	67
4.4.2.	RETScreen:.....	68
4.4.3.	PVSYST.....	69
4.4.4.	iHOGA/MHOGA-.....	70
4.5.	Conception et résolution d'un problème d'optimisation.....	71
4.5.1.	Problème d'optimisation.....	71
4.5.2.	Variables du problème.....	71
4.5.3.	Espace de recherche .....	72
4.5.4.	Fonction objectif.....	72
4.5.5.	Les contraintes.....	72
4.6.	Algorithmes d'optimisation.....	73
4.6.1.	Algorithme génétique (GA).....	73
4.6.2.	L'optimisation par essaim de particules PSO (Particle Swarm Optimization) ...	74
4.6.2.1.	Paramètres de l'algorithme PSO.....	75
4.7.	Critère d'optimisation d'un système hybride.....	77
4.7.1.	Optimisation du coût:.....	78
4.7.1.1.	Minimisation des coûts énergétiques (EC )Energy cost.....	78
4.7.1.2.	Minimisation du coût actuel net Net present cost minimization (NPC).....	78
4.7.2.	Optimisation technique.....	79
4.7.2.1.	Probabilité de perte d'alimentation électrique Loss of Power Supply Probability (LPSP) 79	
4.7.2.2.	Probabilité de perte de charge: Loss of Load Probability (LOLP).....	80
4.7.2.3.	Coût du cycle de vie: Life Cycle Cost (LCC).....	80
4.7.3.	Minimiser les émissions de carbone .....	81
4.8.	Optimisation par Algorithme PSO de notre système hybride (PV/éolien) autonome	81
4.8.1.	Dimensionnement optimal par PSO.....	81
4.8.2.	Fonction objectif.....	82
4.8.2.1.	Coût actuel net global (TNPC):.....	83
4.8.2.2.	Coût du kilowattheure d'énergie (EC):.....	84
4.8.2.3.	Modèle de fiabilité (technique).....	84
4.8.3.	Contrainte:.....	85
4.9.	Résultat de simulation.....	85
4.9.1.	Bilan énergétique de la configuration choisie.....	87

4.9.2.	Etat de charge de la batterie SOC .....	88
4.9.3.	Validation des résultat par algorithme génétique.....	89
4.9.4.	Estimation de la durée de vie de la batterie pour les différentes configuration obtenus	90
4.9.4.1.	Définition Pratique De Rainflow.....	90
4.9.5.	Résultat de simulation sous MATLAB/ Simulink de l'algorithme Rainflow ....	93
4.9.5.1.	Calcul du dommage. ....	93
4.9.5.2.	Résultat de simulation.....	93
4.10.	Conclusion.....	95

## **Chapitre V: Efficacité énergétique**

5.1.	Introduction.....	96
5.2.	Objectif du chapitre.....	96
5.3.	L'efficacité énergétique.....	97
5.4.	Consommation d'énergie en Algérie par secteur du bâtiment.....	98
5.5.	Efficacité énergétique des bâtiments.....	98
5.6.	Performance énergétique du bâtiment & étiquette.....	101
5.6.1.	la certification et la labellisation internationales .....	101
5.7.	Catégorie des constructions à efficacité énergétique.....	104
5.7.1.	Conception bioclimatique.....	104
5.7.2.	L'éco construction, eco-Home.....	104
5.7.3.	Les maisons Basse consommation.....	105
5.7.4.	bâtiment passif.....	105
5.7.5.	Les habitations à énergie positive ou économe en énergie.....	105
5.7.6.	Les habitations autonomes ou zéro-énergie.....	106
5.8.	Les réglementations thermiques Algérienne.....	106
5.9.	Classification thermique des communes d'algerie.....	107
5.10.	Modes de transfert de chaleurs dans le mur .....	108
5.10.1.	Le transfert par conduction.....	108
5.10.2.	Le transfert par convection.....	108
5.10.3.	Le transfert par rayonnement.....	109
5.11.	Grandeurs caractéristiques :.....	109
5.11.1.	le flux thermique : $\phi$ .....	110
5.11.2.	La conductivité thermique : $\lambda$ .....	110

5.11.3.	La résistance thermique d'un matériau : R.....	110
5.11.4.	La déperdition d'une paroi (coefficient de transmission thermique): U.....	111
5.12.	Amélioration de l'efficacité énergétique bâtiments.....	112
5.12.1.	solution passive.....	112
5.12.2.	solution active.....	113
5.12.3.	Amélioration du comportement des occupants:.....	114
5.13.	Enveloppe d'un bâtiment et isolation thermique.....	114
5.13.1.	position de isolation thermique.....	114
5.13.2.	Catégories d'isolants thermiques :.....	116
5.14.	Les isolants couramment employés.....	116
5.14.1.	Isolants minéraux :.....	116
5.14.2.	Isolants synthétiques :.....	117
5.14.3.	Isolants végétaux :.....	117
5.14.4.	les surfaces vitrées :.....	118
5.15.	Contribution à l'amélioration énergétique du système étudié.....	119
5.15.1.	Outil de simulation énergétique utilisé.....	119
5.16.	Donnée climatique par Meteonorm d'Adrar.....	120
5.16.1.	Situation géographique et climat wilaya d'Adrar.....	121
5.16.2.	Température journalière par Meteonorm.....	121
5.16.3.	Durée d'insolation.....	122
5.17.	Plan de la maison.....	122
5.18.	Simulation sous TRNSYS.....	123
5.19.	Construction de la maison sous TRNBuild.....	123
5.20.	Enveloppe de l'habitat (détail de construction).....	124
5.21.	les fenêtres.....	125
5.22.	1 <sup>er</sup> scénario impact de l'isolation thermique intérieure des murs sur l'énergie consommée (chauffage/climatisation).....	125
5.23.	2 <sup>eme</sup> scénario impact de l'utilisation des double vitrage (chauffage /climatisation) 127	
5.24.	3 <sup>eme</sup> scénario impact de l'isolation des parois + le double vitrage.....	129
5.25.	Impact de l'isolation thermique du bâtiment sur la durée de vie de la batterie.....	130
5.26.	Conclusion.....	132
<b>Conclusion générale &amp; perspective.....</b>		<b>134</b>
<b>Bibliographie</b>		

# *Liste des figures*

## *Chapitre I*

Figure I.1 Consommation mondiale d'électricité	6
Figure I.2: Consommation finale totale par source d'énergie	7
Figure I.3 Émissions de CO <sub>2</sub> par pays	8
Figure I.4 Production électricité par type de source énergie renouvelable	9
Figure I.5: Production d'énergie primaire	10
Figure I.6 Consommation finale par produit	10
Figure I.7 Carte de l'Irradiation Globale Directe Annuelle Moyenne ( 2002-11)	11
Figure I.8 Carte du Vent Annuel (2001-10)	12
Figure I.9 Parc Algérien des énergies renouvelables installées à la fin 2023	13

## *Chapitre II*

Figure II.1 Cellule photovoltaïque	16
Figure II.2 Cellules mono- cristallines	17
Figure II.3 Cellule poly-cristalline	17
Figure II.4 Cellule amorphe.	18
Figure II.5 Caractéristique I(v) d'une association Ns cellule en serie	19
Figure II.6 Caractéristique I(v) d'une association de Np cellules en parallèle	20
Figure II.7 : (a) Architecture d'un panneau (PV) avec diodes de protections. (b) Défaillance d'une cellules du PV et activation de la diode bypass	21
Figure II.8 Association série-parallèle avec des diodes d'isolation et de Bypass	21
Figure II.9 Caractéristique I(v) de Ns/Np cellules avec diodes de protections	21
Figure II.10 Schéma équivalent d'une cellule PV	22
Figure II.11 Effet de l'éclairement sur la caractéristique I(V), P(V)	24
Figure II.12 Effet de la température sur la caractéristique P(V), I(V)	25
Figure II.13 Diagramme de conversion d'énergie cinétique du vent	26
Figure II.14 Structure d'une éolienne	27
Figure II.15 Constitution d'une éolienne	28
Figure II.16 Eolienne à axe vertical: type Darrieus /type Savonius	30
Figure II.17 Eolienne à axe horizontal	30
Figure II.18 Eolienne en mer et terrestres	33
Figure II.19 Démonstration loi de Betz	33
Figure II.20 Ratio des puissances éoliennes en fonction du rapport des vitesses du vent	34



en amont et en aval de la turbine éolienne

Figure II.21 Classement des systèmes de stockage d'énergie	36
Figure II.22 Principe de fonctionnement d'une cellule électrochimique	37
Figure II.23 Prix des packs et des cellules entre 2013 et 2022	40

### ***Chapitre III***

Figure III.1 Classification des systèmes de production hybrides.	43
Figure III.2 Architecture à bus DC	45
Figure III.3 Architecture à bus AC	46
Figure III.4 Architecture à bus DC/AC	46
Figure III.5 Schéma synoptique du système étudié	49
Figure III.6 Différent modèle de la batterie	51
Figure III.7: Organigramme gestion d'énergie du système	53
Figure III.8 Station météorologique (NEAL) URERMS Adrar	55
Figure III.9 Température moyenne °C/Jour (Janvier)	56
Figure III.10 Humidité relative %/Jour (Janvier)	56
Figure III.11 Vitesse moyenne (m/s)/Jour (Janvier)	57
Figure III.12 Rayonnement (Kwh/m <sup>2</sup> )/Jour (Janvier)	57
Figure III.13 Température moyenne °C/Jour (Juillet)	58
Figure III.14 Vitesse moyenne (m/s)/Jour (Juillet)	58
Figure III.15 Rayonnement (Kwh/m <sup>2</sup> )/Jour (Juillet)	59
Figure III.16 Profils de consommation journalière saison été pour l'habitat résidentiel	61
Figure III.17 Profils de consommation jour weekend saison été pour l'habitat résidentiel	62
Figure III.18 Profils de consommation journalière saison hiver pour l'habitat résidentiel	62
Figure III.19 Profils de consommation journalière saison printemps /automne pour l'habitat résidentiel	63
Figure III.20 Profils de consommation journalière pour (4 saisons)	63

### ***Chapitre IV***

Figure IV.1 Méthode de dimensionnement des systèmes hybride	65
Figure IV.2 Résolution problème par HOMER pro	68
Figure IV.3 Etapes d'analyse avec le logiciel RETScreen	68
Figure IV.4 Le flux de travail RETS	69

Figure IV.5 Algorithmes d'optimisation	73
Figure IV.6 Principe de fonctionnement Algorithme Génétique	74
Figure IV.7 Principe de fonctionnement Algorithme PSO	77
Figure IV.8 Dimensionnement optimale du notre system hybride par algorithme PSO	82
Figure IV.9 Bilan énergétique mensuel par le système hybride choisi	86
Figure IV.10 Pourcentage d'énergie fournie par le photovoltaïque et l'éolienne par/ an	87
Figure IV.11 Bilan énergétique de la configuration choisie	88
Figure IV.12 Etat de charge de la batterie configuration du SEH choisi	88
Figure IV.13 Exemple de comptage de paires de rang	92
Figure IV.14 Procédure générale de calcul de la durée de vie en fatigue dans le domaine temporel	92
Figure IV.15 Etat de charge de la batterie SOC	94
Figure IV.16 Histogramme Rainlow	94

### ***Chapitre V***

Figure V.1 Décomposition de l'intensité énergétique primaire par secteur 2011	97
Figure V.2 Bilan Energétique national par secteur année2023	98
Figure V.3 Concept et normes du bâtiment durable	101
Figure V.4 Historique de création de labels	103
Figure V.5 Mode de transfert de chaleur	108
Figure V.6 Mode de transfert de chaleur au niveau de l'enveloppe bâtiment	109
Figure V.7 Pertes de chaleur d'une maison individuelle non isolée	112
Figure V.8 Stratégie d'amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment	112
Figure V.9 Emplacement de l'isolateur thermique.	115
Figure V.10 Catégorie des isolateurs thermique.	116
Figure V.11 Types d'isolants minéraux.	116
Figure V.12 Types d'isolants synthétique.	117
Figure V.13 Types d'isolants végétaux.	118
Figure V.14 Rubrique et interface dans une fenêtre	118
Figure V.15 Situation géographique de la wilaya d'Adrar	121
Figure V.16 Température journalière de la wilaya d'Adrar par meteonorm	121
Figure V.17 Durée d'insolation de la wilaya d'Adrar (meteonorm)	122
Figure V.18 Plan de la maison étudié	123
Figure V.19 Modélisation sous TRNSYS de la maison étudié	123

Figure V.20 Modélisation sous TRNbuild de la maison étudié	124
Figure V.21 (a) Besoin énergétique en chauffage 1 <sup>er</sup> scénario	127
Figure V.21 (b) Besoin énergétique en climatisation 1 <sup>er</sup> scénario	127
Figure V.22 (a) Besoin énergétique en chauffage 2 <sup>eme</sup> scénario	128
Figure V.22 (b) Besoin énergétique en climatisation 2 <sup>eme</sup> scénario	128
Figure V.23 (a) Besoin énergétique en chauffage 3 <sup>eme</sup> scénario	129
Figure V.23 (b) Besoin énergétique en climatisation 3 <sup>eme</sup> scénario	129
Figure V.24 (a) Etat de charge cas sans isolation	131
Figure V.24 (b) Etat de charge cas après isolation	131

# ***Liste des Tableaux***

## ***Chapitre II***

Tableau II.1.Rendement des différentes technologies des cellules photovoltaïques	18
Tableau II.2 : Avantages et inconvénients de l'électricité solaire photovoltaïque	24
Tableau II.3 Avantage et inconvénient des éolienne à axe vertical et horizontal	31
Tableau II.4 Avantage inconvénient des éoliennes à vitesse variable / fixe	33
Tableau II.5 Caractéristiques techniques des différents types de batteries	41

## ***Chapitre III***

Tableau III.1 Avantage /inconvénient de chaque topologie	47
Tableau III.2 classement par gamme de puissance du SEH	47
Tableau III.4 structures des systèmes hybrides	48
Tableau III.5 Coordonnées géographiques ville Adrar	54
Tableau III.6 Bilan de puissance de la charge	60

## ***Chapitre IV***

Tableau IV.1 Avantages et les inconvénients de chaque logiciel:	71
Tableau IV.2 Coût de chaque générateur du système SEH	85
Tableau IV.3 Résultat de simulation par algorithme PSO du système SEH	86
Tableau IV.4 Résultat de simulation par algorithme PSO et algorithme génétique GA	89
Tableau IV.5 estimation de la durée de vie de la batterie pour différente configuration	95

## ***Chapitre V***

Tableau V.1 label de performance énergétique des bâtiments	103
Tableau V.2 Exemple de zonnage climatique de quelque Wilaya d'Algerie	107
Tableau V.3 : Coefficient transfert thermique U des parois de l'habitat.	124
Tableau V.4 : Coefficient des vitrages (simple et double)	125
Tableau V.5 : Conductivité thermique des isolants	125

## *Abréviations et acronymes*

ONU: Organisation des Nations unies

STEP: Stations de transfert d'énergie par pompage

IEA: Agence internationale de l'énergie.

APS: Scénario des promesses annoncées.

NZE: Zéro émission nette (Net zero emissions).

BNE: Bilan énergétique national.

SEH: Système d'Energie Hybride

SoH: Etat de santé (State of health).

SOC: Etat de charge (State of charge).

DOD: profondeur de décharge (Depth of Discharge)

SMS: système multi-source.

HOMER: Hybrid Optimization Model for Electric Renewable.

NREL: National Renewable Energy Laboratory.

PVSYST: PhotoVoltaic (PV) System (SYST).

iHOGA: improved Hybrid Optimization by Genetic Algorithms.

HOGA Hybrid Optimization by Genetic Algorithms.

PSO: Optimisation par essaims particulaires (Particle swarm optimization).

GA: genetic algorithm.

NPC: coût actuel net.

EC: Energy cost.

TAC: Le coût annuel total(the total annualized cost).

CRF: Le facteur de récupération des capitaux (the capital recovery factor).

ACC: Le coût du capital annualisé (the annualized capital cost).

ARC: le coût de remplacement (the annualized replacement cost).

AMC: le coût de maintenance (the annualized maintenance cost).

LPSP: Probabilité de perte d'alimentation électrique Loss of Power Supply Probability

LOLP: Probabilité de perte de charge: Loss of Load Probability.

LCC: Life Cycle Cost.

LUEC : coût unitaire actualisé de l'électricité (levelized unit electricity cost)

TNPC Le coût actuel net global (Total Net Present Cost).

SOC: état de charge (Stat of charge).

MEPS :Minimum Energy Performance Standard.

OCDE: Organisation de coopération et de développement économiques.

GRC (Glass Reinforced Concrete).

EPS Polystyrène expansé (Expanded polystyrene).

XPS Polystyrène extrudé.

DPE: diagnostic de performance énergétique.

Passiv-Haus: maison passive (Passive house)

BBC Effinergie (Bâtiment Basse Consommation).

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design).

BREEAM(Building Research Establishment Environmental Assessment Method).

HQE: Haute Qualité Environnementale.

BCA Green Mark Building and Construction Authority Green Mark.

ECS: eau chaude sanitaire.

DTR: Document Technique Réglementaire.

LDV: laine de verre.

LDR: laine de roche.

## ***Notation & symboles***

$G_{tot}, \beta$  : le rayonnement global reçu par le panneau incliné [ $W/m^2$ ].

$P_{PV}$  : la puissance maximale fournie par le panneau [ $W$ ].

$S_{PV}$  : la surface du panneau [ $m^2$ ].

$\eta_{PV}$  : le rendement global du panneau.

$G_{NOCT}$  : le rayonnement dans des conditions de fonctionnement normales [ $800W/m^2$ ].

$T_{amb}$  : la température ambiante de l'air [ $^{\circ}C$  ou  $K$ ].

$T_{ambNOCT}$  : la température ambiante de l'air dans des conditions de fonctionnement normales [ $^{\circ}C$  ou  $K$ ].

$T_c$ : la température de la cellule [ $^{\circ}C$  ou  $K$ ].

$T_{cref}$ : la température de la cellule dans des conditions standard de référence [ $25^{\circ}C$  ou  $K$ ].

$T_{cNOCT}$ : la température de la cellule dans des conditions de fonctionnement normales [ $^{\circ}C$  ou  $K$ ].

$\alpha_{PV}$  : le coefficient de variation de la puissance produite par le panneau en fonction de la température [ $^{\circ}C^{-1}$  ou  $K^{-1}$ ].

$\eta_{v_{PV}}$  : facteur de dégradation.

$\eta_{PVref}$  : le rendement de référence du panneau dans des conditions standard de référence

$\rho$  densité de l'air au moyeu de la turbine [ $\text{Kg/m}^3$ ].

$V$  vitesse du vent [ $\text{m/s}$ ].

$S_{wt}$  surface balayée par le rotor de l'éolienne [ $\text{m}^2$ ].

$C_p$ : rendement de la turbine.

$\eta_{gb}$ : rendement du variateur de vitesse.

$\eta_g$  : rendement de la génératrice.

$P_{ld}(t)$  : la puissance demandé par la charge à l'instant  $t$ .

$\Delta t$  : pas de simulation.

$\eta_{inv}$ ,  $\eta_{acdc}$  et  $\eta_{dcde}$  : rendements respectifs des convertisseurs DC/AC, AC/DC, et DC/DC.

$\eta_{cha}$  et  $\eta_{dis}$  : rendements de la charge / décharge de batterie.

$\eta_{wr}$  pertes dans les câbles et les connexions.

$U_{bus}$  tension nominale du bus continu.

$N_{Bat}$  : Le nombre total de batteries ;

$N_{Bats}$  : Le nombre de batteries connectés en série ;

$N_{Batp}$  : Nombre de batteries connectés en parallèle ;

$\lambda$ : la conductivité thermique ;

$\Delta T$ : l'écart de température et

$e$ : l'épaisseur de la paroi.

# Introduction Générale



Dans la plupart des nations avancées, d'importantes transformations sont en cours dans les systèmes électriques. Ces modifications proviennent de la libéralisation du industrie de l'électricité et de la croissance des ressources renouvelables au sein du mélange énergétique.

Au cours des dernières décennies, le peuple humain a pris conscience du problème du réchauffement climatique. La majorité des pays ont alors adopté des mesures pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre et, de manière plus générale, les gaz contaminants (à tel que du Protocole de Kyoto, de la politique « Europe 20-20-20 »).

Cette situation conduira à une croissance davantage plus significative de la génération d'électricité non centralisée. On peut qualifier ces fournisseurs comme étant des générateurs d'électricité non centralisée. L'énergie renouvelable a constamment été présente dans les systèmes de distribution, néanmoins son impact sur l'opération du réseau n'a pas toujours été significatif en raison de son ampleur limitée.[1]

Ces ressources vertes présentent de nombreux atouts, comme leur caractère inaltérable et leur empreinte environnementale nettement inférieure à celle des sources d'énergie conventionnelles.

Toutefois, en raison de leur dépendance aux conditions météorologiques et de leur localisation, elles présentent un défaut significatif qui est leur caractère intermittent. Cette nature intermittente réduit leur performance énergétique quand elles sont utilisées de manière isolée, d'où la nécessité de recourir à des installations multi-énergétiques (à multiples sources) intégrant diverses sources d'énergies renouvelables (éolienne, énergie solaire, biomasse, géothermique, etc).[2]

Divers installations énergétiques ont été élaborés, tels que les systèmes énergétiques autonomes, les systèmes énergétiques interconnectés, les systèmes énergétiques à source unique et à multiples sources.

Pour minimiser l'empreinte écologique, réduire les coûts opérationnels et traiter les soucis de entretien tout en répondant aux défis liés à la limitation de l'augmentation de la consommation, les scientifiques adoptent une approche corrective. Celle-ci implique l'élaboration d'un système mixte. L'émergence d'un tel infrastructure en matière de modélisation, simulation et optimisation a suscité un vif intérêt, entraînant une croissance significative de l'ensemble des les études au vingtième siècle.

Effectivement, pour satisfaire le besoin en électricité des « petites villes hors réseau », un grand nombre de scientifiques ont exploré l'option d'une hybridité. Ils envisagent une

association entre les installations de génération hybrides utilisant des énergies renouvelables locales (éolien, solaire ,hydroélectrique...) et les générateurs diesel.[3]

Les systèmes photovoltaïques et éoliens, grâce à leur solidité, leur commodité de conception et leur moindre charge d'entretien, se sont révélés être plus adaptés à l'hybridation que plusieurs modalités de génération d'énergie renouvelable, comme l'ont démontré diverses recherches.

La présente thèse porte sur un SERH autonome incluant un système de génération d'énergie éolienne et photovoltaïque ainsi qu'un dispositif de stockage.

## Objectifs

Les travaux de cette thèse ont pour objectif de proposer un système énergétiques hybrides adaptés aux contraintes des zones rurales. tout en garantissant l'autonomie énergétique de l'habitat individuel. La vision est de proposer un modèle énergétique flexible et reproductible qui promeut un développement durable et inclusif, adapté aux réalités locales et aux défis des communautés rurales algérienne et d'Africaine, pour favoriser l'autonomie énergétique et élever le bien-être de ces collectivités.[4]

Le travail se penche sur l'étude et l'optimisation d'une installation mixte de génération d'énergie électrique à partir de sources renouvelables qui consistent aux énergies solaire et éolienne, et assurer une gestion efficace de la production électricité et garantir la stabilité opérationnelle à partir de ces différentes sources tout en minimisant l'utilisation de stockage conventionnel. Bien que cette approche ne permette pas une production électrique zéro émission, elle représente une solution économiquement viable et fiable, relevant le défi de maintenir une fourniture d'énergie constante malgré les variations climatiques. Néanmoins, l'utilisation de solutions de stockage basées sur des batteries coûteuses et à durée de vie restreinte demeure essentielle pour compenser la nature intermittente des énergies renouvelables.

La thèse vise également à élaborer une approche de gestion de l'énergie pour le installation hybride intégrant le solaire, l'éolien et la batterie de stockage, dans le but de contrôler le flux d'énergie dans ce dispositif et d'améliorer son rendement énergétique.

L'efficacité énergétique s'est soudainement imposée comme un enjeu crucial de notre ère, et les immeubles en constituent un des éléments principaux. « Ils dépensent plus d'énergie que n'importe quel autre domaine, contribuant par conséquent largement au réchauffement climatique. » Des de nombreuses de nouvelles constructions seront érigées sans tenir compte

de l'efficacité énergétique et des millions de structures existantes qui exploitent trop d'énergie.[5]

Dans le cadre de cette recherche sur l'efficacité énergétique des bâtiments, notre travail de thèse vise à perfectionner la performance énergétique de l'habitations individuelle étudiée et à diminuer leur consommation d'énergie liée au chauffage et à la climatisation en améliorant l'enveloppe du résidence.

afin d' atteindre ces objectifs, nous avons suivi les démarches suivantes :

- Modélisation mathématique du système hybride (SERH) autonome sous MATLAB/Simulink

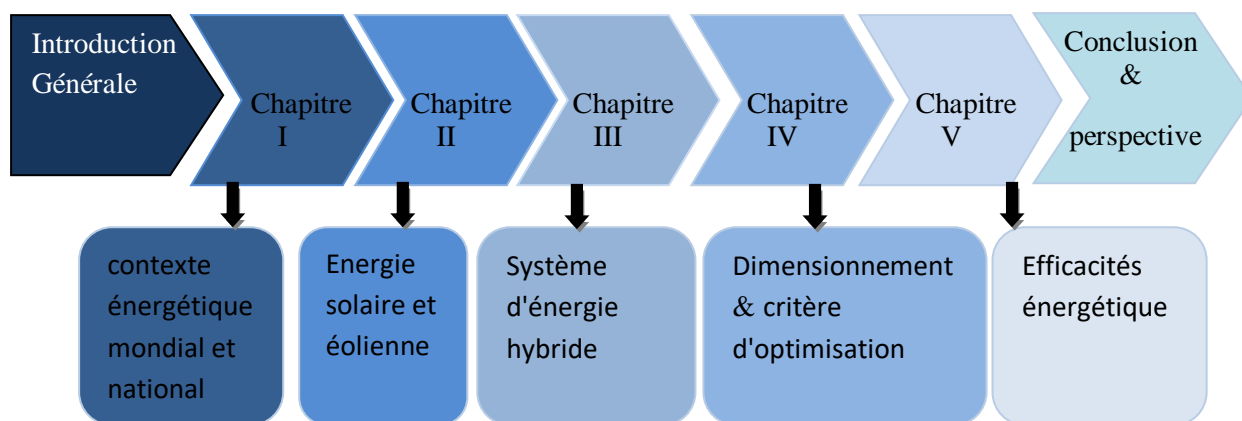
- Dimensionnement et optimisation du système mixte (PV/Wind) autonome s'appuyant sur des l'algorithmes d'optimisation (PSO et GA)a fin d'optimiser le coût de génération de l'électricité du système (SERH) étudié.

- Mise en œuvre d'une approche de gestion de charge/ décharge pour assurer une bonne exploitation du batterie.

- Amélioration de l'efficacité énergétique du système (SERH) autonome grâce à la maximisation de l'efficacité énergétique de l'habitat. cette partie de l'étude s'appuie sur l'outil de modélisation thermique dynamique du bâtiment TRNSYS.

Organisation de la thèse

Les objectifs de cette thèse seront traités à travers cinq chapitres.



Le 1<sup>er</sup> chapitre décrit la situation énergétique à l'échelle mondiale et en Algérie en soulignant la nécessité de substituer les énergies fossiles par l'intégration d'énergies

renouvelables. Ce chapitre positionnera également le secteur du bâtiment dans la consommation mondiale.

Le deuxième chapitre offre une vue d'ensemble théorique sur diverses sources d'énergies renouvelables, comme l'énergie solaire et l'énergie du vent, ainsi que sur les différentes techniques associées à ces deux types de ressources énergétiques. et diverses technologies utilisées dans la conservation de l'énergie.

Le troisième chapitre a pour but d'exposer les systèmes multi-sources (hybrides) et leurs diverses catégories, en soulignant la nécessité de leur application, tout en détaillant les différentes sections qui peuvent constituer un système hybride. Puis, la modélisation distincte de divers sous-systèmes en utilisant des équations mathématiques, du SEH examiné dans cette thèse. Nous commençons par la modélisation et la simulation du système photovoltaïque, de la turbine éolienne, puis le système de stockage reposant sur des batteries plomb-acide dans l'environnement MATLAB/Simulink.

Dans le chapitre quatre, la taille du système est définie en fonction d'un profil de charge adapté à une habitation résidentiel dans une zone rurale de la région d'Adrar. De plus, l'évaluation des ressources d'énergie renouvelable solaire et éolienne dans la ville d'Adrar, utilisée comme exemple, est effectuée. Plus tard, une conception optimale du système hybride solaire/éolien autonome en tant que source d'énergie sur le site sélectionné est proposée.

Ce chapitre traite également des notions générales des techniques d'optimisation à objectif unique et multiple, en mettant l'accent sur les méthodes employées dans nos recherches, telles que le PSO et le GA. De plus, il aborde la formulation des problèmes discutés tout au long de ce manuscrit. En se basant sur l'approche de "probabilité de perte de puissance" (LPSP) et le "coût énergétique".

Le chapitre cinq se consacre à l'analyse de l'efficacité énergétique des bâtiments. Il s'agit d'une analyse par simulation thermique du logement de notre cas d'étude, visant à évaluer la nécessité et la répercussion de l'amélioration de l'efficacité énergétique de l'habitat sur le système SEH. Via l'outil de simulation TRNSYS /TRNbuild.

Les constatations de simulation obtenus grâce à des outils comme TRNSYS/TRNbuild et MATLAB/SIMULINK mettent en lumière nos stratégies de gestion du système autonome hybride (PV/Éolien). On discute et on commente les résultats de diverses stratégies.

Une conclusion synthétisant les travaux présentés dans cette thèse est formulée suivie de quelques perspectives retenues sur la base des travaux réalisés dans cette thèse.

# Chapitre I

## *Contexte énergétique mondial et national*

## 1.1. Introduction

Les énergie renouvelables sont désormais une option essentielle pour générer de l'électricité aux lieux isolés qui ne peuvent pas être raccordés au réseau d'électricité. Par conséquent, au fil des dernières années, cette option a gagné en popularité active dans le domaine de la construction, visant à diminuer la dépendance envers le réseau électricité traditionnel et à réduire l'usage de sources fossiles.

Dans cette section, nous examinons la contexte énergétique globale en analysant la fabrication et l'usage de l'énergie à travers les divers secteurs. Nous détaillons aussi la fabrication d'électricité basé sur diverses sources renouvelables, en fournissant les statistiques les plus récentes sur leur répartition dans le monde. Nous mettons aussi en lumière la capacité des énergies renouvelables, particulièrement en Algérie.

De plus, nous traitons la question du bâtiment, qui constitue une portion significative de la consommation mondiale d'électricité, en détaillant comment il peut participer à la gestion de l'énergie.

## 1.2. Contexte énergétique mondial

Au commencement du 21ème siècle, les conséquences environnementales associées à la consommation d'énergie humaine ont commencé à apparaître : épuisement des d'énergie primaire, réchauffement climatique, pollution, ainsi de suite. Par conséquent, l'humanité a réalisé le problème écologique associé à l'expansion du mode de vie et a conceptualisé l'idée du développement durable. La Commission de l'ONU sur l'environnement et le développement a donné la explication du développement durable en 1987, qui est la suivante : Satisfaire les exigences actuelles sans compromettre la capacité des générations à venir à subvenir à leurs propres besoins. On doit répondre aux exigences énergétiques de l'humanité de façon judicieuse et instaurer des normes et des actions pour atténuer l'impact des actions humaines sur le changement climatique.[6]

### 1.2.1. Demande mondiale d'électricité

On s'attend à ce que la consommation globale d'électricité se rapproche du double d'ici 2050, passant de 26 000 TWh à 50 000 TWh en 2023. Entre 2023 et 2035, on prévoit une augmentation moyenne de près de 1 000 TWh par an, ce qui représente l'équivalent d'ajouter la consommation électrique d'un Japon supplémentaire chaque année.

Plus de 45 % de l'expansion mondiale totale est attribué uniquement à la Chine (Figure I.1). L'électrification du secteur énergétique chinois s'est faite à un rythme particulièrement soutenu, l'électricité représentant 11 % de la consommation finale en 2000 et atteignant 26 %

en 2023. Un des facteurs explicatifs majeurs est l'utilisation intensive de l'électricité dans le domaine du bâtiment. La hausse des revenus a entraîné une expansion accélérée de l'électroménager, un doublement notable du besoin pour la climatisation, sans oublier que le chauffage domestique a également été progressivement électrifié.[7]

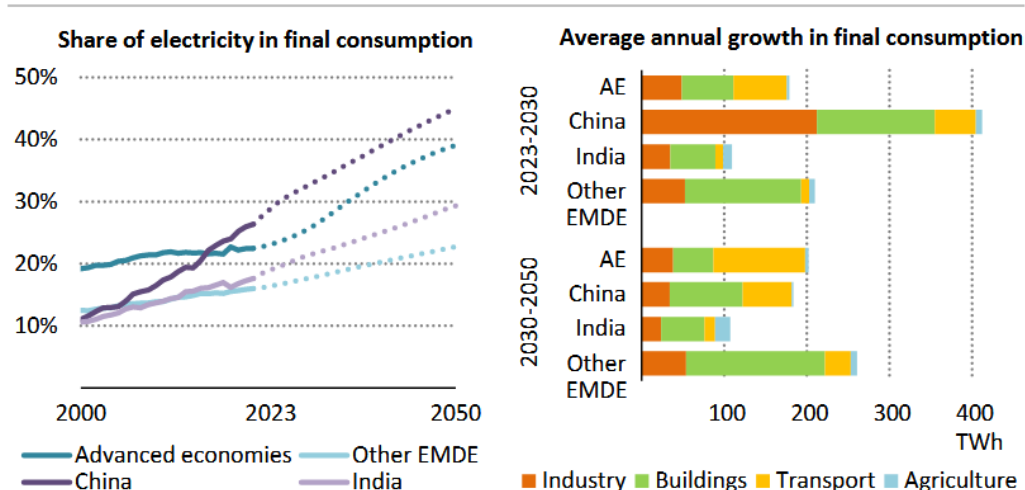


Figure I.1 Consommation Mondiale d'électricité. [7]

### 1.2.2. Commande d'énergie mondiale par secteur

Actuellement, l'absorption finale d'énergie à l'échelle mondiale s'élève à 445 exajoules (EJ). Dans le cadre du scénario STEPS (Stated Policies Scenario), elle augmente constamment pour surpasser 530 EJ d'ici à 2050. Dans les scénarios APS (Announced Pledges Scenario) et NZE (Net Zero Emissions), on observe une diminution de la consommation finale totale (Figure I.2). Dans l'APS, elle est inférieure de 3 % aux niveaux de demande prévus d'ici à 2035, et dans le scénario NZE, elle l'est de 15 %. Dans l'APS, l'amélioration de l'efficacité énergétique freine la hausse absorption malgré une croissance continue du qualité de vie, grâce à des objectifs additionnels de rénovation, une électrification plus étendue, des standards d'économie de carburant renforcés dans le secteur des transports et des avancements plus rapides en termes d'efficacité dans l'industrie.

Dans le scénario NZE, on constate que les avancées en aspect d'efficacité énergétique d'un an sur l'autre. sont plus que multipliés par deux d'ici 2035 : cela est le résultat d'une électrification accélérée et d'un déclin rapide de la consommation traditionnelle de biomasse, qui est principalement substituée par des sources plus performantes comme le GPL "gaz de pétrole liquéfié" et l'électricité. Les modifications de comportement ont aussi un impact.[7]

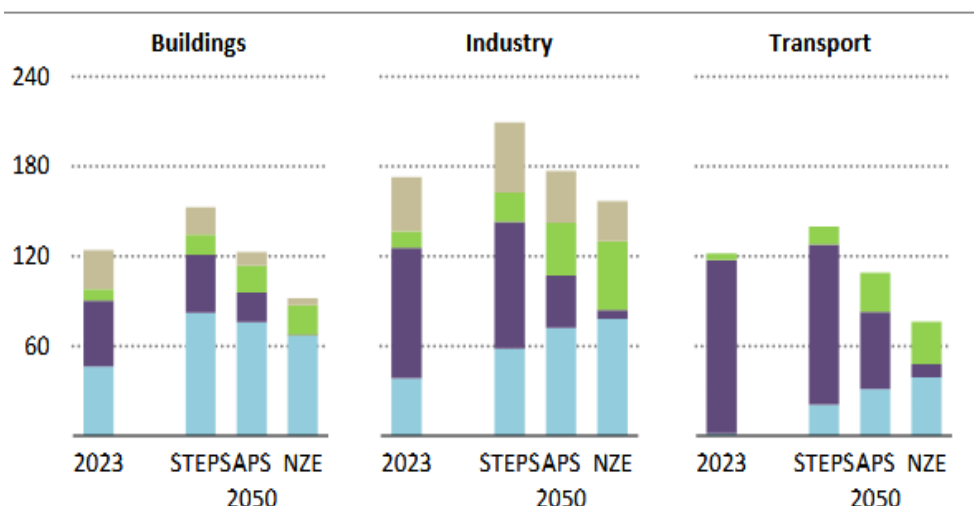


Figure I.2: Consommation finale totale par source d'énergie dans certains secteurs choisis selon les trois scénarios, pour les années 2023 et 2050. [7]

Dans tous les scénarios et domaines, l'électrification progresse rapidement, fournissant chauffage, climatisation et mobilité, alimentant des moteurs et divers équipements, tout en générant de l'hydrogène électrolytique pour l'industrie lourde sur place. Dans le scénario STEPS, la proportion de l'électricité dans la consommation finale globale grimpera de 50% d'ici à 2050. Dans le cadre du scénario APS, elle double, tandis que dans le scénario NZE, elle triple presque. Ce dernier cas se produit lorsque les énergies fossiles non atténuées sont substituées rapidement par de l'électricité issue de sources propres. En plus de l'exploitation directe des énergies renouvelables, y compris la bioénergie moderne, le solaire thermique et géothermique, et l'hydrogène à faibles émissions ainsi que les combustibles hydrogène. Selon le scénario STEPS, la proportion de combustibles fossiles non réduits devrait baisser d'ici 2050 relativement à son stade actuel 30 %. Dans le cadre du scénario APS, cette diminution pourrait dépasser les 65 %, tandis que dans le scénario NZE, elle pourrait atteindre jusqu'à 95%. Dans les domaines où la réduction est complexe, tels que l'aviation et le transport maritime, on estime que les biocarburants et les fuels à faibles émissions pourraient substituer près de 50 EJ de combustibles fossiles d'ici 2050 dans le cadre du scénario NZE.[7]

### 1.2.3. Emission CO2

Dans tous les scénarios, les émissions de CO2 culminent avant 2030, mais leur taux de diminution postérieure varie grandement. Selon le scénario STEPS, on observe une réduction de 1 % des émissions par an entre 2030 et 2050, avec une diminution annuelle de 3 % en Chine, où les émissions finissent par se stabiliser à environ la moitié de leur niveau actuel d'ici 2050 (Figure I.3). Dans le contexte du scénario APS, on observe une réduction annuelle



de 4 % des émissions mondiales, tandis que dans le cadre du scénario NZE, cette diminution s'élève à 15 % par an, soit trois fois plus rapide que la baisse constatée en 2020 en raison de la pandémie de Covid-19. Selon le parcours STEPS, il est prévu que la température moyenne augmente de 2,4 degrés Celsius (°C) d'ici à l'an 2100.[7]

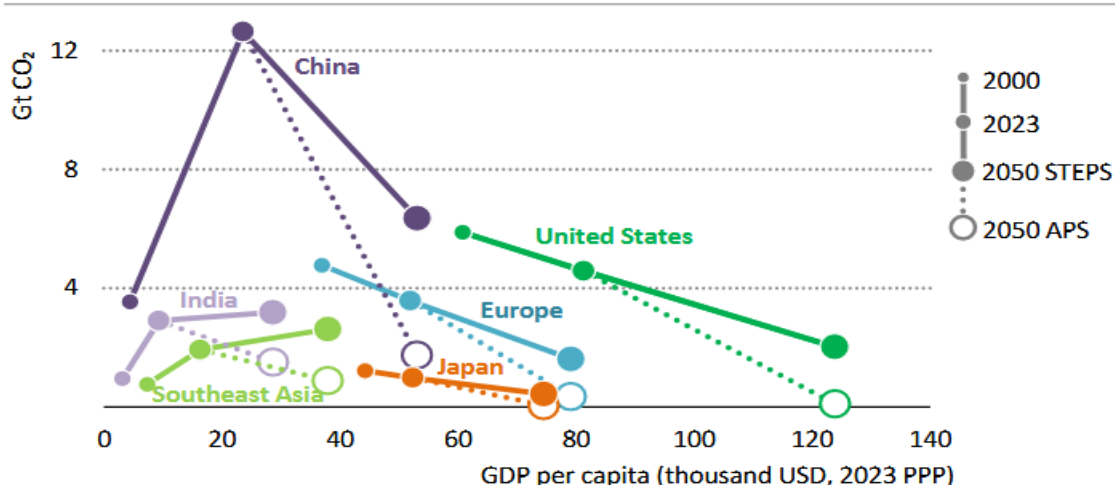


Figure I.3 Émissions de CO2 par pays. [7]

#### 1.2.4. Capacité mondiale en énergies renouvelables

La capacité à l'échelle mondiale en énergies renouvelables en 2023 a grimpé à un nouveau record de 3 870 GW, marquée par une progression annuelle notable de 13,9%, équivalent à une augmentation nette de 473 GW. Cette expansion a été largement influencée par l'Asie, qui a contribué à 69% des nouvelles capacités grâce principalement aux technologies solaire et éolienne. Ces deux sources d'énergie combinées ont représenté 98% des augmentations, ce qui permet aux énergies renouvelables de constituer 86% de la croissance totale de la capacité énergétique mondiale. Le solaire, représentant 37% de la capacité totale avec 1 419 GW, a conduit l'évolution, soutenu par l'hydroélectricité et l'éolien qui ont respectivement produit 1 268 GW et 1 017 GW. Pendant ce temps, d'autres sources telles que la bioénergie, la géothermie et l'énergie marine ont conjointement contribué avec 165,5 GW, diversifiant le panorama des énergies.[4]

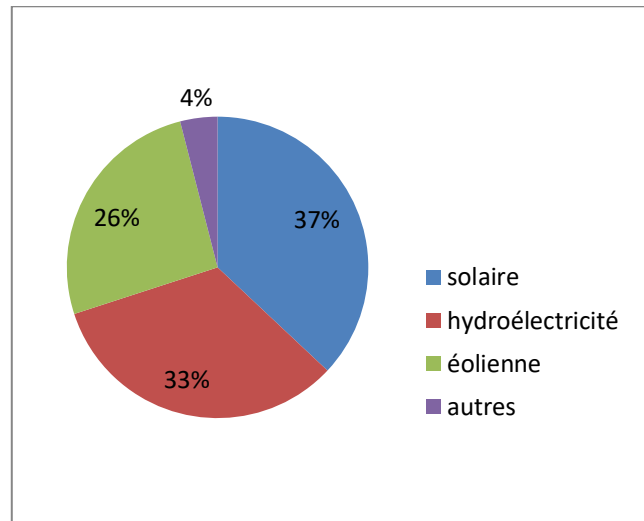


Figure I.4 Production électricité par type de source énergie renouvelable

### 1.3. Contexte énergétique en Algérie

#### 1.3.1. Production énergétique nationale (en Algérie)

En 2023, la génération commerciale d'énergie primaire a grimpé à 170,3 millions de tonnes équivalent pétrole, marquant une augmentation de 3,0% comparativement à la production de 2022, qui s'était établie à 165,4 millions de tonnes équivalent pétrole.

L'élévation de la production a été stimulée par l'élévation de la production de tous les produits.

Pour ce qui est de la génération d'énergie primaire renouvelable, s'est élevée à 723 GWh, enregistrant une augmentation (6,1%) par rapport à 2022.

En dépit de cette augmentation, le pourcentage d'électricité produit depuis de sources renouvelables demeure très faible, ne franchissant pas la barre du 1% de la production nationale d'électricité, est majoritairement administrée par le gaz naturel pour un taux atteignant les 99%. Comme le montre le graphique ci-dessous, Le gaz naturel, qui constitue 59% de la génération d'énergie fondamentale commerciale, domine largement. Il est suivi par le pétrole, qui en représente 30%.[8]

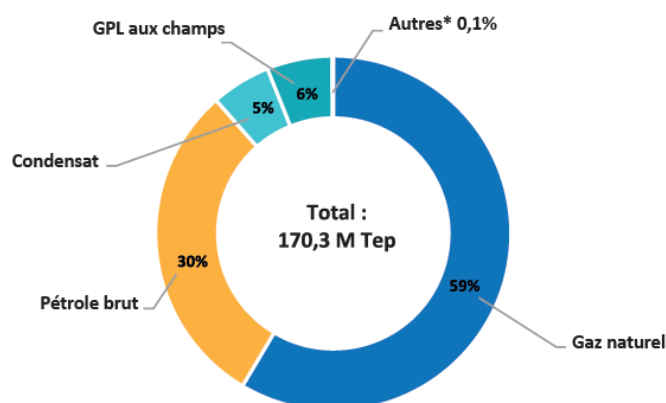


Figure I.5: Production d'énergie primaire. [8].

### 1.3.2. Consommation d'énergie finale par produit

En 2023, l'usage finale d'énergie a arrivé 54,2 M Tep, comparé à 53,1 M Tep en 2022, soit une progression de 2,1% due à l'augmentation de la consommation tous sorte de produits énergétiques, à l'exclusion du gaz naturel.

L'utilisation totale de gaz naturel a enregistré une baisse (2,1%) pour se fixer à 19,0 M Tep. Cette baisse a été principalement due à la réduction des besoins des abonnés de Sonelgaz, en particulier ceux du secteur résidentiel (-6,3%), suite à un hiver doux qui a entraîné un usage réduit du gaz naturel pour le chauffage.

L'usage final d'électricité a connu une augmentation de 3,8%, passant de 16,2 millions de Tep en 2022 à 16,8 millions de Tep en 2023. Cette hausse est due principalement à l'accroissement des besoins des ménages (5,2%), particulièrement pendant la saison estivale lorsque le pays a été confronté à une chaleur extrême sans précédent affectant une large portion du territoire, du nord au sud.[8]

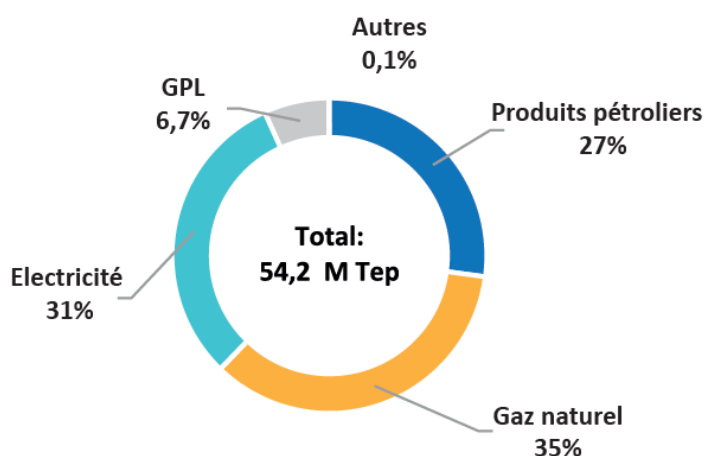


Figure I.6 consommation finale par produit. [8]

### 1.3.3. Potentiel des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie joue un rôle majeur en tant que producteur de pétrole et de gaz. Toutefois, presque toute sa production d'énergie électrique est issue des centrales fonctionnant au gaz naturel, comme le montre la figure I.6. En 2015, la nation a révisé son plan d'évolution des ressources vertes et de l'efficacité énergétique jusqu'à 2030, en se concentrant principalement sur l'expansion à grande échelle des "énergies renouvelables", telles que les installations solaires photovoltaïques et les fermes éoliennes terrestres. L'objectif est de diversifier les moyens de génération d'électricité verte.[6]

#### 1.3.3.1. Potentiel Solaire :

L'Algérie détient l'un des gisements solaires les plus significatifs à l'échelle mondiale en raison de son emplacement géographique,. Dans presque toutes les régions, l'exposition au soleil excède 2000 heures par an et peut atteindre jusqu'à 3900 heures (surtout dans le Sahara et les hauts plateaux).

À peu près 3 KWh/m<sup>2</sup> d'énergie est collectée chaque année sur une superficie horizontale de 1m<sup>2</sup> au nord, tandis qu'au Grand Sud, elle dépasse 5,6 KWh/m<sup>2</sup>.

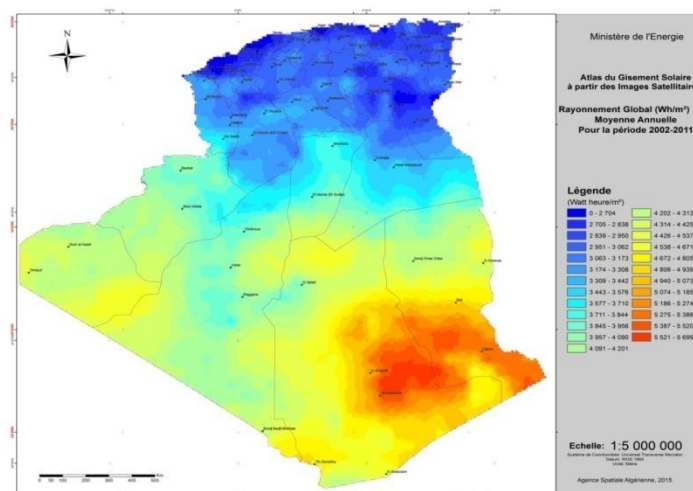


Figure I.7 Irradiation Directe Globale Moyenne /An ( 2002-2011) [8]

#### 1.3.3.2. Potentiel éolien

Le potentiel éolien en Algérie fluctue grandement selon les lieux. C'est essentiellement attribuable à une topographie et des situations météorologiques extrêmement changeantes. Effectivement, Notre vaste territoire se partage en deux régions géographiques distinctes et bien délimitées. Le Nord méditerranéen, caractérisé par un côtoiement de 1200 km et un relief montagneux, est mis en évidence par les deux massifs montagneux : l'Atlas tellien et l'Atlas saharien.

Ces derniers sont entrecoupés de zones humides et de hauts plateaux au climat tropical. Quant au Sud, il est caractérisé par un climat de style saharien.

Le graphique ci-dessous montre que la région sud enregistre des vitesses plus élevées comparativement à la partie nord, notamment dans le Sud-Est où les vitesses atteignent 7m/s et dépassent même les 8m/s aux alentours de Tamanrasset (In Amguel). [8]

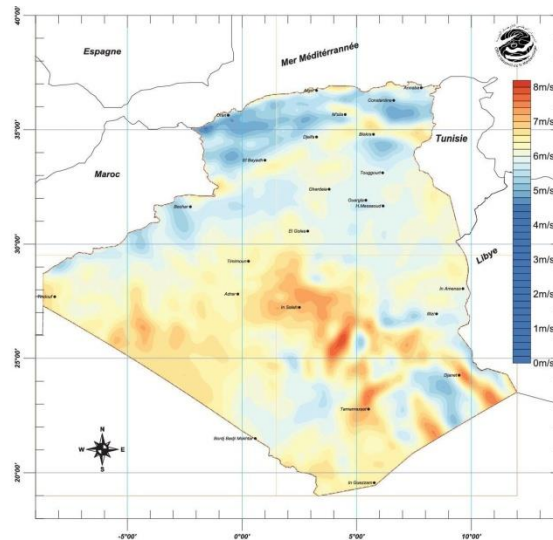


Figure I.8 Carte du Vent Annuel (2001-2010)[8]

#### 1.3.4. Programme d'énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie, par le biais de son politique d'énergies renouvelables, ambitionne de se positionner en tant qu'acteur majeur dans la génération d'électricité à travers les productions photovoltaïque et éolienne.

A fin 2023, le parc national des énergies renouvelables hors hydroélectricité, évalué à 472MW, est constitué de 89.9% d'installations raccordées au réseau (ON-Grid) et 10.1% d'installations hors réseau

L'énergie solaire photovoltaïque est la première source de production à partir des énergie renouvelable avec une capacité totale de 436.8MW dont 388.95MW(82.4%) raccordée au réseau (PV ON-Grid) et 47.85MW(10.1%) hors réseau (PV OFF-Grid).Le solaire thermique (CSP) et l'éolien représentent 5.3% et 2.2% des énergies renouvelables hors hydroélectricité, respectivement, soit des capacités de 25MW et 10.2MW.

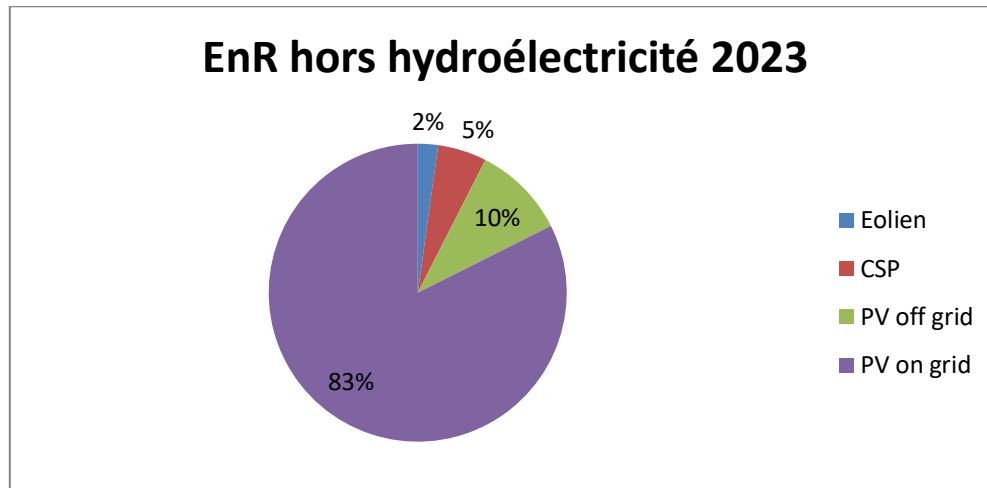


Figure I.9 Parc Algérien des énergies renouvelables installées à la fin 2023 [8]

#### 1.4. Stratégie nationale pour l'efficacité énergétique :

L'initiative d'efficacité énergétique reflète l'engagement de l'Algérie à encourager une exploitation strictement judicieuse de l'énergie tout en recherchant des solutions aide à sauvegarder les ressources et standardiser l'usage bénéfique, efficiente.

Ce plan envisage la concrétisation de stratégies d'efficacité énergétique pour 3 domaines fondamentaux : le bâtiment, le transport et l'industrie. De plus, il encourage l'établissement des entreprises locaux de fabrication des ampoules à haute performance, de chauffe-eaux solaires et d'isolants thermiques grâce à la promotion des investissements locaux ou étrangers.[8]

##### 1.4.1. Domaine du bâtiment :

Ce programme vise à encourager l'utilisation de technologies et de techniques innovantes pour l'isolation thermique des immeubles, qu'ils soient existants ou neufs. Durant l'étape de l'élaboration architecturale des résidences, on mettra en œuvre les mesures nécessaires.

Il est aussi question de favoriser l'utilisation répandue d'équipements et de dispositifs efficaces sur l'industrie local, comme les chauffe-eau solaires et les ampoules à faible consommation : le but portant à maximiser le confort domestique tout en diminuant la consommation énergétique.[8]

#### 1.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons énuméré les divers enjeux énergétiques globaux en détaillant le contexte énergétique à l'échelle internationale et nationale. Nous avons présenté la génération d'électricité issue de diverses natures ainsi que la consommation dans divers

secteurs, spécialement le domaine du bâtiment qui constitue une proportion significative de consommation à l'échelle mondiale et locale.

Le plan gouvernemental d'efficacité énergétique, qui est crucial dans le domaine énergétique national surtout dans le domaine du bâtiment, joue un rôle significatif dans la vision globale de l'Algérie concernant d'efficacité énergétique. Il favorise spécifiquement la transition vers des bâtiments à faible consommation énergétique.

# Chapitre II

## *Energie solaire* *& éolienne*



### **2.1. Introduction**

L'adoption croissante des énergies renouvelables à travers le monde s'explique par leurs bénéfices économiques et environnementaux importants. Ces sources d'énergie sont inépuisables (elles ne produisent pas de gaz à effet de serre, contribuent à la lutte contre le réchauffement global), elles représentent une solution accessible et écologique ; c'est une réponse appropriée à l'exigence énergétique en pleine expansion. Plus précisément, les énergies renouvelables constituent une alternative séduisante pour électrifier les endroits éloignés ou qui sont difficiles d'accès.

### **2.2. L'effet photovoltaïque**

L'expression grecque « photovoltaïque » se traduit par « lumière ». Il est constitué de 2 éléments : « photos » (lumière) et "Volta" le nom du physicien italien 'Alessandro Volta', qui a créé en 1800 la première pile électrique, l'unité de tension électrique porte son nom, volt.

Quand un matériau semi-conducteur est soumis à la lumière solaire, les atomes récepteurs de ce rayonnement sont « assaillis » par les photons qui composent la lumière ; en réponse à cette agression lumineuse, les électrons situés dans les couches électroniques supérieures ont tendance à être « détachés ».

Si l'électron rejoint son état d'origine, l'agitation de celui-ci se manifeste par une élévation de température du matériau. le mouvement du photon se convertit en énergie thermique.

Toutefois, dans le cas des cellules photovoltaïques, une portion des électrons ne regagne pas sa condition de départ. Les électrons « détachés » génèrent une faible tension de type continue. Ainsi, le mouvement en vitesse des photons est convertie en énergie électrique : c'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque.[9].

Le phénomène photovoltaïque, qui correspond à la génération d'électricité depuis la lumière, a été découvert en 1839 par Edmond Becquerel le physicien français. En 1950 les scientifiques des laboratoires Bell aux États-Unis ont achevés à inventer la 1er cellule photovoltaïque, qui est le composant fondamental d'un panneau photovoltaïque.[9]

### **2.3. Les cellules solaires**

Les cellules solaires photovoltaïques sont élaborées depuis une jonction PN au silicium, également appelée diode. On introduit du phosphore pour obtenir du silicium dopé N. Ce genre de dopage facilite la libération d'électrons (charge -) par le matériau.

On incorpore du bore pour obtenir du silicium dopé de type P. Dans ce scénario, le matériau génère aisément des vides électroniques dénommés trous (charge positive).

On obtient la jonction PN en dopant les deux côtés d'un morceau de silicium. Sous l'effet de la lumière du soleil, les atomes présents à la jonction libèrent des charges électriques opposées qui viennent s'accumuler de chaque côté de la jonction, créant ainsi un générateur électrique. [9]

Cela engendre donc une différence de potentiel entre les deux strates. On peut mesurer La différence de potentiel peut être mesurer entre les deux pôles positifs et négatifs de la cellule, celle-ci pouvant varier entre 0.3 V et 0.7 V selon le matériau employé. [10]

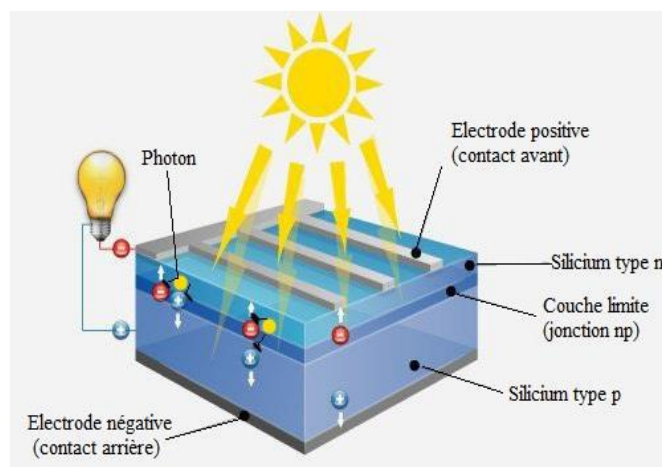


Figure II.1 Cellule photovoltaïque

## 2.4. Différents types de cellules solaires :

On distingue plusieurs sortes de cellules solaires photovoltaïques, chacune présentant un rendement et un coût qui lui sont spécifiques. Néanmoins, peu importe leur catégorie, leur performance demeure assez limitée : de 5 à 22% de l'énergie qui leur est transmise.

On distingue trois types majeurs de cellules.[9-11]:

### 2.4.1. Cellules mono- cristallines :

La cellule monocristalline la plus proche du modèle théorique : en réalité, cette cellule est constituée d'un unique cristal scindé en deux strates. Les cellules monocristallines offrent des rendements élevés, se situant entre 15 et 22 %.

- Cependant, ces cellules ont des désavantages :
- La méthode de fabrication est pénible et complexe, ce qui la rend très coûteuse.
- Obtenir un cristal pur nécessite une énorme d'énergie.

- Un délai de récupération pour l'investissement en énergie élevé (pouvant aller jusqu'à 7 ans).[9-11]



Figure II.2 Cellule mono- cristalline

### 2.4.2. Cellules poly-cristallines :

Plusieurs cristaux se forment lors du refroidissement du silicium dans une lingotière. L'apparence de la cellule photovoltaïque est bleutée, non homogène, on peut observer des formes formés par les divers cristaux.

Les cellules à base de silicium polycristallin sont définies par :

- Moins de coûts de production
- exige peu d'énergie.
- Le Rendement varier entre 13 % - 20 % en labo.



Figure. II.3 Cellule poly-cristalline.

### 2.4.3. Cellules amorphes :

L'apparition du silicium amorphe remonte à 1976. Il possède une structure atomique désordonnée et non cristallisée, cependant son facteur d'absorption est plus élevé que le silicium cristallin.

Toutefois, ce qu'il acquiert en capacité de captation, il le se dépense en matière de déplacement des charges électriques (faible efficacité de conversion).

- Le prix de production est considérablement réduit.
- Un rendement par module de 5 % et de 14 % en laboratoire.

- Opère dans des conditions de très faible luminosité.

Les avancées technologiques dans les nouveaux matériaux tels que le tellure de cadmium (CdTe), l'arséniure de gallium (GaAs) et le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) ont permis d'obtenir des cellules solaires avec un rendement de 38% en laboratoire.[9][11].



Figure II.4 Cellule amorphe.

Si l'efficacité de la cellule photovoltaïque est importante, la puissance produite par  $\text{cm}^2$  sera élevée. Le tableau II.1 présente les performances des diverses cellules. On peut recourir à des concentrateurs grâce à l'intégration de miroirs et de lentilles dans le panneau pour concentrer la lumière sur la cellule photovoltaïque. [12]

Matériau	Rendement max d'une cellule (labo)	Rendement typique module	Surface requise pour 1Kwc
Silicium monocristallin	24.7%	15%	$6.7\text{m}^2$
Silicium polycristallin	20.3%	14%	$7.2\text{m}^2$
Silicium amorphe	12.1%	6%	$16.7\text{m}^2$
Cuivre Indium Gallium Di- Selenide (CIGS)	20%	10%	$10\text{ m}^2$
Tellure de Cadmium (CdTe)	16.5%	7%	$14.3\text{ m}^2$
Cellules avec concentrateur	41.1%	28%	$3.36\text{ m}^2$

Tableau II.1.Rendement des différentes technologies des cellules photovoltaïques [12]

## 2.5. Association en série et en parallèle [12]

### Les modules solaires photovoltaïques

Pour élever la tension d'usage, les cellules photovoltaïques sont disposées en série.

Le module est généralement conçu pour une charge de 12 volts, ce qui fait qu'il comprendra typiquement 36 cellules. Par ailleurs, la délicatesse des cellules face à la rupture et à la corrosion nécessite une protection contre leur environnement, ce qui les conduit généralement à être encapsulées dans du verre ou dans un matériau plastique. On désigne cela par le terme de module photovoltaïque. Il est aussi possible de rattacher les modules en série et en parallèle pour accroître la tension et l'intensité d'emploi. [12].

### 2.5.1. Association en série

Afin d'accroître la tension d'un générateur photovoltaïque, il est nécessaire de relier en série un ensemble de  $N_s$  cellules. Ces cellules sont ensuite parcourues par le même courant et la caractéristique qui découle du regroupement en série est déterminée par la somme des tensions individuelles de chaque cellule (fig II.5). L'équation (II.1) synthétise les propriétés électriques d'un assemblage en série de  $N_s$  cellules.

$$V_{co}(N_s \text{ cellules}) = N_s * V_{co} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{Avec } I_{cc} = I_{cc}(N_s \text{ Cellules}) \quad (\text{II.2})$$

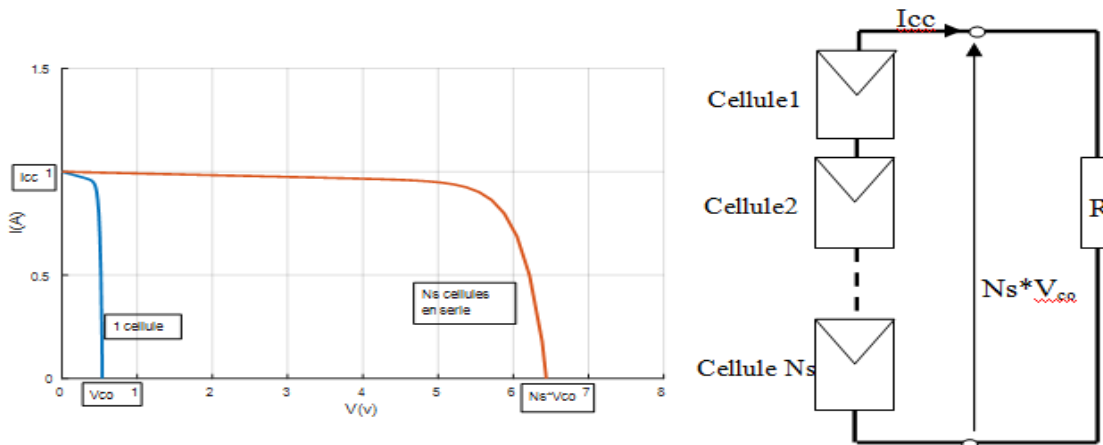


Figure II.5 Caractéristique  $I(v)$  d'une association  $N_s$  cellule en serie

### 2.5.2. Association en parallèle

Pour augmenter le flux de sortie d'un générateur photovoltaïque, il est indispensable de relier  $N_p$  cellules en parallèle. Dans un assemblage de cellules identiques reliées en parallèle, toutes les cellules sont exposées à la même tension et le comportement caractéristique de l'ensemble est déterminé par l'addition des courants (fig. II.6). L'équation (II.3) synthétise à son tour les propriétés électriques d'un assemblage parallèle de  $N_p$  cellules.

$$I_{cc}(N_p \text{ Cellules}) = N_p * I_{cc} \quad (\text{II.3})$$

$$\text{Avec } V_{co}(N_p \text{ Cellules}) = V_{co} \quad (\text{II.4})$$

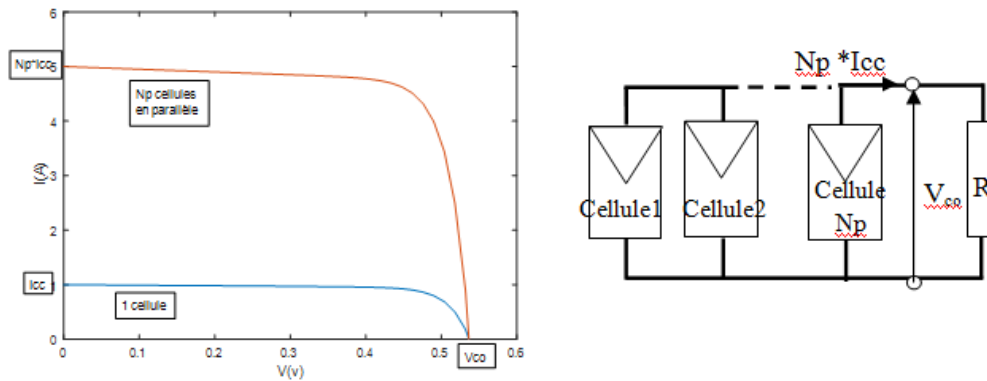


Figure II.6 Caractéristique  $I(V)$  d'une association de  $N_p$  cellules en parallèle

La mise en série ou en parallèle de cellules photovoltaïques  $N_s \times N_p$  permet d'illustrer la courbe  $I(V)$  d'un générateur photovoltaïque. De plus, cette caractéristique peut fluctuer selon l'exposition au soleil, la température, l'âge des cellules et les impacts de l'ombre. En outre, un simple masquage ou une détérioration d'une des cellules en série peut entraîner une baisse significative du courant solaire généré par le module photovoltaïque. Donc, une cellule faiblement illuminée génèrera un courant inférieur à celui qui est fourni et agit donc comme un élément récepteur. Elle se trouve donc à éliminer une quantité excessive d'énergie électrique qui pourrait conduire à sa destruction si le problème dure trop longtemps.

Il est nécessaire d'ajouter des dispositifs de protection électrique aux modules commerciaux afin de prévenir des défaillances dévastatrices dues à la combinaison de cellules en série et de panneaux en parallèle.

Pour assurer une longévité significative d'un système photovoltaïque destiné à générer de l'électricité sur plusieurs années, diverses protections sont mises en œuvre dans les installations actuelles. Voici les types suivants [12-13]

- Dans le cas où l'éclairement n'est pas uniforme et pour prévenir la formation de points chauds, il est nécessaire d'utiliser des diodes by-pass pour séparer le sous-réseau de cellules défectueuses (fig. II.7).
- Même si la cellule peut gérer un courant significatif, il est recommandé d'avoir une diode anti-retour. Cela évite également le gaspillage d'une partie de la puissance générée par les modules qui fonctionnent correctement, ou lorsque la connexion directe d'une charge peut passer du mode récepteur au mode générateur, comme c'est le cas pour une batterie durant la nuit.

- Pour empêcher le flux de courant d'une branche de modules vers une autre qui est en panne, l'emploi de diodes d'isolation s'avère indispensable (fig. II.8,9). Dans ce contexte, l'usage d'une diode de protection contre le retour n'est pas nécessaire. [12]

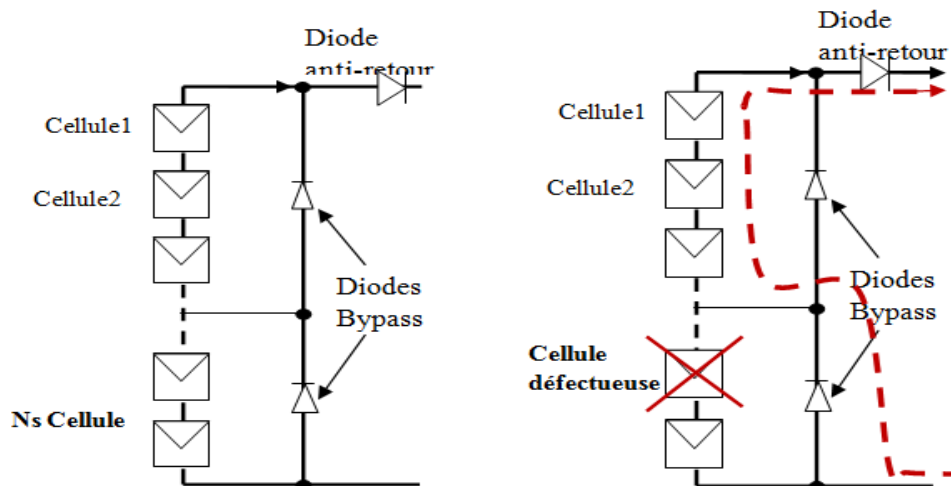


Figure II.7 : (a) Architecture d'un panneau (PV) avec diodes de protections. (b) Défaillance d'une cellules du PV et activation de la diode bypass

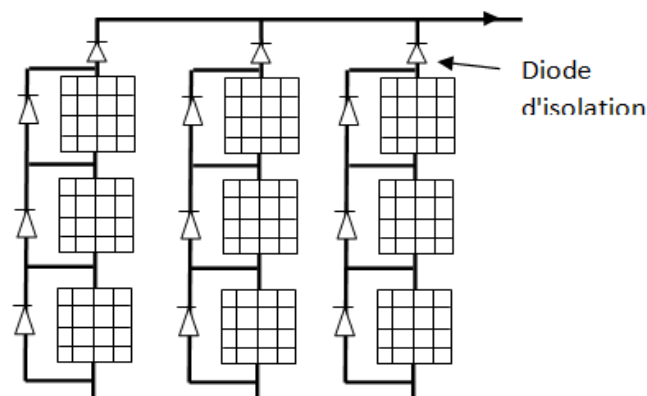


Figure II.8 Association série-parallèle avec des diodes d'isolation et de Bypass

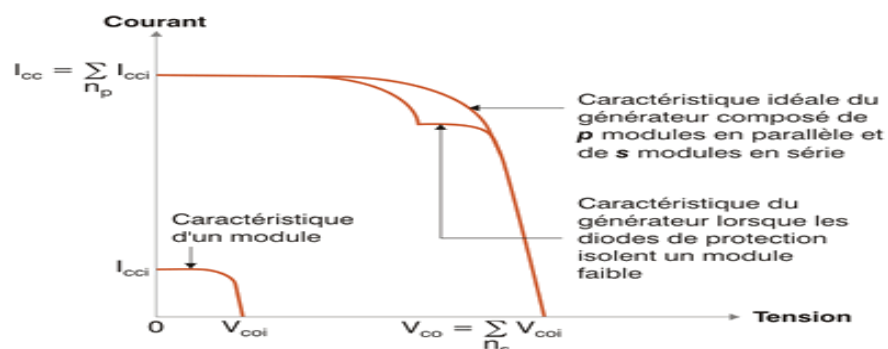


Figure II.9 Caractéristique I(v) de Ns/Np cellules avec diodes de protections [8-14]

### 2.6. Modélisation de la cellule PV

L'équation qui décrit le comportement statique de la jonction PN d'une diode traditionnelle peut être utilisée pour modéliser une cellule photovoltaïque. Ainsi, le schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle est représenté dans la figure II.10. Cette équation intègre le courant de court-circuit ainsi que les diverses résistances qui simulent les pertes liées à la connectivité. Dans un contexte statique, la dynamique d'une cellule photovoltaïque composée d'une jonction PN en silicium peut être illustrée par l'équation ci-après[10].

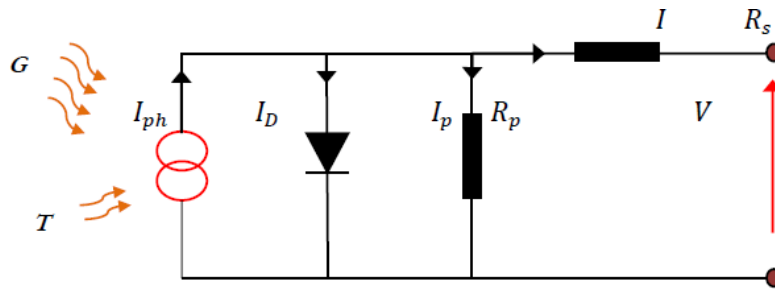


Figure II.10 Circuit équivalent cellule PV

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (II.5)$$

Avec

$I$ : courant généré par la cellule

$I_{ph} = I_{sc}(G/1000)$  : Le photo-courant dépendant de l'irradiation ( $G$ ). en rapport aussi au courant de court-circuit.

$I_p = (V + I.R_s)/R_p$  : Le courant dérivé par la résistance parallèle.

$I_d = I_0[\exp((V + I.R_s)/nVT) - 1]$  : Le courant traversant la diode.

$I_0$  : Le courant de saturation inverse d'une diode.

$VT = KT/e$  : La tension thermique.

Où :

$e$  : charge d'électron ( $1.602 \times 10^{-19} C$ ),

$K$  : constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23} J/K$ )

$n$ : Facteur de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 5 dans la pratique.

$T$ : La température effective de la cellule en kelvin.

À partir des équations précédentes, on peut dériver l'expression du courant produit par la cellule photovoltaïque :



$$I = I_{ph} - I_0 [\exp((V + I.R_s)/nVT) - 1] - (V + I.R_s)/R_p \quad (II.6)$$

### 2.7. Avantages /Inconvénients des systèmes photovoltaïques

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une ressource gratuite ainsi que son potentiel colossal dispersé à travers le monde,</li> <li>• Propreté pendant son utilisation,</li> <li>• Haute fiabilité,</li> <li>• Minimale besoin d'entretien,</li> <li>• Production très flexible (de milliwatts à mégawatts),</li> <li>• Utilisation indépendante et décentralisée.</li> <li>• Transformation directe en électricité.</li> <li>• Non-présence de pollution, bruit, d'émissions.</li> <li>• Entretien minimal (absence de pièces mobiles) ; • La longévité des modules est estimée à 20 ans.</li> <li>• Faible puissance (&lt; de 3-5 kWh/jour) garantissant une rentabilité.</li> <li>• La taille de l'installation peut être ajustée en fonction des besoins actuels, avec une option d'extension sur demande pour satisfaire la hausse demande énergétique.</li> <li>• Le danger de choc électrique est diminué en 12 ou 24 Vcc et le danger d'incendie est plus faible comparativement aux générateurs fonctionnant au kérosène ou au diesel.[12]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Émission diffuse de la lumière solaire nécessitant des surfaces étendues, Technologie onéreuse,</li> <li>• Taux de charge insatisfaisant,</li> <li>• Difficulté dans le stockage,</li> <li>• Complexité du recyclage des éléments du système,</li> <li>• Le prix initial des systèmes photovoltaïques est important, bien que leur rentabilité sur le long terme soit garantie.</li> <li>• Dans bon nombre d'installations, il est nécessaire de stocker l'électricité dans des batteries. Quant aux batteries :</li> <li>• elles nécessitent un entretien fréquent,</li> <li>• elles doivent être renouvelées à intervalles réguliers et peuvent influencer la performance des appareils .</li> <li>• Les installations photovoltaïques à faible puissance ont généralement besoin d'appareils en courant continu, de laquelle l'efficacité énergétique dépasse celle des appareils en courant alternatif, bien que leur prix soit habituellement plus élevé.</li> <li>• Les systèmes photovoltaïques de grande capacité nécessitent fréquemment une source d'énergie de secours (exp: l'éolien, le fuel) pour les moments de forte</li> </ul>

	consommation ou d'importante couverture nuageuse.[12]
--	--

Tableau II.2 : Avantages /Inconvénients de l'électricité solaire photovoltaïque  
**2.8. Influence de l'éclairement sur la caractéristique  $P(V)$ ,  $I(V)$**

La cellule photovoltaïque, qui repose sur une jonction PN, répond de manière distincte en fonction de l'énergie qu'elle capte.

Plus elle est alimentée en énergie, plus elle en libère, mais avec un rendement très faible qui tourne autour de 15%. Le graphique II.11. illustre la fluctuation des paramètres en fonction de différents niveaux d'exposition à la radiation, montrant un changement significatif du courant optimal.

Cela valide l'estimation généralement réalisée concernant le courant optimal fourni par un générateur photovoltaïque, qui est largement proportionnel au niveau de l'irradiation.

Nous observons également ouvert lors d'une diminution de la lumière une petite réduction de la tension en circuit. [10]

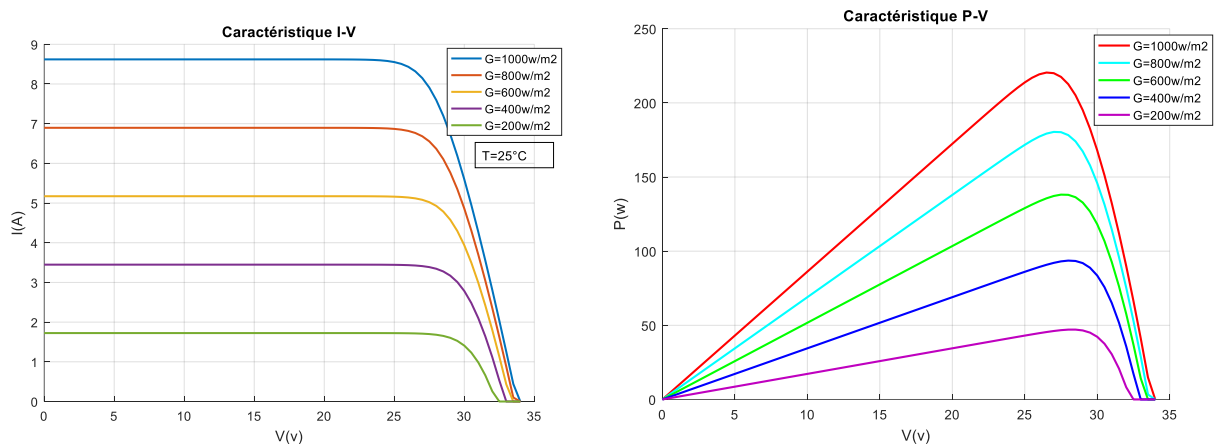


Figure II.11 Effet de l'éclairement sur la caractéristique  $I(V)$ ,  $P(V)$

Des fluctuations substantielles du niveau d'irradiation entraînent des modifications assez significatives du courant optimal. Tandis que, les fluctuations relatives de la tension optimale demeurent minimales.

- L'éclairement a un impact significatif sur la puissance maximale  $P_{max}$  : une diminution de l'éclairement entraîne une réduction de la puissance  $P_{max}$ .
- Le courant  $I_{opt}$  varie sensiblement en fonction de l'éclairement : tout changement d'éclairement entraîne une variation du courant  $I_{opt}$ .
- La tension  $V_{opt}$  change très peu en fonction de l'éclairement.

### 2.9. L'influence de la température sur la caractéristique P(V), I(V)

Les cellules photovoltaïques reposent sur une jonction PN comme fondement. Son efficacité fluctuera en fonction de la température de la jonction. l'équation courante pour les cellules solaires donne:

$$I_{sc} = I_0. \exp (eV_0 / K T) \quad (II.7)$$

La figure II.12 ci-dessous illustre que la tension en circuit ouvert d'un panneau solaire se réduit à mesure que la température de ce dernier augmente. L'échelle des pertes est approximativement de 2.3 mV /°C pour chaque cellule. Cependant, le courant de court-circuit connaît une légère augmentation en fonction de la température de la cellule (approximativement 0,05 % par degré Celsius).

L'image ci-dessous illustre parfaitement la diminution du rendement due à l'accroissement de la température sur la cellule.

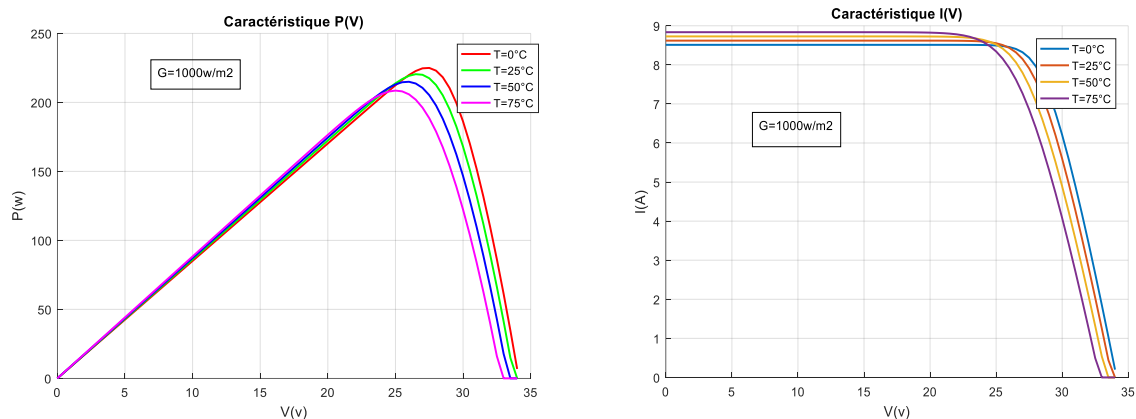


Figure II.12 Effet de la température sur la caractéristique P(V), I(V)

Il est observable dans la figure II.12 une réduction de la puissance maximale disponible avec l'augmentation de la température [10].

Quand la température s'élève de  $25^\circ\text{C}$  par rapport à la température ambiante et qu'un éclairage de  $1000 \text{ W/m}^2$  est appliqué, la puissance maximale se réduit et la tension  $V_{opt}$  varie.

### 2.10. L'énergie éolienne

Le vent est un phénomène naturel, généralement suscité par un réchauffement disparate de la planète dû à l'ensoleillement et à la rotation terrestre. On estime que la puissance totale de l'énergie éolienne sur notre planète atteint  $2.74 \cdot 10^9 \text{ MW}$ , dont près de  $2 \cdot 10^7 \text{ MW}$  pourrait être utilisée, soit dix fois plus que la puissance d'énergie exploitable fournie par l'eau

à l'échelle mondiale. L'énergie éolienne, en tant que source d'énergie renouvelable, a une longue histoire d'utilisation et son développement technologique est aujourd'hui avancé. [15]

Le terme « Énergie éolienne » désigne la technique d'utilisation du vent pour produire de l'énergie, soit sous forme mécanique, soit sous forme électrique.

L'expression « Énergie éolienne » fait référence à la méthode d'exploitation du vent pour générer de l'énergie mécanique ou électrique. L'éolienne transforme l'énergie cinétique présente dans le vent en énergie mécanique. Un générateur peut transformer cette énergie mécanique en électricité, ou elle peut être exploitée pour des opérations précises (comme moulin du grain ou pomper de l'eau).

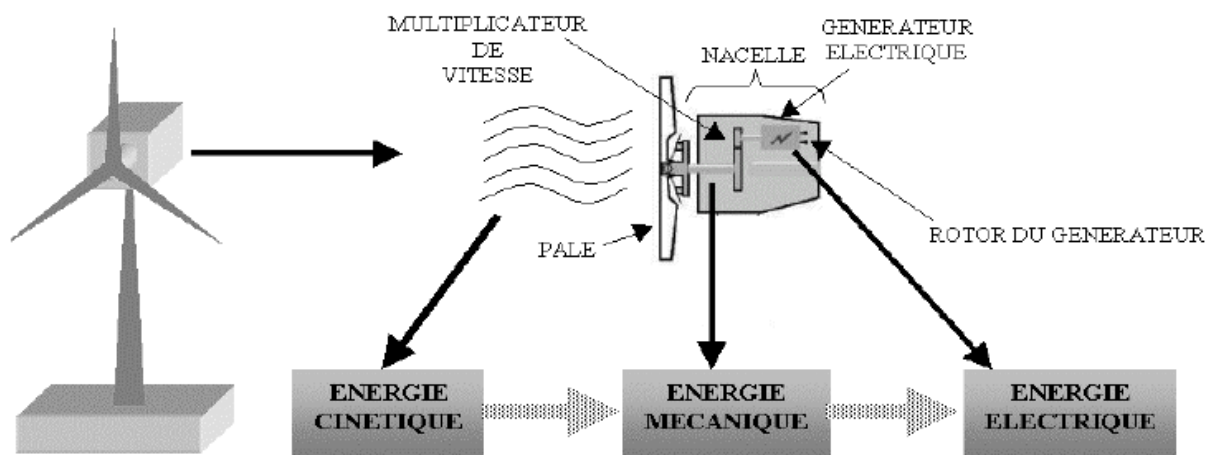


Figure II.13 Diagramme de conversion d'énergie cinétique du vent

### 2.11. Constitution d'une éolienne

Une éolienne se compose principalement de trois éléments majeurs : le rotor, la nacelle et le mât (ou tour).

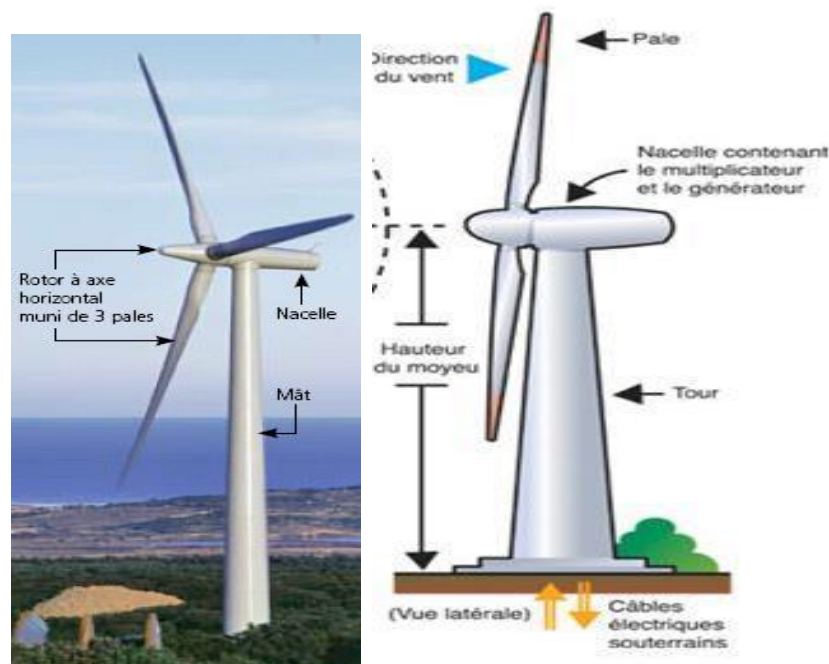


Figure II.14 Structure d'une éolienne

### 2.11.1.1 Rotor

Le rotor est composé de pales qui convertissent la force du vent en énergie mécanique. Les pales s'apparaissent d'une manière oblique au vent avec un angle de calage, se qui déclenche la rotation par un effet de tire-bouchon ou de vis.

Le rotor est constitué de pales qui convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique. ils sont positionnées de manière inclinée par rapport au vent, à un angle connu sous le nom d'angle de calage, ce qui entraîne leur rotation par un effet de tire-bouchon/ de vis.

### 2.11.2. Nacelle :

La nacelle contient l'arbre de transmission, le générateur électrique, le système de contrôle et le dispositif de refroidissement.

La coupe d'une nacelle ainsi que ses différents éléments sont illustrés dans la figure (II.15).

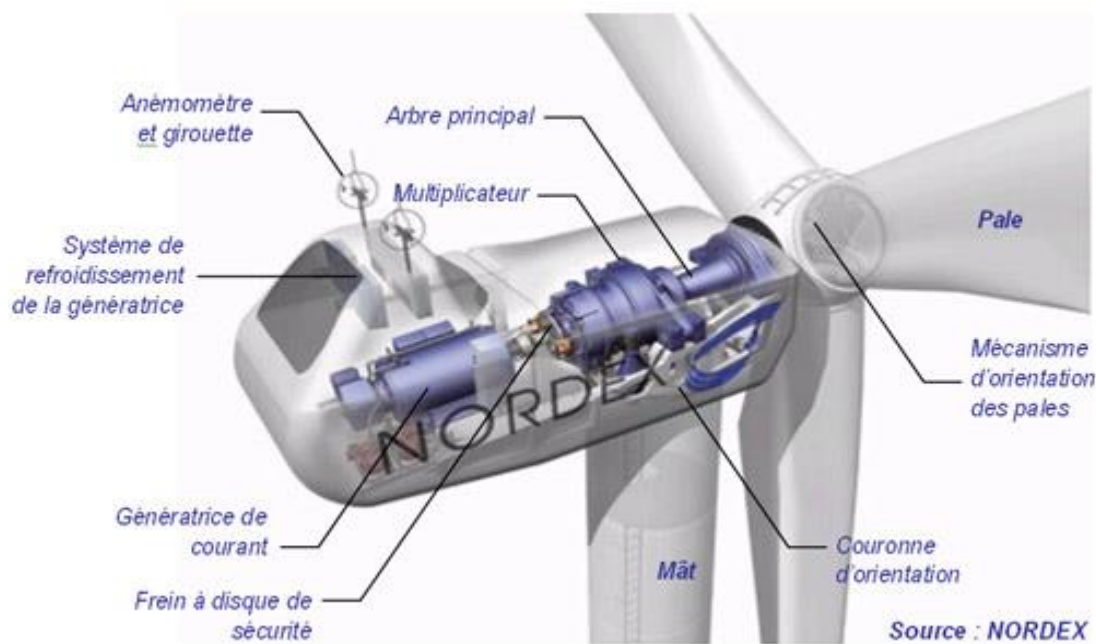


Figure II.15 Constitution d'une éolienne

Le multiplicateur de vitesse est utilisé pour augmenter la vitesse de rotation pour entraîner le générateur électrique. Effectivement, si la vitesse de rotation est faible la production de l'électricité dans des états optimaux n'est pas possible avec les générateurs de courant conventionnels.[10]

Le contrôleur électronique responsable de la supervision de l'état de marche de l'éolienne. C'est en réalité un ordinateur capable de contrôler le démarrage de l'appareil (vitesse environ 5 m/s), d'ajuster l'angle des pales, de freiner la machine et d'orienter le rotor ainsi que la nacelle vers le vent afin d'optimiser la collecte d'énergie et minimiser les contraintes irrégulières sur l'équipement, en fonction des informations livrées par une girouette indiquant la direction du vent, généralement localisés à l'arrière de la nacelle et un anémomètre qui mesure la vitesse du vent. Le contrôleur est aussi responsable de la gestion des diverses pannes potentielles qui peuvent se produire.

Différents systèmes de refroidissement (générateur, multiplicateur) utilisant des ventilateurs, des radiateurs à eau ou à huile.

**Système de direction de la nacelle :** Ce mécanisme fait tourner la nacelle autour d'un axe vertical à l'extrémité supérieure de la tour. Des moteurs électriques assurent l'orientation utilisant une couronne dentée. Un grand nombre d'éoliennes intègrent un mécanisme de fixation mécanique de l'orientation de la nacelle selon une direction spécifique ; ce dispositif préserve les moteurs d'une sollicitation continue et assure également la immobilisation de l'éolienne pendant les interventions de maintenance. [16]

**Tour** II a pour mission: soutenir le groupe rotor-nacelle afin d'empêcher les pales de toucher le sol. Positionner le rotor à une altitude adéquate pour maximiser son éloignement du gradient de vent qui s'observe près du sol, ce qui optimise la collecte d'énergie. Ainsi, certains fabricants offrent diverses hauteurs de tour sans changer le groupe (rotor, nacelle), afin de s'ajuster de la meilleur façon aux plusieurs lieux d'installation[16].

## 2.12. Types des éoliennes :

Selon la configuration géométrique de l'arbre supportant l'hélice, les éoliennes se répartissent en deux catégories principales. On distingue principalement deux sortes d'éoliennes : l'éolienne à *axe horizontal* et l'éolienne à *axe vertical*.

### 2.12.1. Eolienne à axe vertical

Les turbines éoliennes à axe vertical (VAWT) : Cette configuration se distingue par une efficacité notable, même en présence de vents faibles. Toutefois, ce genre d'éoliennes génère des fluctuations significatives de couple et possède une inertie élevée des pales. Étant donné que ces deux paramètres dépendent des dimensions de l'éolienne et de la vitesse du vent, les éoliennes de type VAWT ne sont pas idéales pour une utilisation à grande échelle. Elles conviennent mieux aux petits parcs situés dans des zones urbaines, car elles sont moins volumineuses et plus faciles à mettre en place.[17].

Deux d'entre elles se distinguent particulièrement : Savonius et Darrieus.

La turbine à axe vertical la plus performante est celle dotée du rotor Darrieus. (Figure II.16), a été déposée par l'ingénieur français Georges Darrieus en 193.

L'unique caractéristique de ce genre d'éolienne est que le générateur et le système de transmission sont montés au ras du sol.[18]

Figure II.16 Eolienne à axe vertical: type Darrieus /type Savonius





Figure II.16 Eolienne à axe vertical: type Darrieus /type Savonius

### 2.12.2. Eoliennes à axe Horizontal (Hawt) :

C'est la structure la plus utilisée actuellement dans le monde. Aussi connues sous le nom d'éoliennes à hélices, elles conviennent mieux aux applications de haute puissance que les éoliennes de type VAWT. Ils fonctionnent sur un principe simple qui s'apparente à celui des moulins à vent, avec des configurations comprenant deux ou trois pales. À l'inverse des éoliennes VAWT, elles possèdent un mécanisme d'adaptation de l'angle des pales (pitch), garantissant ainsi une récupération optimale d'énergie dans toutes les situations. Par ailleurs, pour garantir une performance optimale, les éoliennes HAWT sont équipées d'une nacelle pivotante qui s'ajuste à la direction du vent. Ces systèmes de direction (pales et/ou nacelle) exigent des capteurs supplémentaires et une stratégie de contrôle appropriée. [17]



Figure II.17 Eolienne à axe horizontal



Comparaison entre les éoliennes à axe horizontal et vertical.[15-16-19]

**2.12.3. Avantage et inconvénient des éolienne à axe vertical et horizontal**

Type de turbine	Avantages	Inconvénients
Eolienne à axe horizontal	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rendement plus élevé</li> <li>• Pourvues d'un mécanisme qui permet de les diriger en fonction du vent</li> <li>• Coûts opérationnels faible.</li> <li>• Moins sujettes à des contraintes mécaniques par rapport aux modèles à axe vertical.</li> <li>• Idéales pour le milieu rural</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les pales du rotor doivent être rigides.</li> <li>• présentent un risque accru pour les oiseaux, car elles fonctionnent à des vitesses élevées.</li> <li>• produisent beaucoup de bruit.</li> <li>• Coûts d'installation élevés, utilisant un matériau très dur pout mat qui doit supporter le poids de la nacelle.</li> </ul>
Eolienne à axe vertical	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Leur conception est moins complexe que celle des éoliennes à axe horizontal.</li> <li>• Leur accessibilité est plus aisée.</li> <li>• Ils ne requièrent pas de dispositif d'orientation par rapport au vent, ce qui représente un atout considérable en termes de construction.</li> <li>• Approprié pour les toits d'immeuble.</li> <li>• L'installation est moins coûteuse et la maintenance plus aisée, étant donné qu'elle se trouve près de la surface.</li> <li>• Elle peut fonctionner à des vitesses de vent très basses.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• faible rendement.</li> <li>• Leur rotor se trouve généralement à une hauteur très proche du sol, les vents étant donc particulièrement faibles dans la partie inférieure du rotor.</li> <li>• Les éoliennes ne s'activent pas de manière autonome. Ainsi, ils doivent se servir d'une génératrice en tant que moteur de démarrage.</li> <li>• Il est indispensable de procéder à un démontage intégral des éoliennes pour remplacer le palier principal du rotor.</li> <li>• Pas de dispositif d'orientation face au vent.</li> </ul>

Tableau II.3 Avantage et inconvénient des éolienne à axe vertical et horizontal

### 2.13. Éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable

On peut aussi classer les éoliennes selon leur vitesse de fonctionnement en éoliennes à vitesse constante et à vitesse variable.[13]

#### 2.13.1. Les éoliennes à vitesse constante

fonctionnent presque à une vitesse inaltérable, établie par le rapport d'engrenage, la fréquence du réseau et le nombre de pôles du générateur. La génératrice électrique est directement liée au réseau. La commande en fréquence est inutile, ce qui entraîne une économie supplémentaire en termes de coût et de complexité du réseau. Pour ce genre d'éolienne, une machine asynchrone est mise en œuvre et pour garantir un maximum de récupération d'énergie, un contrôle à décrochage aérodynamique est fréquemment employé.

#### 2.13.2. Les éoliennes à vitesse variable :

Pour maximiser l'extraction d'énergie, il est souhaitable que le fonctionnement se fasse dans un grand intervalle de vitesses. Il est donc nécessaire d'ajuster la vitesse de la génératrice à la vitesse du vent, quel que soit son profil disponible, afin d'assurer une extraction optimale. Un tel comportement peut être garanti par des turbines éoliennes à vitesse variable.

Les éoliennes à vitesse-variable sont donc plus adaptées aux applications de grande puissance où les dimensions de la turbine jouent un rôle prépondérant, entraînant des forces aérodynamiques significatives. Pour permettre un réglage de la vitesse de la turbine, le générateur est relié au réseau via un convertisseur de puissance. Le convertisseur permet aussi de réguler la vitesse du générateur qui est physiquement lié au rotor (pales) de l'éolienne. [17-18-19]

#### 2.13.3. Avantage et inconvénients des éolienne à vitesse variable et fixe

Mode vitesse	Avantage	Inconvénients
Vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Efficacité de conversion à haut niveau d'énergie.</li> <li>• Optimisation de la qualité énergétique des convertisseurs.</li> <li>• Diminution du stress mécanique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Système de contrôle plus compliqué.</li> <li>• Coûts et pertes additionnels associés à l'emploi de convertisseurs.</li> </ul>
Vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facile à utiliser, fiable, robuste.</li> <li>• Coût et entretien peu élevés.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• forte contrainte mécanique.</li> <li>• Efficacité énergétique faible.</li> <li>• Des variations de puissance importantes sur le réseau.</li> </ul>

Tableau II.4 Avantage inconvénient des éoliennes à vitesse variable / fixe

### 2.14. Éoliennes terrestres et en mer

Selon le lieu d'installation, on peut classer les éoliennes en deux catégories : l'éolienne terrestre majoritaire "onshore wind turbine", l'éolienne marine "offshore wind turbine". Toutefois, grâce à l'avancement technologique, les éoliennes offshore possèdent un potentiel considérable et connaissent actuellement une expansion significative. De plus, les éoliennes sont classées comme étant face au vent ou dos au vent selon sa direction.[15]



Figure II.18 Eolienne en mer et terrestres

### 2.15. Puissance aérodynamique & coefficient de puissance

D'après le théorème de Betz, il est présumé que la vitesse  $V_0$  du vent qui traverse une surface  $S$  couverte par le rotor correspond à la moitié de la vitesse du vent en amont non perturbé de l'éolienne  $V_1$  et sa vitesse postérieure  $V_2$  traverser le plan du rotor. (fig II.19) [20]

$$V_0 = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{II.8})$$

Par conséquent, la quantité d'air passant par la zone balayée par le rotor est exprimée par :

$$m = \frac{1}{2} \rho S (V_1 + V_2) \quad (\text{II.9})$$

Où  $\rho$  est la masse volumique de l'air.

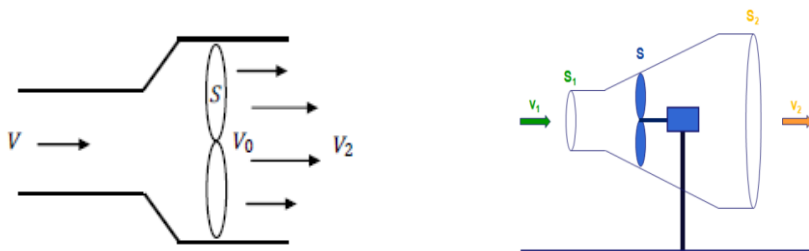


Figure II.19 Démonstration loi de Betz

Aussi, la puissance générée par la turbine à partir du vent conformément à la seconde loi de Newton est décrite par l'équation ci-dessous :

$$P_t = \frac{1}{2} m (V^2 - V_2^2) \quad (\text{II.10})$$

En remplaçant par son expression (II.9) dans (II.10.), on obtient :

$$P_t = \frac{1}{4} \rho S (V + V_2) (V^2 - V_2^2) \quad (\text{II.11})$$

D'après la formule globale la puissance d'un courant d'air non troublé pénétrant la surface S identique sans trouble du vent par le rotor. On note que la puissance  $P_v$ , définie par :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{II.12})$$

L'expression suivante représente la relation entre l'énergie tirée du vent et celle issue du vent non entravé :

$$\frac{P_t}{P_v} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{V_2^2}{V^2} \right) \left( 1 + \frac{V_2}{V} \right) \quad (\text{II.13})$$

L'allure du rapport  $(P_t/P_v)$  en fonction de  $(V_2/V)$  est montré par la figure (II.20).

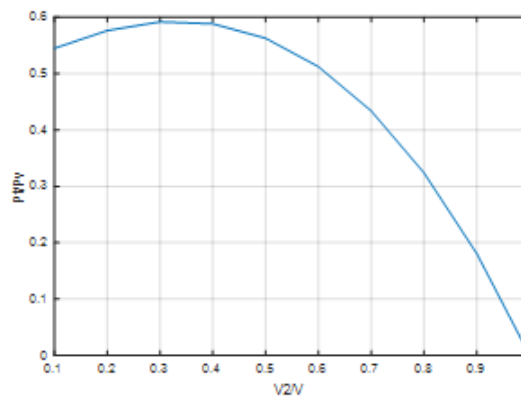


Figure II.20 Ratio des puissances éoliennes en fonction du rapport des vitesses du vent en amont et en aval de la turbine éolienne

Il convient de mentionner que cette fonction atteint son pic ( $V_2/V=1/3$ ), sauf environ de 59% de la puissance globale du vent est récupérable.

Toutefois, l'appareil de conversion dégage presque toujours une puissance  $P_t$  qui est inférieure à la puissance  $P_v$ . Par conséquent, on détermine le quotient de puissance de l'aérogénérateur grâce à la formule suivante :

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} \quad (\text{II.14})$$

Avec :  $C_p < 0.59$ .

On peut écrire donc :

$$P_t = C_p P_v \quad (\text{II.15})$$

En remplaçant  $P_v$  par son expression dans (II.15), on obtient :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \rho S V^3 \quad (\text{II.16})$$

Le coefficient  $C_p$  de puissance varie en fonction de la vitesse de rotation et peut être exprimé en termes de vitesse  $\lambda$  de la manière suivante :

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V} \quad (\text{II.18})$$

Où :  $R\Omega_t$  représente la vitesse linéaire,

$R$  est le rayon de la turbine

$\Omega_t$  vitesse angulaire de rotation.

Le coefficient  $C_p$  de puissance est variable pour une même catégorie de turbine en selon du nbr de pales, soit 1, 2, 3 ou 4.

$C_p < 0.59$  "limite de Betz". [15-16-20-21]

### 2.16. Systèmes de stockage :

Le stockage fait référence à la conservation de l'énergie par les générateurs pour un usage futur.

Dans les systèmes d'énergie hybride hors réseau, emmagasinage d'énergie électrique est un élément crucial. L'énergie est fréquemment stockée sous une forme intermédiaire quelconque (électrochimique, thermique, gravitaire, électromagnétique, de compression, électrostatique, cinétique, etc.) qui peut ensuite être convertie en électricité. figure (II.21)

On distingue deux catégories de stockage :

- à long terme.
- à court terme.[22][23]

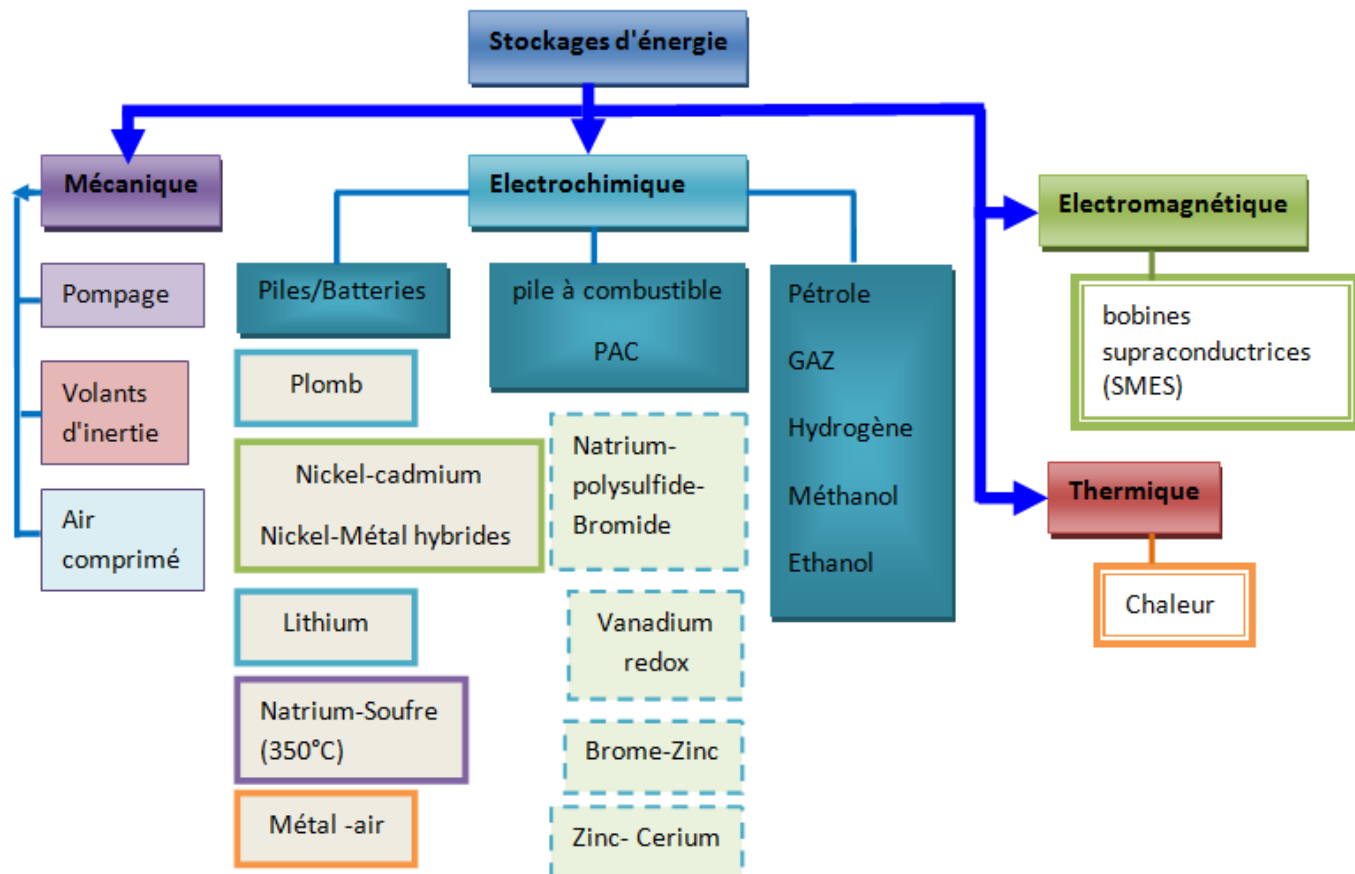


Figure II.21 Classement des systèmes de stockage d'énergie

La sélection du type de système de stockage s'effectue selon des critères essentiels qui sont [24] :

- La capacité de stockage d'énergie
- La puissance maximale.
- L'efficacité.
- Le nombre maximal de cycles de charge et décharge.
- Le coût initial.
- Le poids.
- L'espace occupé
- La sécurité

Les technologies de stockage d'énergie facilitent pour le secteur de la production l'atteinte du niveau qualitatif requis et de la stabilité demandée en termes de demande. Le stockage d'énergie peut aussi fournir une alimentation de secours et des options pour des économies de pointe. La capacité de stockage d'énergie est essentielle pour le système

d'approvisionnement électrique décentralisé, car elle permet un suivi optimal de la charge, ce qui représente un aspect crucial de la gestion à la production. [25]

On a souvent recours aux batteries dans les zones éloignées pour assurer l'équilibre entre la production et la consommation, ainsi que pour atténuer les fluctuations de puissance.

### 2.16.1. Accumulateurs

Le terme « batterie », fréquemment employé, englobe deux sortes de générateurs électrochimiques :

- Selon la définition du physicien italien Alessandro Volta en 1800, une « **pile** » est un empilement de disques composés de deux métaux distincts (dans le cas de Volta, du zinc et du cuivre), qui sont séparés par un matériau imprégné d'électrolyte.

Une pile est un dispositif qui convertit l'énergie chimique en énergie électrique. La conversion d'énergie est un processus irréversible. C'est un dispositif à usage unique, donc non rechargeable.[26-27]

- On appelle un « **accumulateur** » un système de stockage d'énergie électrique fondé sur des réactions électrochimiques réversibles. Les batteries électriques peuvent donc être rechargées et leur durée de vie est déterminée par les pertes subies lors des cycles de charge et décharge.

Un accumulateur est constitué d'une électrode négative, d'une électrode positive et d'un ou plusieurs séparateurs poreux imbibés d'électrolyte fig. La mise en série ou en parallèle d'accumulateurs électriques constitue une « batterie d'accumulateurs ». [26-27].

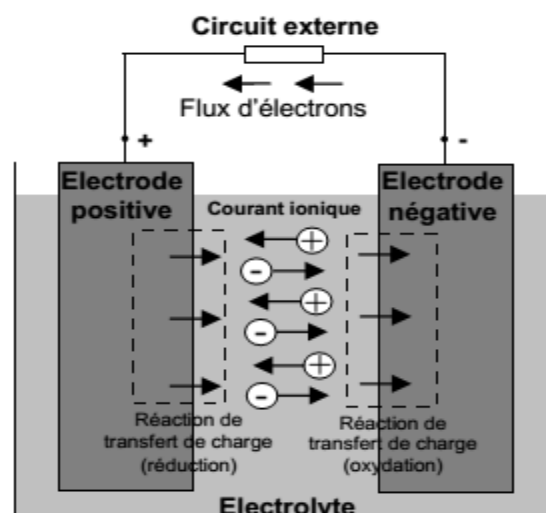


Figure II.22 principe de fonctionnement d'une cellule électrochimique

Plusieurs paramètres électriques caractérisent les batteries [23-24] :

- La capacité nominale  $C(\text{Ah})$  désigne la quantité maximale d'ampères-heures (Ah) que l'on peut obtenir de la batterie dans l'état de décharge établies.
- Le pourcentage de l'état de charge (SOC) (State of charge) indique la quantité de capacité encore utilisable dans une batterie.  $\text{SOC} = C_d/C$  ( $0 \leq \text{SOC} \leq 1$ ). Si le SOC est égal à 1, la batterie est entièrement chargée, tandis que si le SOC est égal à 0, cela indique que la batterie est entièrement déchargée.
- La tension de fonctionnement nominale (V).
- La profondeur de décharge "DOD (%)": depth of discharge" est le ratio entre la capacité utile en fonctionnement et la capacité totale de l'accumulateur.
- La longévité se réfère au nombre de cycles de charge et décharge que la batterie peut supporter avant de réduire sa capacité nominale de 20%.

### 2.16.2. Les différentes technologies de batteries :

On distingue trois types de batteries les plus fréquemment employés : les batteries au plomb-acide, les batteries lithium-ion et les batteries nickel.

#### 2.16.2.1. Batterie Plomb-Acide (PbA) :

Elle se compose de deux électrodes (l'une positive et l'autre négative) et d'un électrolyte, avec l'électrode positive en dioxyde de plomb ( $\text{PbO}_2$ ) et l'électrode négative en plomb (Pb). Les deux électrodes sont entièrement plongées dans l'électrolyte, qui est une solution aqueuse d'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). permetre la circulation des ions de entre les 2 électrodes et de produire un courant. [24-28].

On identifie deux sortes de batteries au plomb : les batteries fermées et ouvertes .

Gaston Plante a développé la première batterie ouverte en 1859. Ces sortes de batteries requièrent un entretien régulier, incluant le remplissage d'eau dans la batterie de temps à autre. Afin de garantir la sécurité, les batteries plomb-acide ouvertes ont été en grande partie substituées par des batteries fermées. La première batterie plomb-acide scellée a vu le jour dans les années 1970.

La distinction majeure entre les batteries plomb-acide ouvertes et scellées réside dans le fait que l'électrolyte liquide présent dans les batteries scellées est substitué par de l'acide sulfurique sous forme de gel.[25]

On retrouve les batteries plomb-acide dans une multitude d'applications, notamment dans les automobiles, les bus, l'industrie et également dans les secteurs de l'aéronautique, des véhicules électriques et ferroviaires. Elles sont notamment utilisées pour les systèmes de sécurité, l'alimentation de secours, et dans les équipements hors réseau (indépendants).



Les bénéfices des batteries plomb sont leur fiabilité, leur coût modique, leur aptitude à résister à un grand nombre de cycles, une vaste gamme de températures d'utilisation et une sécurité opérationnelle accrue. Grâce à leur sécurité intégrée, leur mise en œuvre est aisée et ne nécessite pas de recommandations spécifiques. De plus, elles s'intègrent facilement dans une installation. Leur bon taux de recyclage contribue à minimiser leur empreinte écologique selon l'Analyse du Cycle de Vie (ACV).

Les défauts majeurs incluent une densité énergétique faible et une longévité restreinte.[25-26-28].

Dans le cadre de cette thèse nous avons opté pour une batterie au plomb Acide pour des raisons suivante :

- Coût réduit
- Efficacité élevée.
- Meilleur équilibre entre coût, performance et maintenance.
- Résistance aux températures extrêmes.
- Disponibilité.
- Entretien minimal.

### *2.16.2.2. Batteries au lithium :*

L'évolution des batteries au lithium a débuté en 1912. Plusieurs technologies de batteries dérivent de l'exploitation du lithium, la plus courante actuellement étant la technologie **Lithium-ion** (Li-ion) qui emploie des ions de lithium plutôt que du lithium métallique.

C'est en 1991 que Sony a lancé sur le marché les premières batteries lithium-ion. Depuis, leur popularité n'a cessé de croître et elles se sont imposées comme une norme incontournable dans toutes les applications électroniques mobiles, y compris les téléphones, tablettes et ordinateurs portables. On les utilise aussi dans les voitures hybrides et électriques (Chevrolet, Tesla, Nissan, Renault...)[25-26-27].

#### **Avantage des batteries lithium-ion :**

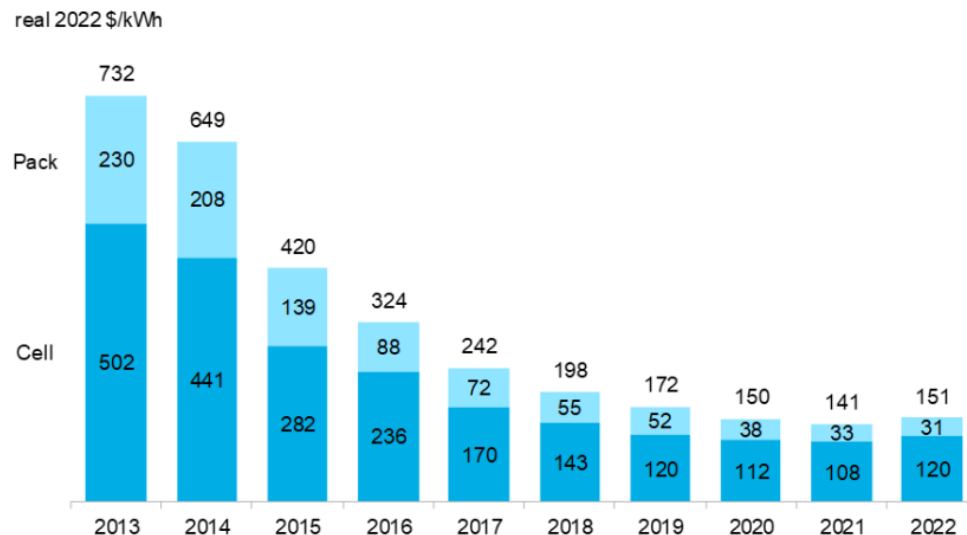
- énergie très efficace.
- durée de vie prolongée.
- densité énergétique élevée.

#### **Inconvénient :**

- Elles sont coûteuses.
- Elles ont tendance à exploser lorsqu'elles surchauffent.

Les propriétés des batteries lithium-ion peuvent grandement fluctuer en raison de leurs diverses compositions chimiques.

Durant les quarante dernières années, de nombreuses équipes de recherche, tant académiques qu'industrielles, se sont penchées sur la technologie Li-ion et l'affinement de chacun de ses composants. Cela conduit à une amélioration de leur performance et à une réduction de leurs coûts de production. [25-26-27]



Source: BloombergNEF. All values in real 2022 dollars. Weighted average survey value includes 178 data points from passenger cars, buses, commercial vehicles and stationary storage.

Figure II.23 Prix des packs et des cellules entre 2013 et 2022(exprimée en \$/kWh).[29]

### 2.16.2.3. Batteries au nickel

Waldmar Jungner a conçu la première batterie au nickel en 1899, offrant plusieurs bénéfices comparativement à la batterie au plomb. Initialement, son développement avançait lentement en raison du coût élevé et de la disponibilité restreinte du matériel. Les batteries nickel fermées ont vu le jour pour la première fois en 1947.

Parmi les batteries au nickel les plus réputées, on retrouve les batteries Ni-Cd (nickel-cadmium), Ni-MH (nickel-hydrure métallique) et celles au nickel-fer. On vous a formé sur des données jusqu'en octobre 2023. [26]

La technologie du nickel-cadmium (Ni-Cd), employée dans de nombreux secteurs tels que la sécurité aéronautique (pour les batteries de secours des avions) et la sécurité ferroviaire. L'inconvénient majeur des batteries Ni-Cd est la toxicité du cadmium, qui est écotoxique et dangereux. Pour des motifs environnementaux. En 1990, les batteries Nickel-Métal-Hydrure ont pris la place des batteries Ni-Cd.

La technologie nickel-hydrure métallique (Ni-MH) n'inclut ni cadmium, ni métaux lourds ou toxiques. Les batteries Ni-MH trouvent leur application dans les dispositifs portables ainsi que dans les véhicules hybrides tels que la Toyota Prius et la Honda Civic.[26]

### 2.16.3. Comparaison techno-économique des technologies de batteries.

Tableau ci-dessous présente les caractéristiques techniques des différents types de batteries. [25-26]

Batterie	Rendement de Charge-décharge	Densité énergétique (KWh/m <sup>3</sup> )	Durée de vie (cycles)	Autodécharge % (/ mois)	Prix (\$/KWh)
Plomb-acid	50-92%	75	3-15 ans (2000 cycles)	3-20%	50-300
Ni-Cd	70-90%	<200	15-20 ans (1500 cycles)	10-20%	200-1000
Ni-MH	66%	<350	5-10 ans (3000-5000 cycles)	30%	240-1200
Lithium-ion	90%	250-620	8-15 ans (>4000 cycles)	1-10%	200-1800

Tableau II.5 Caractéristiques techniques des différents types de batteries

## 2.17. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré la conversion photovoltaïque ainsi que les différentes sortes de cellules photovoltaïques. Dans cette section, nous avons modélisé les générateurs photovoltaïques décrits dans la littérature et simulé l'impact de la température et de ensoleillements sur l'allure  $I(v)$  sous l'environnement Matlab/Simulink. Nous avons également exploré la conversion d'énergie éolienne, en exposant les différentes types et leur principe de fonctionnement. Ensuite, nous avons discuté des principaux systèmes de stockage, ce qui ouvre la voie à l'analyse et à la configuration du système multi source constitué par les deux systèmes pv et éolienne dans le chapitre suivant.

# Chapitre III

## *Systeme Energie* *Hybride (SEH)*

### **3.1. Introduction**

Un Système-d'Energie-Hybride (SEH) est un système combinant diverses technologies de fabrication d'énergie électrique de natures différentes: de nature renouvelables, conventionnelles, afin d'assembler les point positifs de chaque système pour avoir un rendement global énergétique considérable.

Les structures énergétiques mixtes multi-sources représentent des alternatives séduisantes dans le domaine de la génération d'énergie à faible et moyenne capacité. Effectivement, ces dispositifs minimisent les impacts environnementaux en recourant à des énergies renouvelables non polluantes telles que le solaire et l'éolien.

En raison de leur caractère imprévisible, ces sources ne fournissent pas une puissance stable. Ainsi, la combinaison de ces sources avec d'autres sources conventionnelles telles qu'un générateur diesel permet de garantir une production d'électricité constante.

Les systèmes hybrides combinent les énergies renouvelables et les moyens de stockage tels que les accumulateurs, les condensateurs à grande capacité, les piles à combustible, etc. Ces systèmes hybrides, qualifiés « autonomes » ou « isolés », opèrent indépendamment des réseaux électrique.[30-31-32]

### **3.2. Classification des systèmes hybrides**

Diverse classifications des SEHs sont accomplis selon le critère choisi. L'organigramme suivant présente les classifications les plus répandues.[33-34-35]

- La composition du SEH.
- Architecture du SEH.
- Le mode de fonctionnement.
- La plage de puissance.[33-34-35]

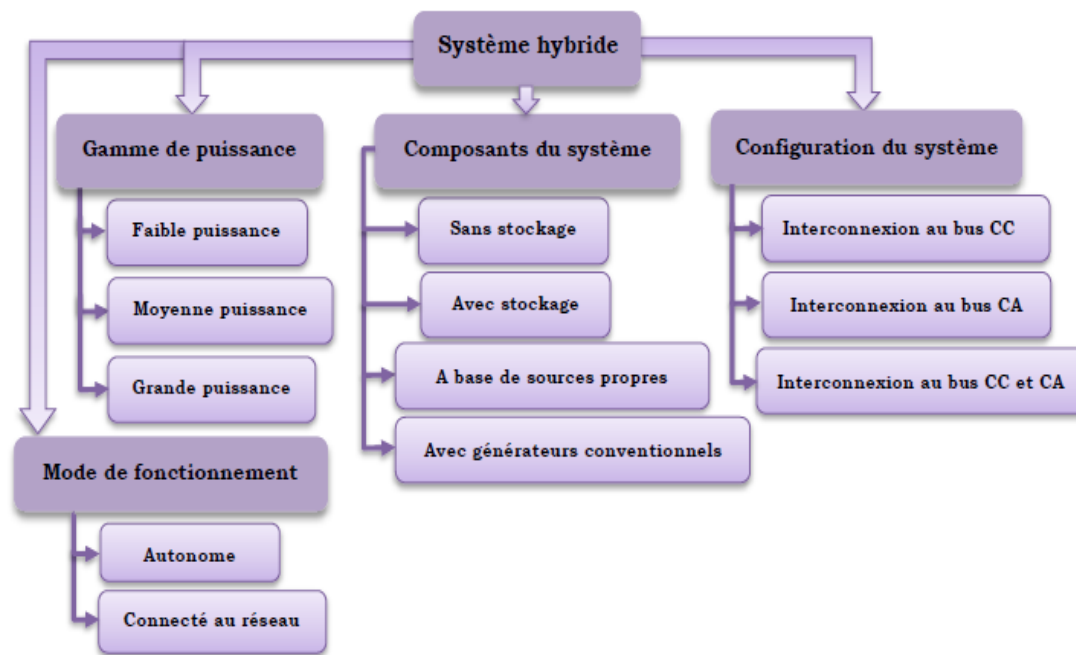


Figure III.1 Classification des systèmes de production hybrides.

### 3.3. Composants d'un SEH

Le problème d'intermittence de production d'énergie par les sources d'énergies renouvelable (PV/éolien) provoqué par le changement aléatoire et fluctuante des conditions météorologique (soleil /vent) peut être régulé en associer ces source avec d'autre source conventionnelle sans ou avec stockage.

Trois catégories de classement selon de la composition du système.

La première catégorie est l'absence ou non d'un dispositif conventionnelle comme le générateur diesel, turbine a gaz ou une centrale tout entière.

La deuxième catégorie est l'utilisation d'un moyen de stockage ou non (de batterie rechargeable, des volants d'inertie, des électrolyseurs) en vue d' une meilleure gestion des charges électriques lors des moments sans disponibilité d'une ressource basique.

La catégorie finale concerne le nature de sources d'énergie renouvelables employées. Le système pourrait intégrer un panneau solaire, une turbine éolienne, un dispositif de conversion d'énergie hydraulique (centrales hydroélectriques ou exploitation des vagues), ou même une association de ces différents moyens. Le choix de la source à utiliser dépend du capacité énergétique accessible, de l'emplacement où le système hybride est installé et de la charge électrique alimentée.

Le rôle crucial de ce dernier souligne la nécessité d'une source additionnelle, d'un système de stockage et/ou d'une source conventionnelle.[33-34-36]

### 3.4. Configuration des SEHs

Plusieurs topologies de systèmes hybrides existe suivant la connexion des générateurs d'énergie: bus à courant continu DC, au bus à courant alternatif bus AC ou aux deux bus AC /DC

#### 3.4.1. Architecture à bus DC (courant continu) :

Dans les systèmes hybrides en série présenté dans la figure III.2, tous les générateurs sont branchés au bus en courant continu (DC) via des convertisseurs de puissance appropriés (AC/DC, DC/DC). Le système peut directement alimenter des charges à courant continues ou connecté en série avec un convertisseur DC/AC pour alimenter des charge à courant alternatif (50 / 60Hz) ou être connecté au réseau électrique via une interface de puissance dédiée (DC/CA).

Le bénéfice de cette configuration est que la gestion de la fréquence est minime ; il n'est pas nécessaire de synchroniser lors de l'intégration d'une nouvelle source. Cependant, pour les systèmes de puissance élevée et intermédiaire, le contrôle de la tension du bus DC reste particulièrement ardu..[32-31-37]

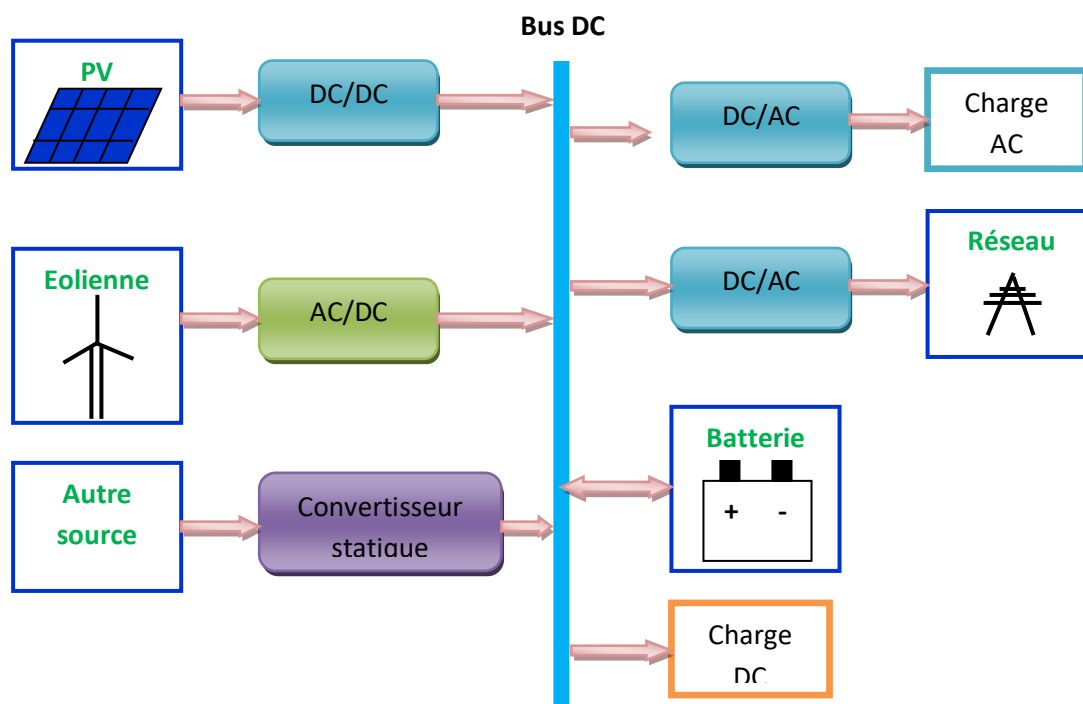


Figure III.2 Architecture à bus DC

### 3.4.2. Architecture à bus AC (courant Alternatif):

Dans cette structure, toutes les sources de productions du système hybride sont branchés au bus AC au moyen des convertisseurs figure III.3 cette configuration peut servir à alimenter tous les utilisateurs d'électricité, y incluant dans les zones rurales.

Cette configuration offre de meilleures performances par rapport à l'ancienne, car tout convertisseur peut être mis en phase avec son générateur, lui permettant d'alimenter la charge de façon indépendante et simultanée avec les divers convertisseurs. Cela procure une souplesse afin que les sources d'énergie puissent répondre aux besoins de la consommation.[31-32-37-38]

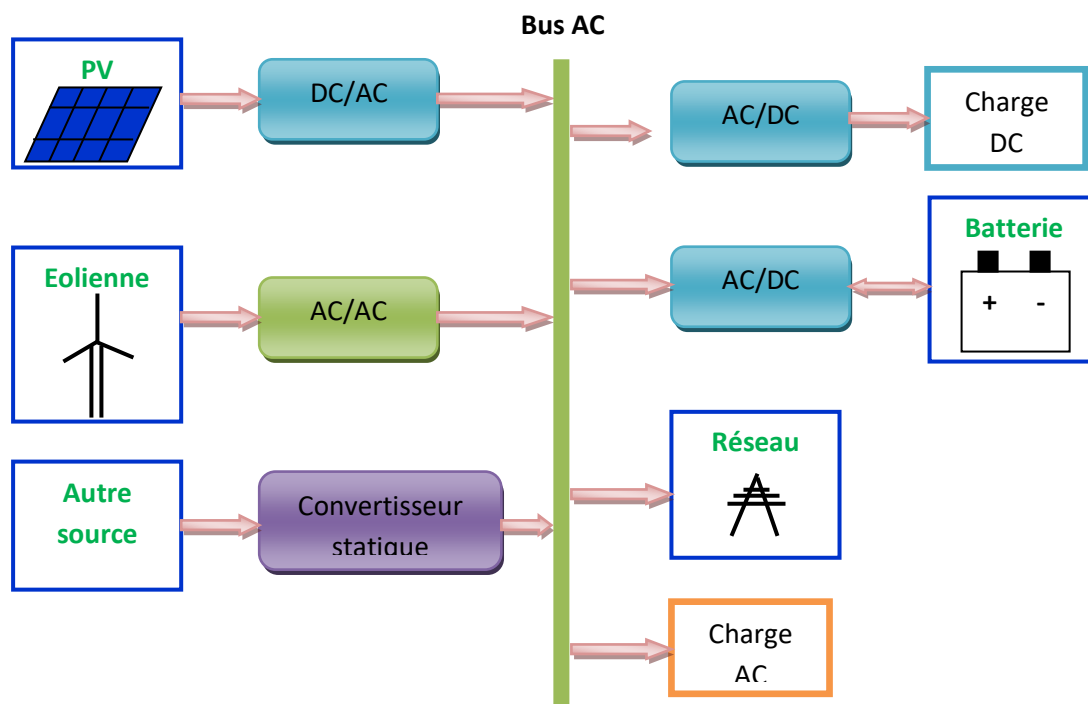


Figure III.3 Structure à bus AC

### 3.4.3. Architecture à bus DC/AC (continu/alternatif) :

La figure.III.4 ci-dessus présente la topologie à bus mixte (DC&AC).

Dans cette topologie, les charges continues DC ou alternatives AC peuvent être alimentés par les sources d'énergie via un convertisseur bidirectionnel. Cette structure combine les atouts des architectures à bus DC et AC.

La surveillance et la commande de l'énergie dans cette topologie présentent une complication supérieure par rapport aux configurations traditionnelles DC ou AC. [30-31-32]



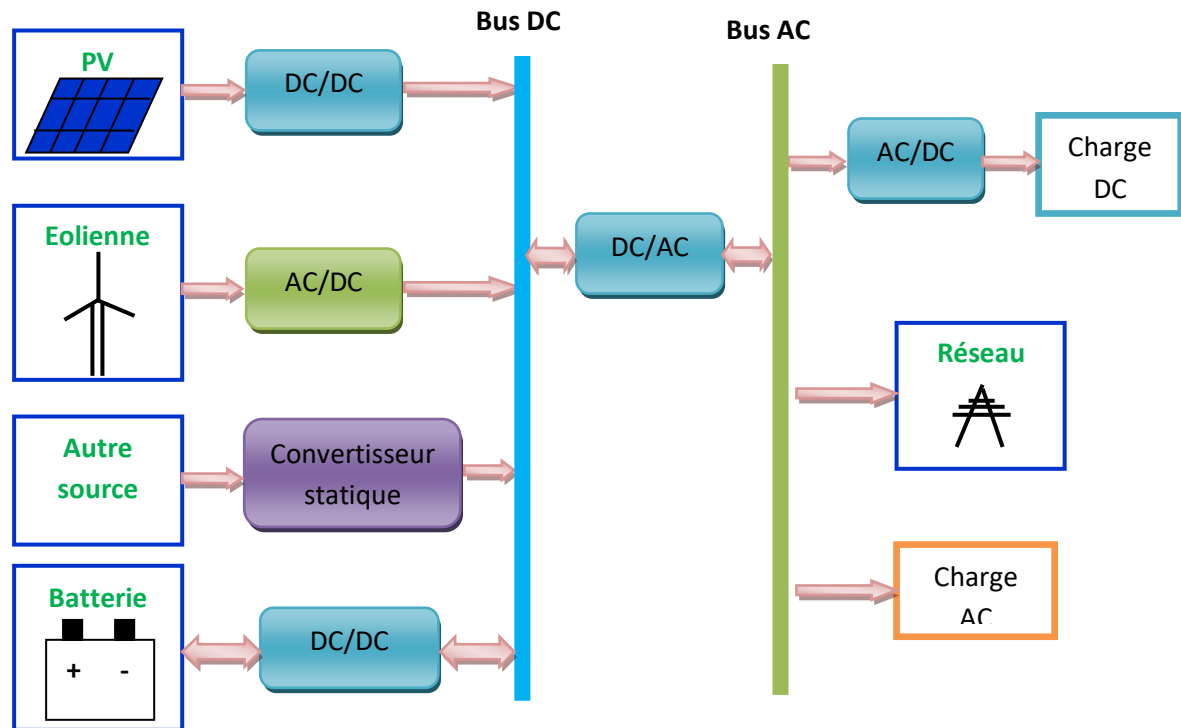


Figure III.4 Architecture à bus DC/AC

#### 3.4.4. Avantage /inconvénient de chaque topologie

Les tableaux suivant synthétisent les atouts et les désavantages de chaque architecture.[31-37-38-39]

	Avantage	Inconvénient
<b>Bus DC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Aucune commutation entre les différentes sources d'énergie n'est nécessaire, ce qui simplifie le schéma électrique.</li> <li>-La connexion de toutes les sources sur un bus à DC simplifie le système de commande.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Le banc de batteries est soumis à des cycles fréquents, ce qui raccourcit sa durée de vie.</li> <li>- L'efficacité globale du système est faible grâce à la conversion de la puissance produite deux fois avant de la servir à la charge.</li> <li>-Le rendement est faible (perte dans convertisseurs, batteries)</li> <li>-Problèmes de corrosion avec les électrodes DC.</li> <li>- Connexion non standard nécessite des coûts élevés dans l'installation et la maintenance</li> </ul>
<b>Bus AC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-facilement isolé à partir du système en cas de panne.</li> <li>-Connexion au réseau facile.</li> <li>-Interface standard et la structure modulaire.</li> <li>-Flexible, extensible et capable de satisfaire des charges évolutives.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Synchronisme nécessaire.</li> <li>-Les pertes de transmission sont plus élevées. (longues distances)</li> <li>-Plus complexe que les systèmes mono source et nécessite du stockage.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exploitation simple, travaux de maintenance et de révision réduits.</li> <li>-Rentabilité, Faible coût lié au cycle de vie des composants du système hybride.</li> </ul>	
<b>Bus mixte AC_DC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge.</li> <li>-La charge du système satisfaite de manière optimale parce que tous les composants du système peuvent alimenter le consommateur en même temps.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Le contrôle automatique et la gestion d'énergie sont essentiels pour le bon fonctionnement du système.</li> <li>– Les batteries se caractérisent par une durée de vie limitée et doit être changer au moins 2 fois durant la durée de vie du projet.</li> <li>– Une construction complexe.</li> <li>-Le générateur et l'onduleur dimensionnés pour une charge maximale, faible rendement pour faible charge</li> </ul>

Tableau III.1 Avantage /inconvénient de chaque topologie

### 3.5. Mode de fonctionnement d'un SEH

Les systèmes hybrides peuvent être classés selon son mode de marche en deux groupes : Autonome /raccordé au réseau.

En mode autonome le système doit satisfaire les besoins énergétiques des charge isolé, îles, zones rurales, résidences de montagne, affichage routière etc.

En mode connecté au réseau les systèmes-hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique. collaborent à satisfaire les besoins énergétiques des consommateurs du système électrique du pays.

Le SEH doit être apte de se déconnecter du réseau et fonctionner en mode autonome, En cas de défaillance du réseau.[33-34-36]

### 3.6. Gamme de puissance des SEHs

Le tableau présente le classement par gamme de puissance des systèmes hybrides.[31-34-36]

Puissance du SEH en KW	Application
Faible < 5 KW	Systèmes autonomes : stations de télécommunications, pompage d'eau, applications domestique
Moyenne 10 -250 Kw	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, zones rurales
Grande>500 KW	Grands réseaux isolés

Tableau III.2 classement par gamme de puissance du SEH

## 3.7. Etudes des structures des systèmes hybrides

Mode de fonctionnement	Composant du SEH	référence
Autonome	PV/ batterie	[40]
	PV/batterie plomb/super-condensateur	[41-42]
	PV/éolienne/hydrogène	[43]
	Eolienne/électrolyseur/réservoir d'hydrogène	[44]
	Eolienne/électrolyseur/réservoir d'hydrogène/ Stockage par pompage	[45]
	PV/Stockage par pompage	[46]
	PV/ éolienne/ générateur diesel /batteries	[47]
	PV/ éolienne/ générateur diesel	[48]
	PV/éolienne/Stockage par pompage	[49]
	PV/éolienne / batteries	[50-51-52- 53-54-55]
	PV/éolienne / batteries/super-condensateur	[56]
	PV/hydrogène / batteries	[57]
	PV/générateur diesel	[58]
	PV/Batterie/ pile à combustible	[59]
	PV/éolienne/turbine marémotrice/batterie	[60]
raccordé au réseau	Eolienne/batterie	[61]
	PV/ pile combustible/ batteries /super-condensateurs	[62]
	PV/éolienne / batteries	[63]
	PV/éolienne	[64]
	PV/Eolienne/électrolyseur/réservoir d'hydrogène	[65]

Tableau III.4 structures des systèmes hybrides

## 3.8. Etude de cas

Dans cette étude nous travaillons sur un système-hybride autonome de configuration bus continu destiner à alimenter un habitat individuel dans une zone rurale dans la région d'Adrar.

### 3.8.1. configuration du système hybride

Le système hybride de production d'électricité fondé sur d'ER est principalement composé d'un générateur photovoltaïque (PV), d'une éolienne (WT) et d'un dispositif de stockage de batteries (Cb).

La figure suivante montre le schéma synoptique utilisé dans cette étude.

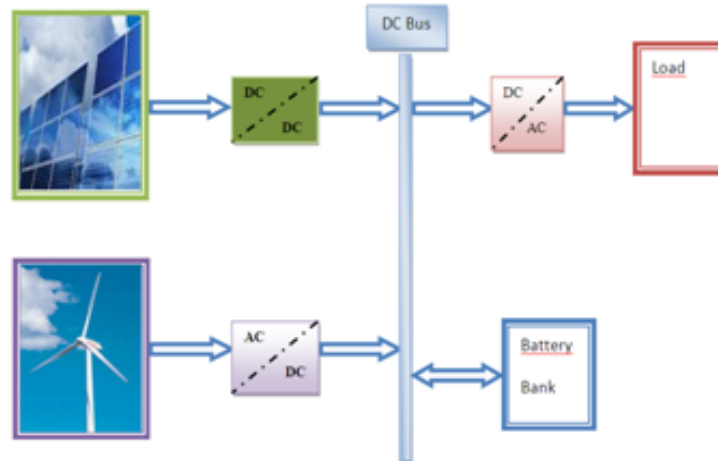


Figure III.5 schéma synoptique du système étudié

### 3.8.2. Modélisation énergétique du système multi-source (SMS)

#### 3.8.2.1. Modélisation du générateur photovoltaïque

La modélisation énergétique du PV consiste à spécifier la puissance fournie par celui-ci en fonction de l'irradiation solaire  $G_{tot, \beta}$  reçu par le panneau incliné d'un angle  $\beta_{PV}$ , de la surface  $SPV$  et du rendement  $\eta_{PV}$ , tel que : [66]

$$P_{pv} = \eta_{pv} * S_{pv} * G_{tot, \beta} \quad (III.1)$$

avec :

$G_{tot, \beta}$  : le rayonnement global reçu par le panneau incliné [ $W/m^2$ ] ;

$P_{PV}$  : la puissance maximale fournie par le panneau [ $W$ ] ;

$SPV$  : la surface du panneau [ $m^2$ ] ;

$\eta_{PV}$  : le rendement global du panneau.

Le rendement global du panneau  $\eta_{PV}$  dépend de la température de la cellule solaire photovoltaïque  $T_c$ , qui est liée à la température  $T_{amb}$  ambiante selon :

$$\eta_{pv} = \eta_{pvref} * \eta_{vpv} * [1 + \alpha_{pv} * (T_c - T_{cref})] \quad (III.2)$$

$$T_c = T_{amb} + (T_{cNOCT} - T_{ambNOCT}) * \frac{G_{tot, \beta}}{G_{NOCT}} \quad (III.3)$$

Avec

- $G_{NOCT}$  : le rayonnement dans des conditions de fonctionnement normales [ $800W/m^2$ ].

- $T_{amb}$  : la température ambiante de l'air [ $^{\circ}\text{C}$  ou  $\text{K}$ ] ;
- $T_{ambNOCT}$  : la température ambiante de l'air dans des conditions de fonctionnement normales [ $^{\circ}\text{C}$  ou  $\text{K}$ ] ;
- $T_c$  : la température de la cellule [ $^{\circ}\text{C}$  ou  $\text{K}$ ] ;
- $T_{cref}$  : la température de la cellule dans des conditions standard de référence [ $25^{\circ}\text{C}$  ou  $\text{K}$ ] ;
- $T_{cNOCT}$  : la température de la cellule dans des conditions de fonctionnement normales [ $^{\circ}\text{C}$  ou  $\text{K}$ ] ;
- $\alpha_{PV}$  : le coefficient de variation de la puissance produite par le panneau en fonction de la température [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$  ou  $\text{K}^{-1}$ ], de 0,004 à 0,006 / $^{\circ}\text{C}$ s;
- $\eta_{PV}$  : facteur de dégradation. Il prend en considération le utilisation des modules qui n'est pas souvent idéal et qui peut être détérioré par la dégradation des propriétés des modules ou de leur performance au fil du temps (vieillessement et accumulation de poussière). Dans ce contexte,  $\eta_{pc}$  s'établira à 0,9.[66][67].
- $\eta_{PVref}$  : rendement du panneau sous les conditions de référence standard, Cela dépend de la technologie mise en œuvre. Nous avons opté pour des panneaux solaires polycristallins au silicium, présentant un rendement approximatif de 13%. [66][67].

### 3.8.2.2. Modélisation du générateur éolienne

Semblables aux panneaux photovoltaïques, il existe une variété de modèles qui se concentrent sur l'amélioration de diverses propriétés physiques aérodynamiques (la conception de la tour, de la nacelle et les pales, rotor), propriétés mécaniques (boîte de vitesses, lacet, systèmes de freinage), systèmes électriques (générateur, convertisseur de puissance, transformateur), des systèmes de contrôle, ainsi que des modèles de puissance de sortie des éoliennes existent de nos jours.

Dans cette thèse, nous nous focalisons uniquement sur la modélisation de la puissance de sortie de l'éolienne.. Différentes approches de la modélisation de la puissance de sortie des éoliennes peuvent aujourd'hui être trouvées dans de nombreux articles scientifiques. Toutes ces approches peuvent être globalement classées en 2 catégories :

- ceux qui sont basés sur les équations fondamentales de l'énergie éolienne ;
- des modèles basés sur le concept de courbe de puissance d'éolienne.

Dans cette étude, une approche simplifiée impliquant des équations fondamentales de puissance disponible dans le vent a été sélectionnée. Cette approche donne encore une

précision satisfaisante pour analyser le potentiel de puissance de sortie nécessaire pour estimer davantage l'efficacité énergétique ainsi que potentiel de flexibilité énergétique.

A partir de l'équation fondamentale de l'énergie cinétique du vent, la puissance disponible dans le vent ( $P_{wd}$ ) en [W] passant perpendiculairement à la surface balayée par le rotor d'une éolienne, peut s'exprimer comme suit :[67-68-69-70]

$$P_{wd} = \frac{1}{2} * \rho * S_{wt} * \eta_t * V^3 \quad (III.4)$$

$$P_{wd} = \frac{1}{2} * c_p * \eta_{gb} * \eta_g * \rho * S_{wt} * V^3 \quad (III.5)$$

Avec

$\rho$  densité de l'air au moyeu de la turbine [Kg/m<sup>3</sup>]

$V$  vitesse du vent [m/s]

$S_{wt}$  surface balayée par le rotor de l'éolienne [m<sup>2</sup>]

$C_p$ : rendement de la turbine,

$\eta_{gb}$ : rendement du variateur de vitesse,

$\eta_g$  : rendement de la génératrice,

$\eta_t = C_p * \eta_{gb} * \eta_g$ : Rendement global supposé égal à 30 % pour des éoliennes tripales à axe horizontal [67].

### 3.8.2.3. Banc de stockage

Plusieurs modèles de batterie existent dans la littérature. La figure III.6, résume les relations entre les divers modèles des batteries existants dans la littérature.

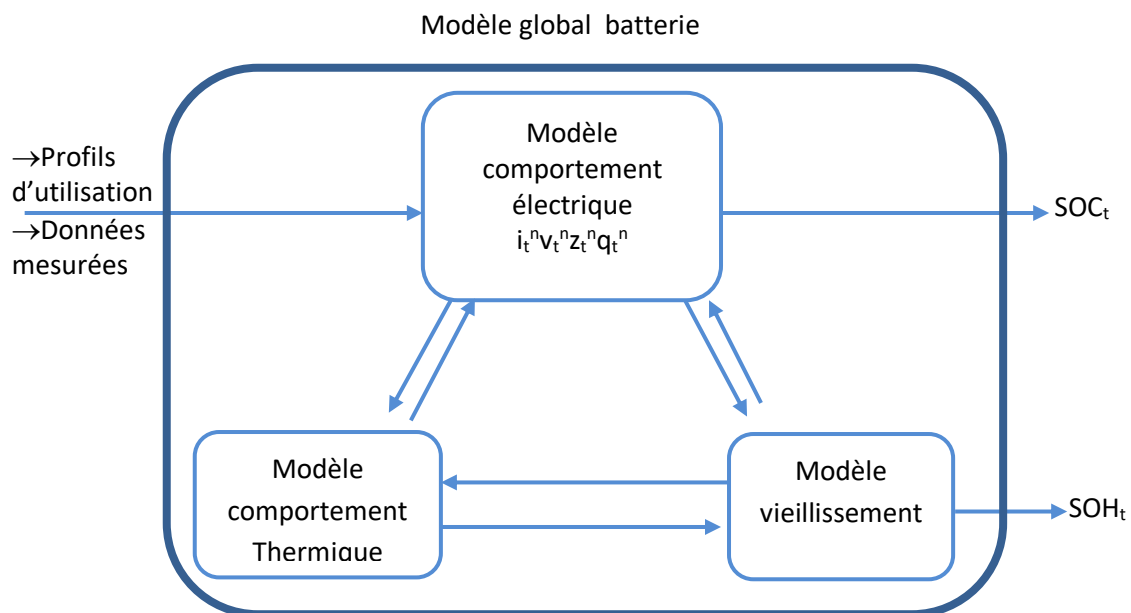


Figure III.6 différent modèle de la batterie

- **Le modèle de comportement électrique**, a pour but d'estimer les indices d'état de la batterie et de représenter les variations des caractéristiques : la puissance, la tension, le courant, les Ah échangés qui traduisent le comportement de la batterie.
- **Le modèle Thermique** modélise la conduite thermique de la batterie en fonction des paramètres de l'atmosphère extérieur et de l'action électrique de la batterie.
- **Le modèle de vieillissement** aide à évaluer les indices de vieillissement et l'état de santé de la batterie. (SoH). [71]

Pour notre thèse, nous avons concentré nos efforts uniquement sur le modèle électrique et le modèle de vieillissement. La partie thermique n'a pas été abordée.

#### 3.8.2.4. Modèle énergétique du banc de stockage

Le modèle énergétique de l'état de charge/décharge de la batterie plomb-acide est en générale donné par l'expression (III.6).

L'écart entre la charge consommée ( $P_{ld}$ ) et la puissance produite par les générateurs renouvelables ( $P_{pro}$ ) détermine l'état de charge/décharge de la batterie.

Au cours de la charge Le changement de l'état de charge ( $SOC$ ) de dispositif de stockage à chaque instant  $t$  est calculée comme suit :

$$Soc(t) = Soc(t - 1) + \left( P_{pv}(t) * \eta_{dc} + P_{wd}(t) * \eta_{ac} - \frac{P_{ld}(t)}{\eta_{wr} * \eta_{inv}} \right) * \frac{\eta_{ch}}{U_{bus}} * \Delta t \quad (III.6)$$

Au cours de décharge Le SOC est calculé comme suit :

$$Soc(t) = Soc(t - 1) + \left( P_{pv}(t) * \eta_{dc} + P_{wd}(t) * \eta_{ac} - \frac{P_{ld}(t)}{\eta_{wr} * \eta_{inv}} \right) * \frac{1}{\eta_{dis} * U_{bus}} * \Delta t \quad (III.7)$$

$P_{ld}(t)$  : la puissance demandé par la charge à l'instant  $t$ .

$\Delta t$  : pas de simulation.

$\eta_{inv}$ ,  $\eta_{ac}$  et  $\eta_{dc}$  : rendements respectifs des convertisseurs DC/AC, AC/DC, et DC/DC.

Ils sont tous égaux à 0,95[67].

$\eta_{cha}$  et  $\eta_{dis}$  : rendements de la charge / décharge de batterie ( $\eta_{cha} = 0,85$ ,  $\eta_{dis} = 1$ ).

$\eta_{wr}$  pertes dans les câbles et les connexions  $\eta_{wr} = 0,98$ .

$U_{bus}$  tension nominale du bus continu 48V.

La capacité nominale  $C_n$  du banc de stockage est exprimée par l'équation suivante :

$$C_n = \left( \frac{C_{bat}}{C_{bats}} \right) * C_{bat} = N_{batp} * C_{bat} \quad (III.8)$$

$N_{Bat}$  : Le nombre total de batteries ;

$N_{Bats}$  : Le nombre de batteries connectés en série ;

$N_{Batp}$  : Nombre de batteries connectés en parallèle ;

$C_{Bat}$  [Ah]: Capacité d'une batterie unitaire.

$$N_{bus} = \frac{U_{bus}}{V_{batt}} = \frac{48}{12} = 4 \quad (III.9)$$

Avec  $V_{batt}$  correspond à la tension nominale de chaque batterie (12V).

La limite inférieure de décharge que le banc de stockage ne doit pas dépasser est déterminée de la manière suivante:

$$Soc_{min} = (1 - DOD_{max})Soc_{max} \quad (III.10)$$

Avec

$DOD$  : représente la profondeur de décharge.

### 3.8.3. Stratégie de gestion du système

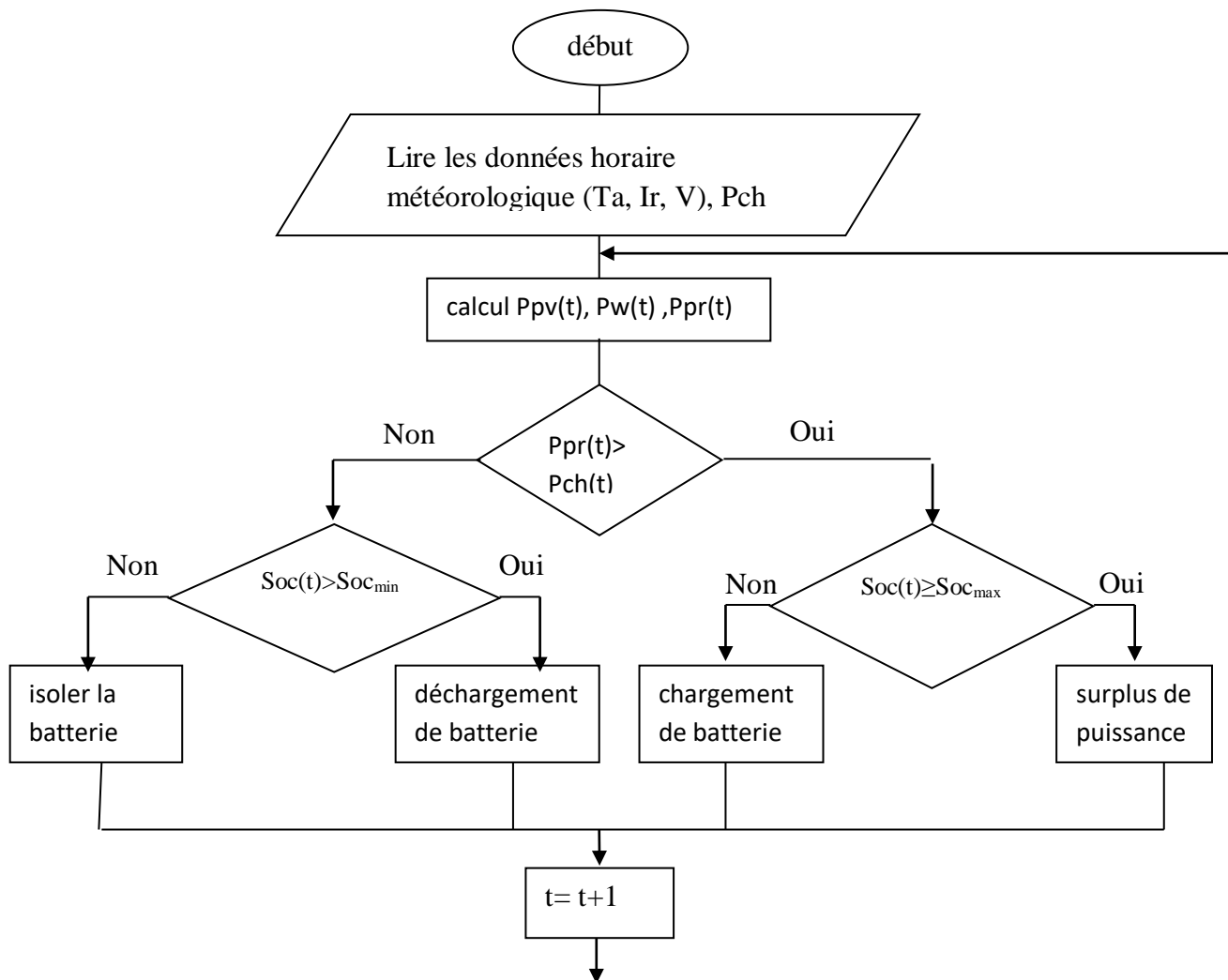
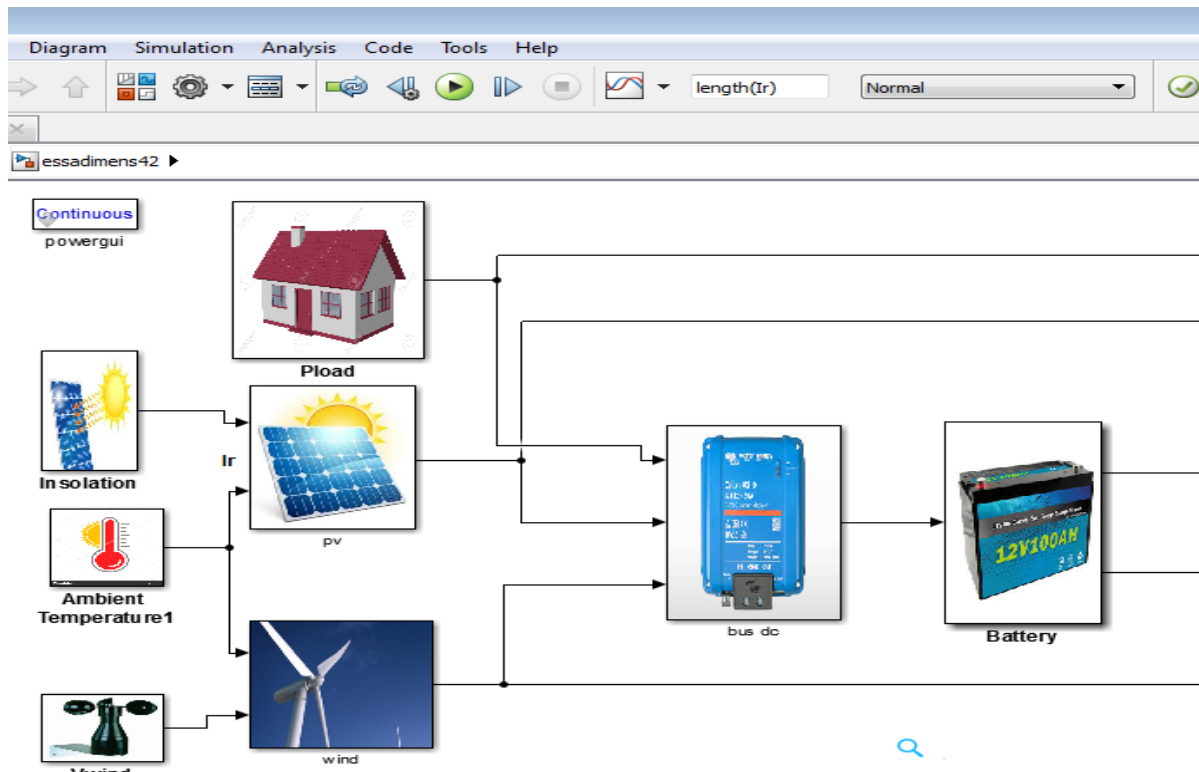


Figure III.7: Organigramme gestion d'énergie du système



### 3.8.4. modélisation sous MATLAB/Simulink du système



### 3.8.5. Situation géographique d'Adrar

La région d'Adrar se trouve au cœur du désert algérien, sa superficie d'environ 427 368 km<sup>2</sup>. Elle a été choisie dans ce travail à cause de son potentiel en énergie solaire. Situé à 27,52 ° au nord de latitude et 0,17 ° à l'ouest de longitude, d'Adrar couvre une superficie de 663 km<sup>2</sup> et compte environ 65 000 habitants. Adrar possède un climat saharien aride et un terrain plutôt plat avec un point culminant de 421 m.

Le tableau ci-dessous présente les coordonnées géographiques du site choisi

Site	Longitude	Latitude	Altitude
Adrar	0.18°W	27.82°N	263.8m

Tableau III.5 Coordonnées géographiques ville Adrar

### 3.8.6. Conditions climatiques à Adrar

Un climat saharien chaud et très aride, des nuits froides en hiver, de faibles précipitations et des tempêtes de sable saisonnières se distinguent dans la région d'Adrar.

La moyenne température varier entre [26 °C 50°C] observée en juillet, le mois le plus chaud. Par contre, janvier est le mois le plus froid, avec des températures moyennes entre [4,5 °C 20°C] selon les informations dans l'Atlas éolien de l'Algérie, les vitesses moyennes est d'environ 6,3 m/s.

### 3.8.6.1. Acquisition des données météorologique

L'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER'MS) d'Adrar a mis en place une station radiométrique pour mesurer les informations climatiques concernant la répartition de la densité du rayonnement solaire, la température moyenne et l'humidité relative, ainsi que la vitesse du vent en moyenne par heure dans la zone d'Adrar

L'installation de cette station de mesure radiométrique autonome est effectuée en 2010. Afin d'utiliser cette ressource énergétique, l'équipe du gisement solaire a mené des études expérimentales et théoriques pour caractériser de façon idéale la région d'Adrar en termes de rayonnement solaire. Toutefois, l'Unité de Recherches en Energies Renouvelables d'Adrar a mis en place cette station radiométrique de haute précision. Elle emploie un dispositif de suivi tridimensionnel (SunTracker(MP-160))(figure III.8), qui se compose de 2 parties : Une composante fixe est composée d'un pyranomètre modèle EKO pour quantifier le rayonnement total obtenu sur un niveau horizontal, d'un thermohygromètre model TECNOEL pour mesurer l'humidité et la température, ainsi que d'un solarimètre. [72]

Un système robotique permet de suivre le parcours du soleil de son coucher à son lever. La partie est équipée d'un pyréliomètre orienté face au disque solaire, sert à évaluer le rayonnement direct solaire sur toutes les longueurs d'ondes (de 0,2 à 0,4  $\mu\text{m}$ ) captées sur un plan perpendiculaire. De plus, elle est équipée d'un pyranomètre modèle EKO pour mesurer l'éclairement diffus sur un plan plat, équipé d'une boule sphérique pour intercepter le flux radiatif provenant directement du disque solaire. Les deux mesures combinées (diffus+ direct) fournissent le rayonnement global. On analyse et exploite donc ces données afin de les employer à des fins énergétiques, particulièrement pour les installations de conversion photovoltaïque et thermique.



Figure III.8 Station météorologique (NEAL) URERMS Adrar

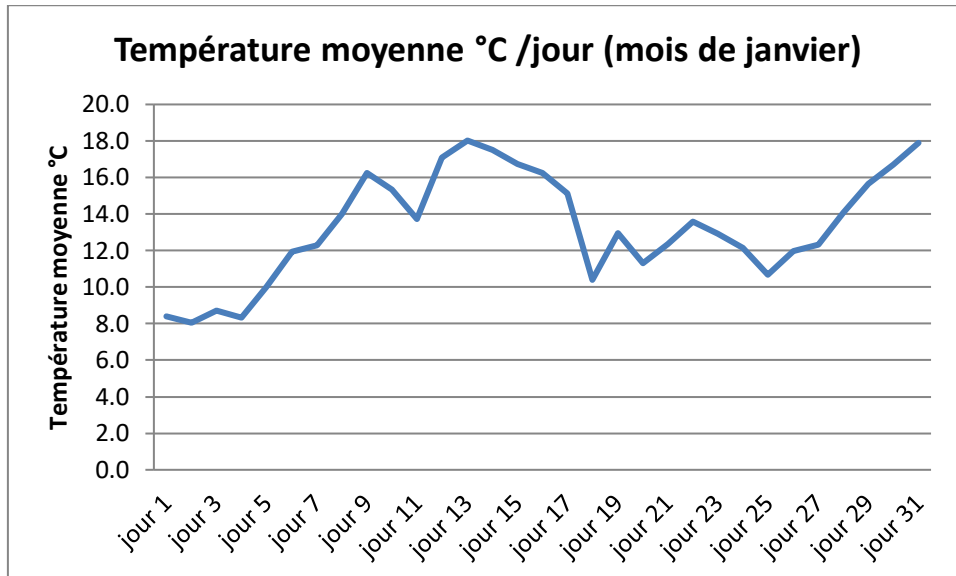


Figure III.9 Température moyenne °C/Jour (Janvier 2015)

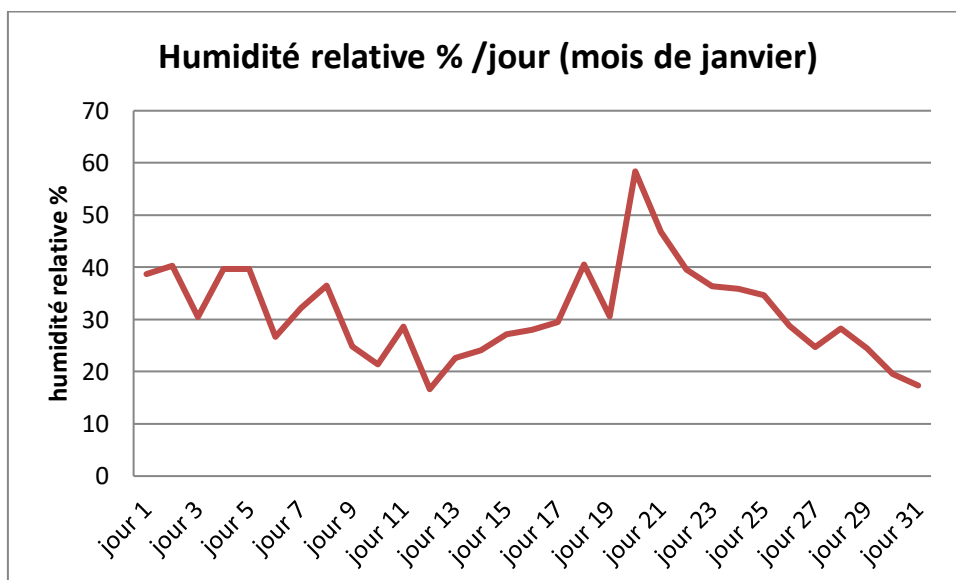


Figure III.10 Humidité relative %/Jour (Janvier 2015)

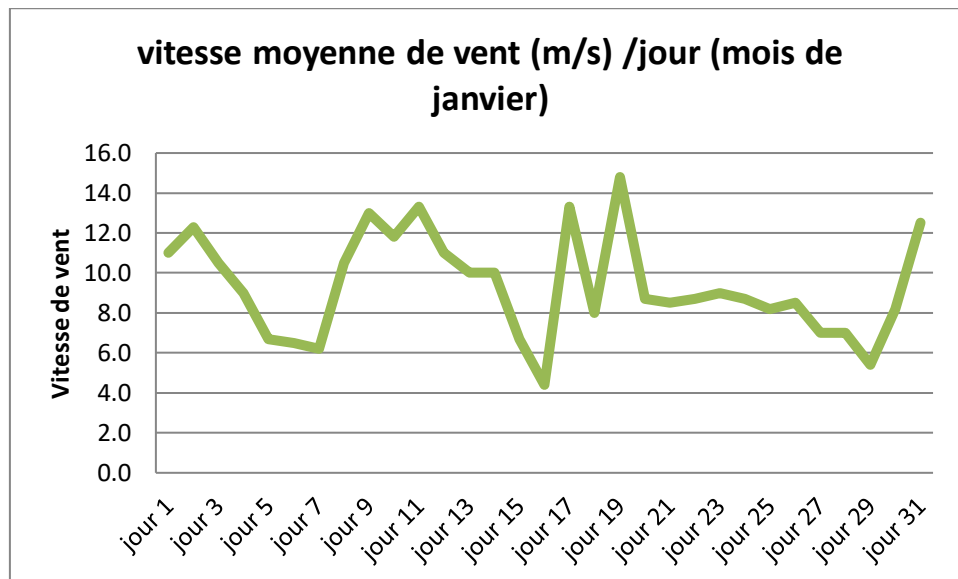
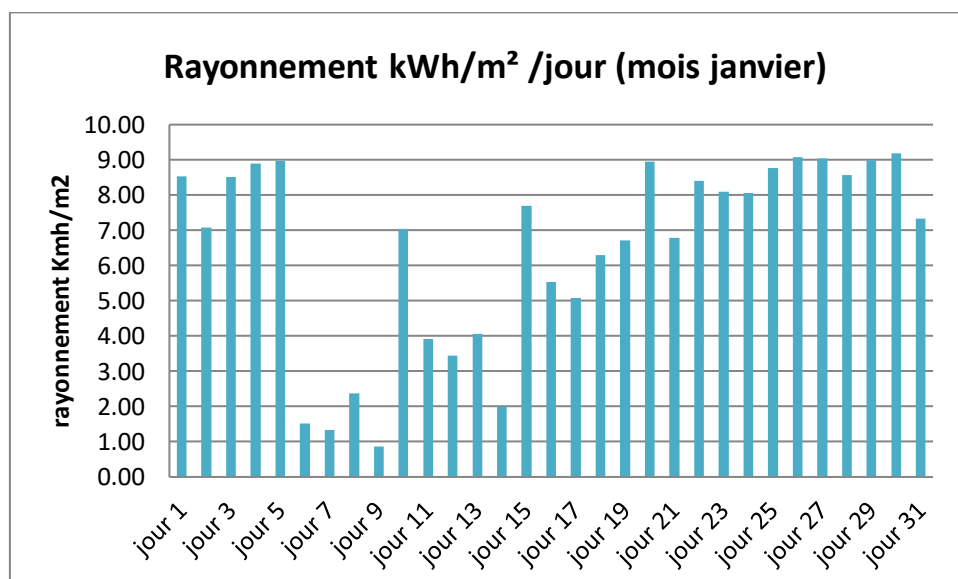


Figure III.11 Vitesse moyenne (m/s)/Jour (Janvier 2015)

Figure III.12 Rayonnement (Kwh/m<sup>2</sup>)/Jour (Janvier 2015)

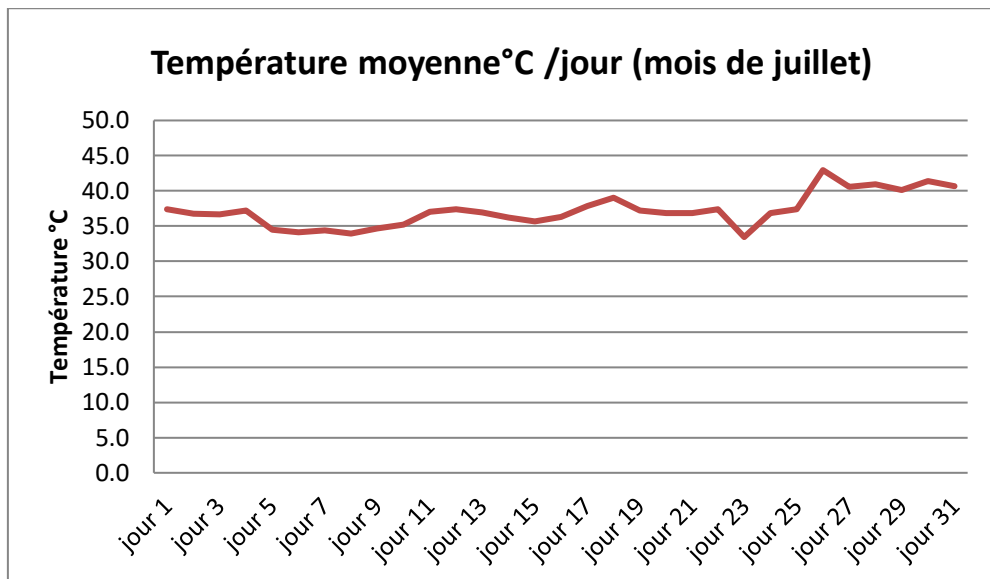


Figure III.13 Température moyenne °C/Jour (Juillet 2015)

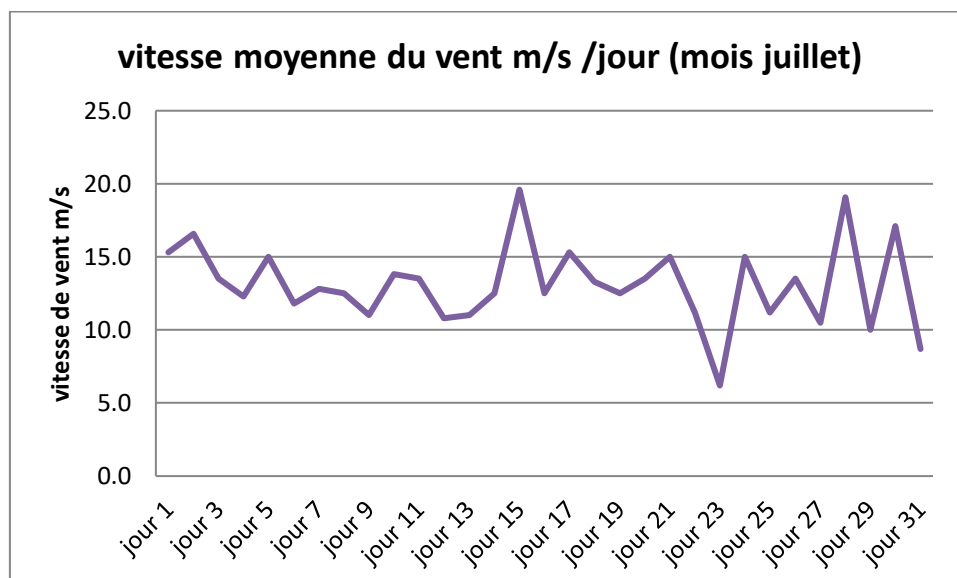
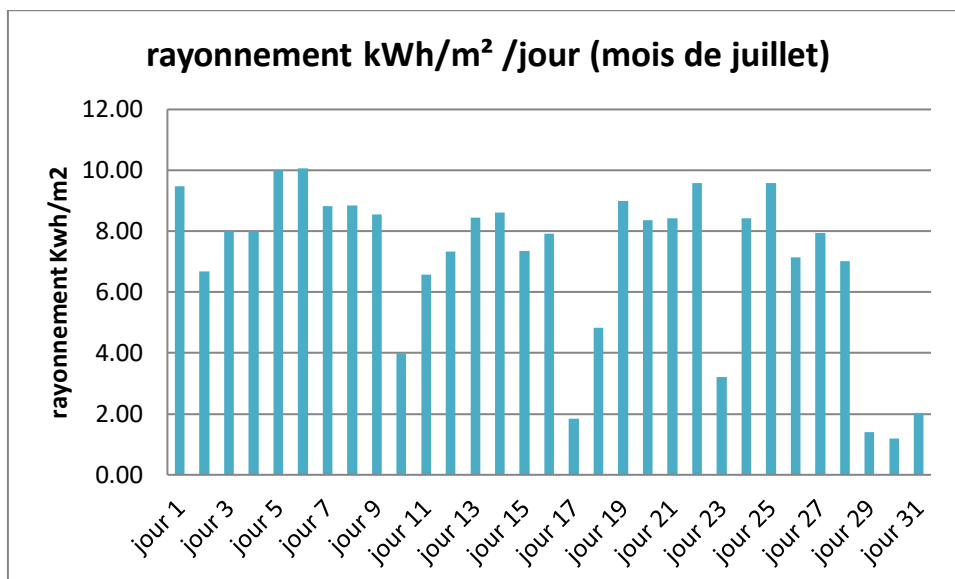


Figure III.14 Vitesse moyenne (m/s)/Jour (Juillet 2015)

Figure III.15 Rayonnement (Kwh/m<sup>2</sup>)/Jour (Juillet 2015)

### 3.8.7. Bilan énergétique et profil de consommation

la connaissance des besoins énergétique en électricité d'un habitat résidentiel est indispensable pour l'étude des systèmes de production énergie électriques hybrides autonome (PV/éoliens/batteries).

Le profil de charge suggéré pour notre recherche repose sur une enquête menée auprès des résidents d'un village rural situé dans le sud de l'Algérie à Adrar. Le niveau de vie, les traditions, le comportement et les habitudes ont été pris en considération dans le profil de charge.

Dans cette étude nous travaillons sur une habitation individuelle de 220 m<sup>2</sup> composée de 2 chambres, une cuisine, salon, occupé par 5 personnes.

L'estimation des besoins énergétiques et La consommation électrique des appareils a été déterminée selon Les fiches technique de certain équipement électroménager (télévision, réfrigérateur, éclairage,...), par le site internet [énergie & développement] , les appareils domestiques fonctionnant sous une tension AC de 220V-50Hz

#### 3.8.7.1. Puissances actives des équipements et besoin énergétique

l'habitat est occupée en permanence durant toute l'année les caractéristiques et les puissances des équipements ainsi que la durée d'utilisation sont indiquées dans le tableau ci-dessous

	équipement	Q <sub>t</sub>	Puissanc e (w)	Nbr h/ j (été)	Energie Eté(wh/j)	Nbr h/j hiver	Energie hiver (wh/j)
<b>Cuisine</b>	Lampes	1	20	1-3	20-60	2-5	40-100
	Réfrigérateur	1	140	24	3360	24	3360
	Micro -onde	1	2000	0-1/12	0-170	1/12	170
	mixeur	1	300	0-1/6	0-50	0-1/6	0-50
	Radio	1	40	1/4-2	10-80	1/2-2	20-80
	Four/électrique	1	1000	0-1/3	0-333	1/2	500
<b>Terrasse</b>	Pompe à eau	1	800	1/4-2	200-1600	1/4-1	200-800
<b>cuisine</b>	Chauffe eau	1	1100	0-1/4	0-275	1/2-2	550-2200
	lampe	1	20	1/6-1	3.5-20	1/4	5
<b>salon</b>	climatiseur	1	3500	1-4	3500- 14000	0	0
	lampe	5	20	1/2-2	50-200	1-4	100-400
	Télévision demo	+ 1	140	1-4	140-560	1-4	140-560
<b>Chambre 1</b>	Télévision+ demo	1	120	1-2	120-240	1-4	120-480
	lampe	1	20	1/2-2	10-40	1-3	20-60
	climatiseur	1	1500	1-5	1500-7500	0	0
	Chauffage électrique	1	1000	0	0	1-6	1000- 6000
<b>Chambre 2</b>	lampe	1	20	1/2-1	10-20	1	20
	ordinateur	1	80	0-1	0-80	2	40
	Fer à repassé	1	1200	0-1/12	0-100	1/12	600
<b>Salle de bain</b>	lampe	1	20	1/2-1	10-20	1-2	20-40
	Machine à laver	1	1500	0-1	0-1500	0-1	0-1500
	Sèche cheveux	1	750	0-1/6	0-110	1/4- 1/2	187.5-375
<b>hall</b>	lampe	3	20	1/12-1/3	5-20	1/3-1	20-60
<b>garage</b>	lampe	1	20	1/12	2	1/12-	2-5

1/4

<b>Total</b>	<b>8940.5</b>	<b>-</b>	<b>7114.5-</b>
	<b>30340</b>		<b>61405</b>

Tableau III.6 Bilan de puissance de la charge

selon les charges électriques de l'habitat, nous avons estimé et établi un profil de consommation annuel type.

### 3.8.7.2. *Profile de consommation jour de la semaine été*

Pendant l'été de la famille se lève à 6h . Avant 6h La consommation est faible environ 140W (frigo plus quelque appareil chargeur téléphone, modem, etc). après 6h la famille se lève, la consommation augmente a cause de la préparation petit déjeuner (pompe ou micro-onde). A 8h quelque membre la famille sort. La consommation électrique baisse. puis elle augmente en fonction des activités de (ménage et préparation de déjeuner); après le déjeuner, une croissance significative de la consommation d'électricité à cause de l'utilisation des climatiseurs environ 1600W . La consommation retombe à 16 h puis elle augmente pendant la nuit (utilisation des climatiseur ou pas en fonction de la température).

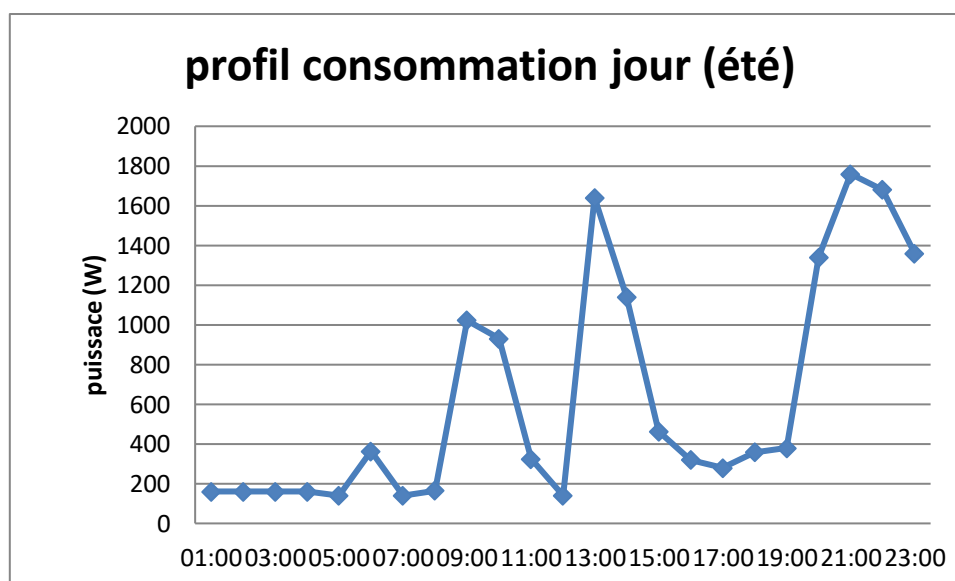


Figure III.16 Profils de consommation journalière saison été pour l'habitat résidentiel

### 3.8.7.3. *consommation jour weekend*

La consommation énergétique est plus faible entre minuit et 7h le week-end, autour de 160W/h. Puis, elle augmente entre 8h et 12h en raison des tâches matinales dans la cuisine et la salle de bain.



à 14h et à 22h la consommation augmente suite à l'utilisation des climatiseurs à raison de la température élevée.

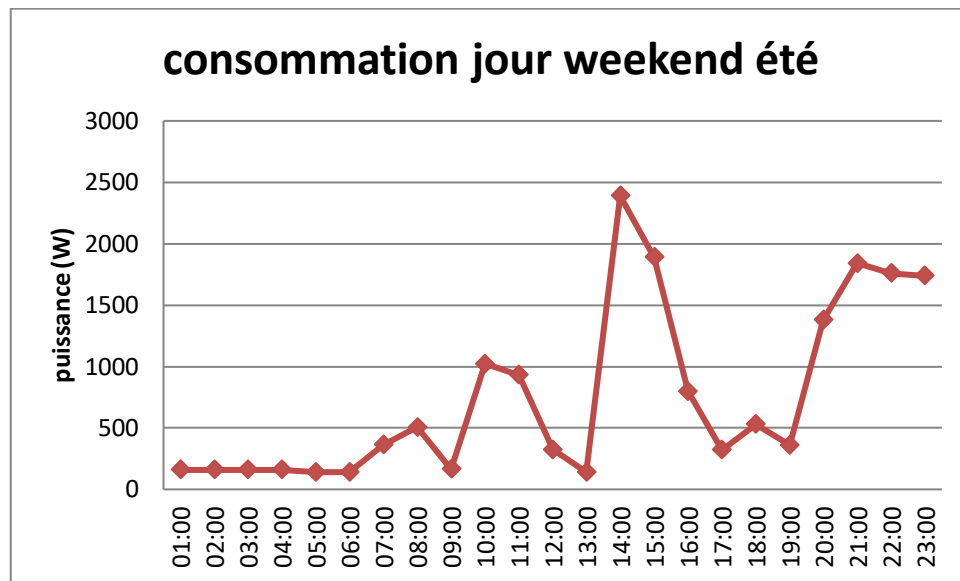


Figure III.17 Profils de consommation jour weekend saison été pour l'habitat résidentiel

Les figures ci dessous représente les différents profils de consommation journaliers estimé pour les autres saisons

#### 3.8.7.4. consommation jour hiver

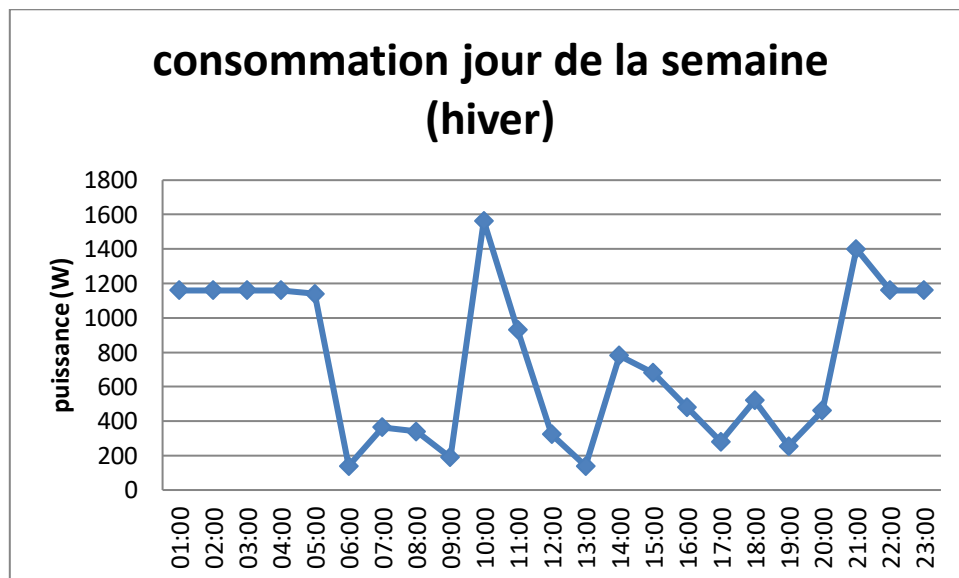


Figure III.18 Profils de consommation journalière saison hiver pour l'habitat résidentiel

## 3.8.7.5. consommation jour printemps/ automne

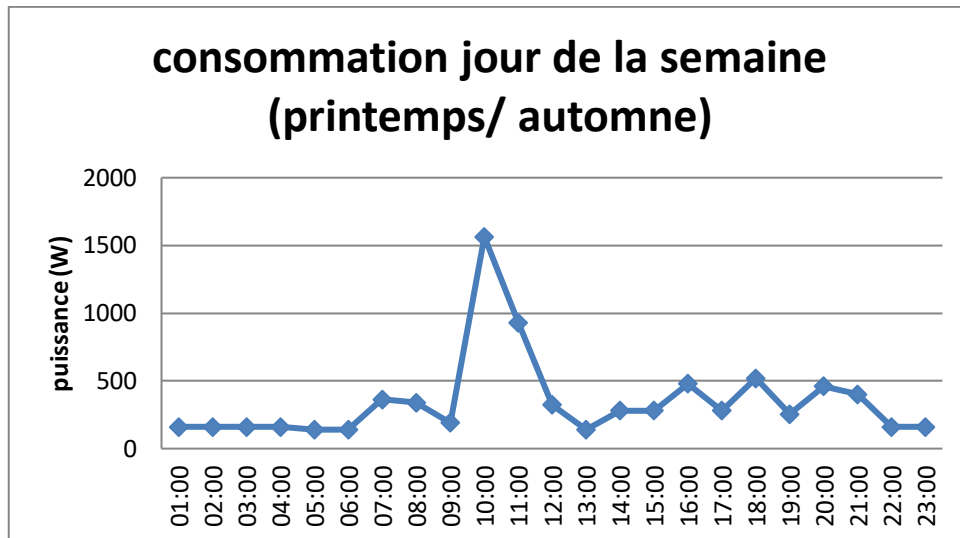


Figure III.19 Profils de consommation journalière saison printemps /automne pour l'habitat résidentiel

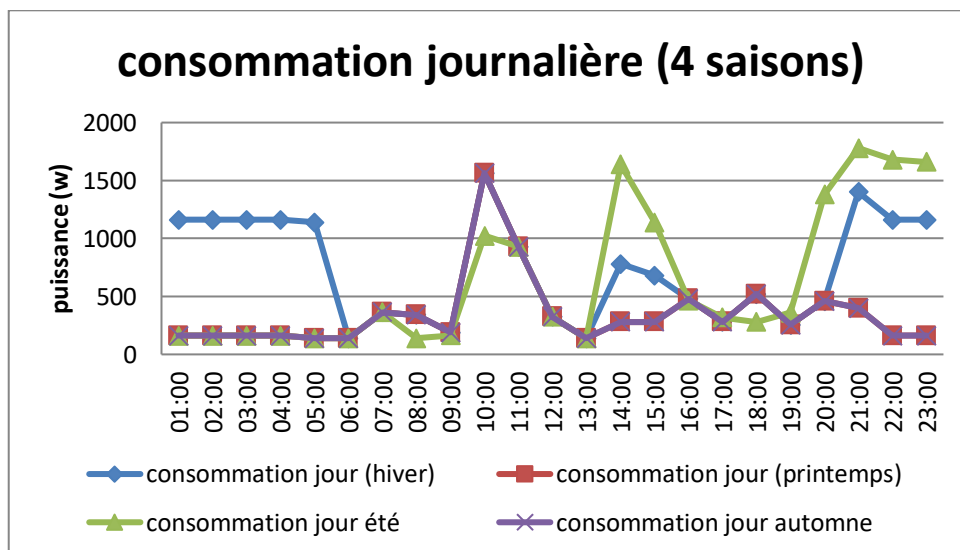


Figure III.20 Profils de consommation journalière pour (4 saisons)

## 3.9. Conclusion

Ce chapitre expose les diverses structures existantes de systèmes de production d'électricité multi-sources basés sur les énergies renouvelables.

La variété de structures des Systèmes d'Énergie Hybrides (SEH) à courant continu (CC), à courant alternatif (CA) et hybride en mode mixte (CC/CA) exige l'élaboration d'une stratégie de gestion énergétique. Pour atteindre cet objectif, nous avons procédé à la modélisation de chaque générateur du système hybride (SEH) dans le but d'optimiser sa taille et de satisfaire aux exigences énergétiques de la charge représentée par une maison isolée dans la région d'Adrar.

# Chapitre IV

## *Dimensionnement et critères d'optimisation*

### **4.1. Introduction**

L'association de divers générateurs d'énergie pour un système mixte permet de produire à moindre coût l'électricité de façon fiable, pour satisfaire les besoins de la charge.

Le choix exact (dimensionnement optimal) des éléments de ces systèmes est un grand obstacle lors de la phase de création. Le but minimiser le prix de génération d'électricité (\$/kWh) et garantir un service optimal continu (fiabilité).

Le choix des valeurs de référence et de mesure est crucial durant l'élaboration d'une installation multi-sources pour une localité spécifique. Ce chapitre expose les phases indispensables pour le choix optimal de dimensionnement d'un système-hybride, ainsi que les logiciels et les méthodes de dimensionnement et d'optimisation.

Dans la 2ème phase de ce chapitre, nous détaillerons les divers critères d'optimisation employés pour établir une configuration optimale du SEH et garantir une stratégie efficace de gestion énergétique de notre système hybride sélectionné.

### **4.2. Dimensionnement des systèmes mixtes**

Le processus de conception de systèmes énergétiques hybrides consiste à sélectionner, à dimensionner la combinaison optimale de sources d'énergie, des dispositifs de conversions et de systèmes de stockage, et d'appliquer des stratégies d'exploitation efficaces. [73]

Le dimensionnement du système hybride est l'acte de trouver la capacité nécessaire de chaque générateur du système pour satisfaire le cahier des charges sans sous-dimensionnés ou surdimensionnés compte tenu des contraintes d'évaluation du temps et d'utilisation en temps réel.

Identifier la configuration optimale pour satisfaire les besoins fonctionnels que les besoins économiques c'est d'obtenir un compromis entre plusieurs facteurs tels que

- Le profil de consommation
- Les données climatiques du site (température, vitesse du vent, éclaircissement, humidité).
- Les exigences et les besoins du consommateur;

cependant, la plupart des chercheurs prennent en moyenne des heures, des jours ou des mois comme temps d'utilisation.

deux de méthodes de dimensionnement existe dans la littérature ; la première repose sur les méthodes traditionnelle et la deuxième basé sur l'utilisation des logiciels de dimensionnement et d'optimisation (figure IV.1). [74-75-76]

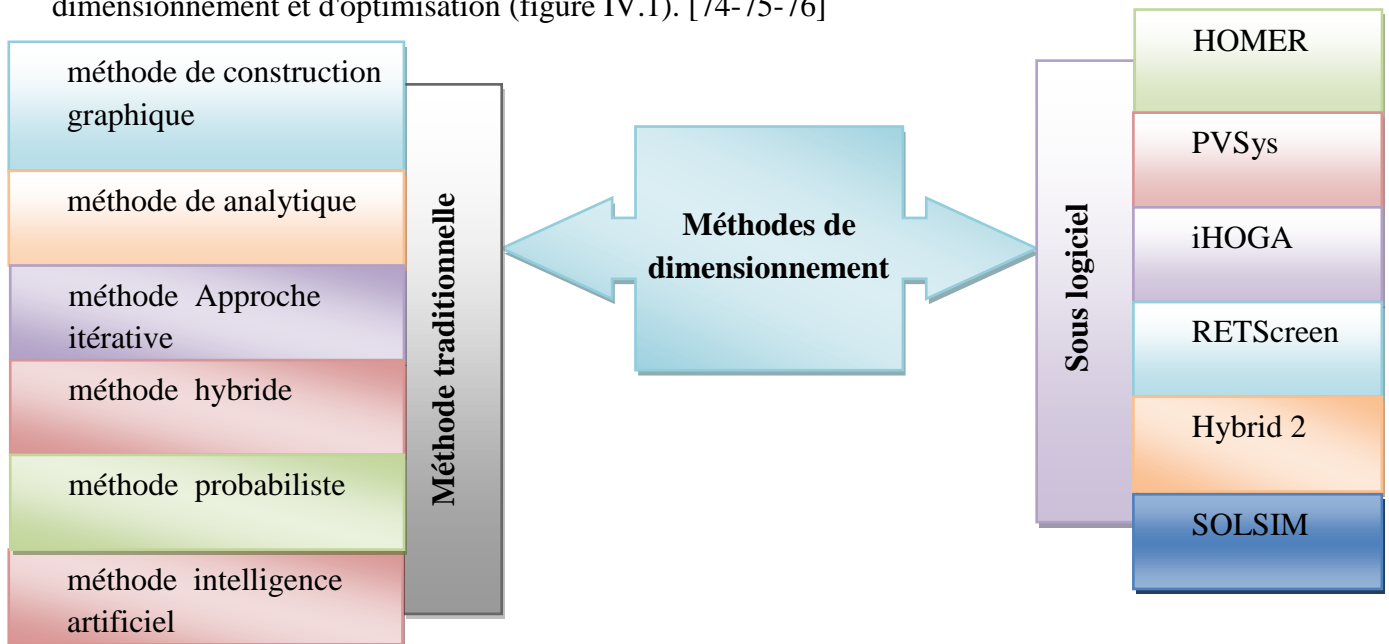


Figure IV.1 méthode de dimensionnement des systèmes hybride

De manière générale, dans une installation mixte, le développeur du système doit associer Des moyens énergétiques et de stockage pour répondre à ces deux objectifs

- production électrique suffisante selon les besoin des consommateurs ;
- minimiser le coût de l'énergie consommée..

Multiples méthodes ont été traitées dans la Littérature pour solutionner ce souci d'optimisation, que nous pouvons citer:

- La moyenne mensuelle annuelle [77].
- Le mois le plus défavorable [77-78]
- La probabilité de perte de la charge.
- La probabilité de perte d'approvisionnement.
- Algorithmes génétiques [79].
- Algorithmes de Pareto [80-81].

### 4.3. dimensionnement sans logiciel

#### 4.3.1.Méthode de dimensionnement traditionnelle des Systèmes hybride

L'énergie générée par unité de surface du système et par mois est exprimée en (KWh/m<sup>2</sup>) Espv,i pour le photovoltaïque , Esel,i (kWh/m<sup>2</sup>) pour l'éolien (où i = 1, ..., 12, est le numéro du mois de l'année).

Le mois le plus défavorable dépend des conditions climatiques, de la charge mensuelle, et des performances des éléments constituant le système.

La superficie du générateur indispensable afin de garantir l'alimentation globale (100%) de la charge  $E_c$  pendant le mois le plus défavorable est donnée par (IV.1): [82-83]

$$S_n = \max \left( \frac{E_{c,i}}{E_{n,i}} \right) \quad (IV.1)$$

n: type de générateur (pv ou el)

n=pv  $\Rightarrow$  source photovoltaïque

n= el  $\Rightarrow$  source éolienne

L'énergie globale générée par les 2 générateurs photovoltaïque/éolien dans un système hybride est donnée par (IV.2):

$$E_c = S_{pv} * E_{pv} + S_{el} * E_{el} \quad (IV.2)$$

avec

$$E_c * f = S_{pv} * E_{pv} \quad (IV.3)$$

$$E_c (1 - f) = S_{el} * E_{el} \quad (IV.4)$$

où  $f$  désigne la tranche de la charge prise en charge par le générateur photovoltaïque et  $(1 - f)$  celle prise en charge par le générateur éolien.

$f = 0 \Rightarrow$  prise en charge 100 % éolienne.

$f = 1 \Rightarrow$  prise en charge 100% par la source photovoltaïque.

#### 4.3.2. Méthode des moyennes-mensuelles-annuelles[82-83]

Dans cette approche, on évalue la dimension des générateurs photovoltaïques et éoliens en se basant sur des données moyennes-annuelles de chaque participation appelée  $\overline{E_{pv}}$ ,  $\overline{E_{el}}$  (du mois).

De même, la charge est exprimée par la moyenne-mensuelle-annuelle. Ainsi, les superficies des 2 générateurs solaires et éoliens sont indiquées par (IV.5)(IV.6):

$$A_{pv} = f \frac{\overline{E_L}}{\overline{E_{pv}}} \quad (IV.5)$$

$$A_{el} = (1 - f) \frac{\overline{E_L}}{\overline{E_{el}}} \quad (IV.6)$$

Cette approche est employée lorsqu'il y a des données météorologiques incidentes.

#### 4.3.3. Méthode du mois le plus défavorable [82-83]

Cette méthode est basée sur le mois le plus défavorable (solaire et l'éolien), pour le dimensionnement des éléments du système hybride (PV/EOLIEN).

La surface nécessaire pour chaque générateur est exprimée par:

$$A_{pv} = f * \max\left(\frac{E_{L.m}}{E_{pv.m}}\right) \quad (IV.7)$$

$$A_{el} = (1 - f) * \max\left(\frac{E_{L.m}}{E_{el.m}}\right) \quad (IV.8)$$

#### 4.4. Logiciel de dimensionnement et critères d'optimisation

Le progiciel de dimensionnement est un moyen primordial pour l'examen, l'évaluation des performances et le coût de production des différentes combinaisons des sources possibles du systèmes hybrides à base d'énergie renouvelable utilisées.

Diverse applications logiciels de dimensionnement disponible sur le net, parmi lesquels les plus connus sont: (HOMER, PVSYST, HYBRID2, RETSCREEN, SOLSIM, HOGA .....). [73-74 -75-84]

Les programmes de simulation, aide les concepteur à trouver la configuration optimale du système de production d'énergie selon le coût de production, performance du système.

##### 4.4.1.HOMER

(Hybrid Optimization Model for Electric Renewable): logiciel de dimensionnement et d'optimisation évolué aux États-Unis par le laboratoire américain NREL (National Renewable Energy Laboratory)

le logiciel HOMER est l'un des Logiciel de dimensionnement extrêmement connu pour les installation mixtes; HOMER possède de multiples modèles des sources d'énergie: générateur photovoltaïque (PV), éolien, batteries, piles à combustible, générateur diesel et unités d'électrolyse, il permet d'évalue et d'optimiser les coûts en fonction de la disponibilité des ressources énergétiques.

Cet outil puissant permet d'étudier, modéliser et de simuler les systèmes connectées au réseau et les systèmes autonomes avec stockage, photovoltaïques, éolien et hybrides, déterministes et stochastiques, comme l'éolien, le photovoltaïque, l'hydroélectricité, la biomasse, et les piles à combustibles

Logiciel HOMER est destiner aux concepteurs pour l'optimisation des installations à énergies renouvelables pour définir les dimensions et la configuration idéale de ses éléments par la évaluation et l'analyse technique-économique et environnemental. [85]

La résolution des problèmes avec HOMER basé sur trois principaux étapes: simulation, optimisation et analyse de sensibilité.

La simulation réalise des calculs de bilan énergétique selon la structure du système et il compare la demande électrique et thermique à l'énergie que l'installation peut produire et

calcule les flux d'énergie vers et depuis chaque composant du système. La tâche d'optimisation donne toutes les configurations possibles et réalisables selon le coût net actuel total triées par coût net actuel. Le système tient compte des calculs d'installation, de remplacement, d'exploitation et de maintenance, de carburant et d'intérêts réels. L'étude de sensibilité détermine différents paramètres comme la vitesse du vent et le coût du carburant selon la spécification du concepteur. HOMER évalue la réalisation des installations électriques autonomes et raccordées au réseau. Il démontre les solutions sous plusieurs façons graphiques, tableaux et de qui aide à classer et d'évaluer les configurations selon leurs coûts. [86-87-88]

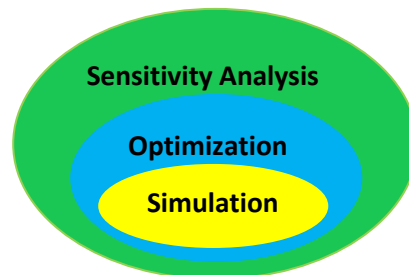


Figure IV.2 résolution problème par HOMER pro

#### 4.4.2. RETScreen:

Logiciel de gestion d'énergies propres, développé en Canada ,

Le logiciel RETScreen élaboré dans classeur Microsoft®Excel individuel, Le classeur est combiné d'une suite de feuilles de calcul. L'analyse de projet standardisée en cinq étapes; chacune des 5 étapes de la tâche d'analyse standard est combinée à une ou plusieurs feuilles de calcul Excel. La Figure IV.3 ci-dessous présente l'organigramme du modèle standard d'analyse RETScreen. [89-90].

#### Analyse standard en cinq étapes ➡

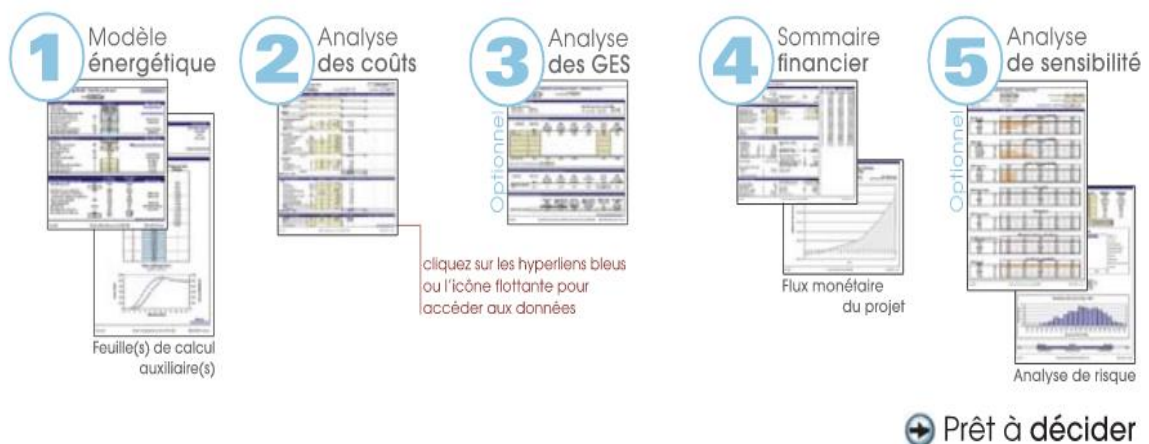


Figure IV.3 Etapes d'analyse avec le logiciel RETScreen



RETScreen Expert est la version la plus récente du logiciel, une version avancée qui a été mise en ligne en septembre 2016. Le logiciel offre la possibilité d'évaluer, de reconnaître et d'optimiser entièrement la durabilité technique et économique de projets éventuels en matière d'énergie renouvelable, de cogénération et d'efficacité énergétique. Il est également utile pour évaluer et vérifier les réelles performances des installations, ainsi que pour explorer les opportunités de génération et de réduire les dépenses énergétiques. [91]

La figure ci dessous montre le flux de travail RETScreen Expert

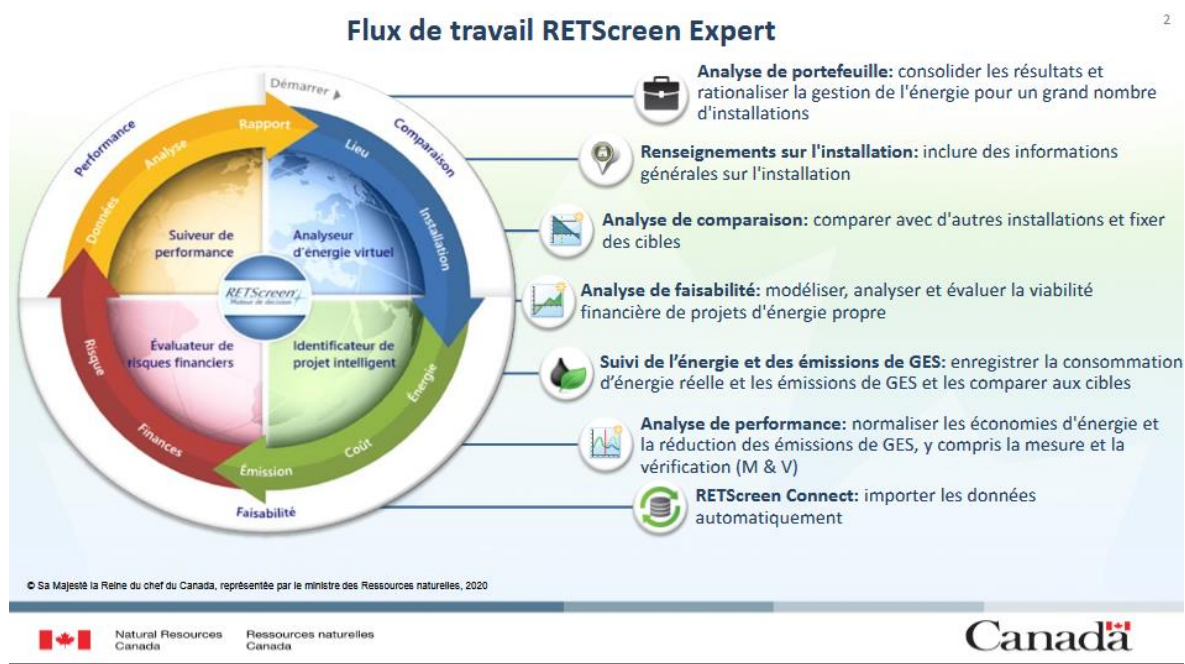


Figure IV.4 Le flux de travail RETS [91]

#### 4.4.3.PVSYST

Le logiciel PVSYST parmi les plus anciens et les plus performants logiciels destinés à l'étude des systèmes photovoltaïques, Elaboré par *André Mermoud* physicien suisse et *Michel Villos* l'ingénieur électricien, [92]

Le PVsyst : logiciel de dimensionnement et d'analyse des données de systèmes photovoltaïques complets. Il permet d'obtenir une variété d'informations comme : l'irradiation, la production d'énergie, les frais de l'installation, la superficie indispensable et la génération d'énergie par an. Il met à disposition le traitement des systèmes photovoltaïques autonomes, connectés au réseau, de pompage, contient des bases de données complètes des éléments de systèmes photovoltaïques et de météorologie, ainsi que des dispositifs généraux d'énergie solaire.

il est adapté aux besoins des ingénieurs, des architectes et des chercheurs. Très efficace pour la formation pédagogique notamment la simulation en 3D du trajet du soleil, ombres portées pour optimiser l'installation des panneaux solaires.[93-94]

#### 4.4.4.iHOGA/MHOGA

iHOGA / MHOGA logiciel de simulation sous l'algorithmes génétiques (HOGA) (Hybrid Optimization by Genetic Algorithms) élaboré en C++ par des chercheurs de l'Université de Saragosse (Espagne). il autorise de simuler et d'optimiser des installation hybride de production d'énergie électrique autonomes ou connectés au réseau basés sur les énergies renouvelables et de réduire le coût net actuel global de l'installation(NPC).

Il existe deux versions du logiciel iHOGA et MHOGA:

iHOGA ( improved Hybrid Optimization by Genetic Algorithms) désigné aux installation où la production de quelques W jusqu'à 5 MW.

MHOGA est destiné aux systèmes de puissance MW, Il a été développé avec la collaboration de Sisener Ingenieros

Le logiciel admettre la modélisation les différent composant de systèmes hybride de production d'énergie : générateur photovoltaïque éoliennes, turbine hydroélectrique , générateur auxiliaire (diesel, essence...), onduleur , batteries, ainsi que des composants d'hydrogène (électrolyseur, réservoir d'hydrogène et pile à combustible) pour l'alimentation des charges de consommation d'énergie électrique (AC /DC).[95-96]

Le tableau ci-dessous récapitule les atouts et les désavantages des logiciels: [97]

outil	Avantages	limites
HOMER	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Représentation graphique efficace des résultats.</li> <li>• Facile à comprendre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilise des équations linéaires du premier degré.</li> <li>• Impossible d'importer des données de séries chronologiques</li> <li>• code employé "boite noire"</li> </ul>
RETScreen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meilleure base de données météorologique NASA</li> <li>• Outil basé sur Excel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Moins de données saisies.</li> <li>• Impossible d'importer des données de séries chronologiques.</li> <li>• les fonctions limitées de recherche, de récupération et de visualisation.</li> </ul>

iHOGA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilisez l'optimisation multi ou mono-objectif -</li> <li>• temps de simulation Faible</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absence d'analyse de sensibilité et de probabilité</li> <li>• Charge journalière limitée (10 kWh)</li> <li>• La version gratuite d'EDU limités</li> </ul>
HYBRID 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Divers options de charge électrique</li> <li>• Option de répartition détaillée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ne marche pas sur les plateformes Windows postérieures à Windows XP</li> <li>• temps de simulation long</li> <li>• certaines erreurs de simulation s'affichent malgré que le projet soit écrit avec succès</li> </ul>
TRNSys	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flexibilité dans la simulation</li> <li>• Grande précision graphique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impossible de simuler certains générateurs comme l'hydroélectricité.</li> <li>• Absence d'option d'optimisation</li> </ul>

Tableau IV.1 Avantages et les inconvénients de chaque logiciel.

## 4.5. Conception et analyse d'un problème d'optimisation

### 4.5.1. Problème d'optimisation

Un souci d'optimisation sous contraintes est un programme mathématique dans  $\mathbb{R}^n$  de la forme (IV.9):

$$\begin{cases} \min f(x) & , f \in \mathcal{R} \\ g_i(x) = 0, & i = 1..m \\ h_j(x) \leq 0, & j = 1..n \end{cases} \quad (\text{IV.9})$$

ou le vecteur  $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathcal{R}$  sont les variables du problème.

$f(x)$  : La fonction objectif

$g_i(x) = 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$  : Les contraintes d'égalité du problème

$h_j(x) \leq 0$ ,  $j = 1, \dots, n$  : Les contraintes d'inégalité du problème. [98]

### 4.5.2. Variables du problème

La signification des variables implique une sélection empirique. Pour élever le degré de liberté de l'algorithme, un grand nombre de paramètres peuvent devoir être modifiés.

Les variables du problème sont des nbs réels, des nbs complexes, des entiers, des valeurs booléennes, etc.

#### **4.5.3. Espace de recherche [98]**

Pour les algorithmes génétiques, généralement il est indispensable de déterminer un espace de recherche limité. Cette restriction de l'espace de recherche ne pose pas de problèmes. Pour des raisons techniques ou informatiques (comme la dimension de la grille de modélisation), les plages de valeurs des variables sont fréquemment restreintes. Toutefois, dans quelques algorithmes d'optimisation, tels que les approches évolutives, la critère de terrain de recherche est infinie et uniquement la collectivité première est véritablement confinée à un espace fini.

#### **4.5.4. Fonction objectif**

Les algorithmes d'optimisation demandent fréquemment l'établissement d'une fonction qui prend en considération la corrélation entre les solutions envisageables, selon les paramètres à optimiser. Peu importe comment la fonction objectif est définie, le programme converge à la valeur optimale de cette fonction, qui est le résultat majeur.

#### **4.5.5. Les contraintes**

On qualifie de contraintes l'ensemble des relations qui limitent les valeurs potentielles des variables. On peut résumer ces relations par des contraintes sur les variables.

Les algorithmes d'optimisation sont fréquemment utilisés pour résoudre des problèmes d'optimisation. Les techniques d'optimisation ont pour but de déterminer l'ensemble des paramètres d'un objet à optimiser, afin d'obtenir la valeur optimale, soit minimale ou la plus grande, de la fonction liée au problème. [98]

Les algorithmes d'optimisation doivent être aptes à atteindre un but optimal en réduisant ou en améliorant une fonction dépendant de paramètres changeants. Habituellement, pour chaque technique d'optimisation, le chercheur spécifie les variables du sujet, le domaine de recherche et la fonction d'adéquation liée au problème.

#### 4.6. Algorithmes d'optimisation

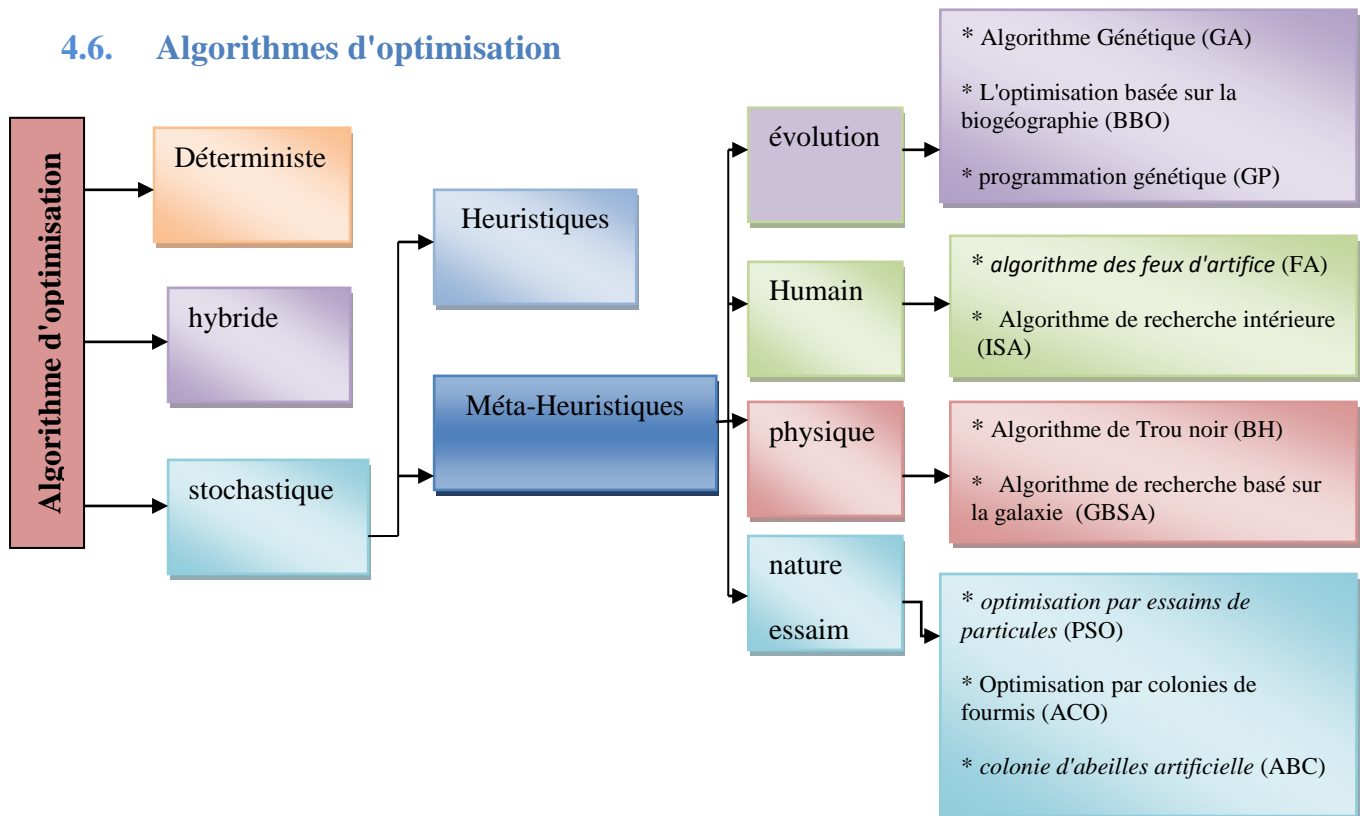


Figure IV.5 Algorithmes d'optimisation [75-99-100]

##### 4.6.1. Algorithme génétique (GA)

Un algorithme génétique fait partie des méthodes populaires qui utilisent des métaheuristiques. Le concept a vu le jour 1960 et développée par John Holland à l'université de Michigan dans les années 1970.

Les algorithmes génétiques sont aussi des algorithmes évolutionnaires, c'est-à-dire des algorithmes à base de théorie de l'évolution. On évalue et améliore itérativement une série des résultats, identifier par le terme « population », en utilisant divers opérateurs de croisement et de mutation.

Figure IV.6 représente le mode opérationnel de l'algorithme génétique.

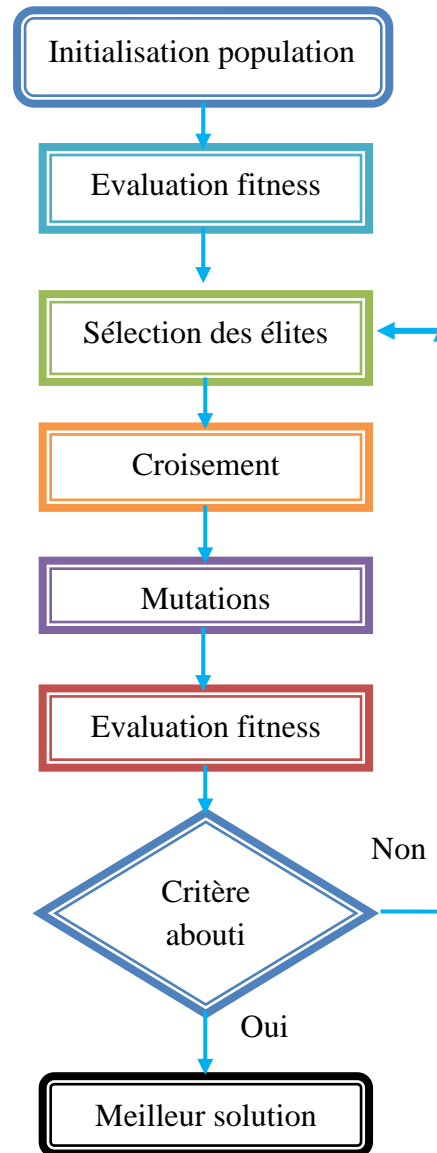


Figure IV.6 principe de fonctionnement Algorithme Génétique

#### 4.6.2. L'optimisation par essaim de particules PSO (Particle Swarm Optimization)

L'optimisation par essaim de particules (PSO) est une méthode d'optimisation stochastique basée sur la population qui a été proposée par Kennedy et Eberhart (1995). Elle a été mise en œuvre avec réussite pour une multitude de problèmes notamment l'entraînement de réseaux neuronaux artificiels, l'optimisation des fonctions, le contrôle flou. [101-102]

L'algorithme PSO a été inspiré par une simulation des schémas de vol complexes d'une volée d'oiseaux. Leurs simulations initiales ont évolué vers un algorithme d'optimisation simple qui présente un comportement complexe.

Le PSO est un algorithme composé d'un groupe d'agents, connus sous le nom de particules, où chaque particule est une solution potentielle au problème d'optimisation actuel.

Trois informations sont conservées par chaque particule : sa position actuelle, sa vitesse actuelle et la position la plus avantageuse qu'elle a trouvée dans l'espace de recherche. Le calcul itératif d'un vecteur de vitesse est ensuite utilisé pour contrôler le mouvement des particules. La vitesse de chaque particule est calculée selon son attraction vers deux positions prometteuses dans le domaine de recherche, à savoir l'emplacement le plus favorable atteint par la particule et le meilleur emplacement atteint par toute autre particule dans le voisinage de la particule. [103]

Une particule est aussi susceptible de maintenir sa trajectoire actuelle grâce à un élément d'inertie. Le voisinage d'une particule fait référence aux autres particules au sein de l'essaim sur lesquelles elle peut prendre une influence. [103]

(PSO) "optimisation par essaim de particules" est une technique de recherche parallèle multi-agents qui conserve un ensemble de particules, chaque particule étant une solution potentielle dans l'essaim.

Chaque particule se déplace dans un espace de recherche multidimensionnel où chaque particule modifie sa position selon son expérience privée et l'emplacement de ses proches.

Par exemple,  $x_i^t$  appelle le vecteur de position de la particule  $i$  dans l'espace de recherche multidimensionnel ( $\mathcal{R}^n$ ) au pas de temps  $t$ , puis on met à jour la position de chaque particule dans l'espace de recherche par (IV.10). [103-104]

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (\text{IV.10})$$

avec

$$x_i^t \sim U(x_{min}, x_{max})$$

$U(x_{min}, x_{max})$  est la distribution uniforme où se trouvent  $x_{min}$  et  $x_{max}$  ses valeurs minimales et maximales respectivement.

$v_i^t$  est le vecteur de vitesse de la particule  $i$ .

#### 4.6.2.1. Paramètres de l'algorithme PSO

Les performances de l'algorithme PSO peuvent être influencées par certains paramètres. Toutes les valeurs et les choix de ces paramètres ont un effet significatif sur l'efficacité de la méthode PSO, tandis que d'autres paramètres ont un impact faible ou nul. La taille de l'essaim ou le nombre de particules, le nombre d'itérations, les composantes de vitesse et les coefficients d'accélération sont les paramètres PSO fondamentaux. [104-105]

##### a) Taille de l'essaim:

Le nombre de particules  $n$  dans l'essaim est connu sous le nom de taille de l'essaim ou de la population. Par itération, un essaim important produit de plus grandes parties de l'espace de

recherche à couvrir. Pour obtenir un bon résultat d'optimisation, il est possible de diminuer le nombre de itération nécessaires en utilisant un grand nombre de particules. Par contre, de grandes quantités de particules rendent le calcul par itération plus complexe et plus long. D'après plusieurs recherches empiriques, il a été prouvé que la majorité des mises en œuvre PSO n ∈ [20 60] pour la dimension de l'essaim. [104]

#### ***b) Nombre d'itérations***

Le nombre d'itérations requis pour obtenir un bon résultat varie également en fonction du problème rencontré. Un nombre trop faible d'itérations peut entraîner une pause prématurée dans le processus de recherche, tandis qu'un nombre trop élevé d'itérations entraîne une complexité de calcul supplémentaire inutile et un délai de traitement prolongé.

#### ***c) composantes de vitesse***

Les éléments de vitesse jouent un rôle crucial dans la mise à jour de la vitesse des particules. La vitesse des particules est exprimée en trois termes dans les équations (IV.11) et (IV.12) :

$$v_{ij}^{t+1} = v_{ij}^t + c_1 r_{1j}^t [P_{best,i}^t - x_{ij}^t] + c_2 r_{2j}^t [L_{best,i} - x_{ij}^t] \quad (IV.11)$$

$$v_{ij}^{t+1} = v_{ij}^t + c_1 r_{1j}^t [P_{best,i}^t - x_{ij}^t] + c_2 r_{2j}^t [G_{best} - x_{ij}^t] \quad (IV.12)$$

$v_{ij}^t$  est le vecteur de vitesse de la particule  $i$  de dimension  $j$  à l'instant  $t$ .

$x_{ij}^t$  est le vecteur de position de la particule  $i$  de dimension  $j$  à l'instant  $t$ ;

$P_{best,i}$  meilleur emplacement personnelle du particule  $i$  de dimension  $j$  trouvée depuis l'initialisation jusqu'au temps  $t$  ;

$L_{best,i}$  est la position optimale qu'une particule ait occupée dans le voisinage de la particule  $i$  découverte depuis l'initiation jusqu'au temps  $t$ .

$G_{best}$  est la meilleure position globale de la particule  $i$  de dimension  $j$  trouvée depuis l'initialisation jusqu'au temps  $t$  ;

$C_1, C_2$  sont des constantes d'accélération positives qui servent à équilibrer la contribution des éléments cognitifs et sociaux respectivement.

$r_{1j}^t, r_{2j}^t$  sont des nombres aléatoires issus d'une distribution uniforme à l'instant  $t$

1. Le terme  $v_{ij}^t$  est désigné sous le nom de composante d'inertie qui aide de conserver un enregistrement de la direction du vol précédente, c'est-à-dire du mouvement dans le passé immédiat. Il s'agit d'un élan qui empêche une modification radicale de la direction des particules et une pente vers la direction actuelle.[101-103-104-106]

2.  $C_1 r_{1j}^t [P_{best,i}^t - x_{ij}^t]$  est une composante cognitive qui évalue la performance des particules en comparaison avec leurs performances antérieures. Cette composante ressemble à une mémoire individuelle de la position optimale pour la particule. L'effet de la composante



cognitive correspond à la tendance des individus à revenir aux positions qui les satisfaisaient le plus auparavant. On désigne cette partie cognitive sous le nom de nostalgie de la particule. Le coefficient d'accélération cognitive est généralement compris dans l'intervalle  $[0 \ 2]$  [101-103-104]

3.  $C_2 r_{2j} [G_{best} - x_{ij}^t]$  pour gbest PSO ou  $C_2 r_{2j} [L_{best,i} - x_{ij}^t]$  pour lbest PSO est connu sous le nom composante sociale qui évalue la performance des particules par rapport à un groupe de particules ou à leurs voisins. La composante sociale a pour effet que chaque particule se dirige vers la position optimale trouvée par les autres particules. Couramment, le coefficient d'accélération sociale positionné au sein de la plage  $([0 \ 2])$ . [101-103-104]

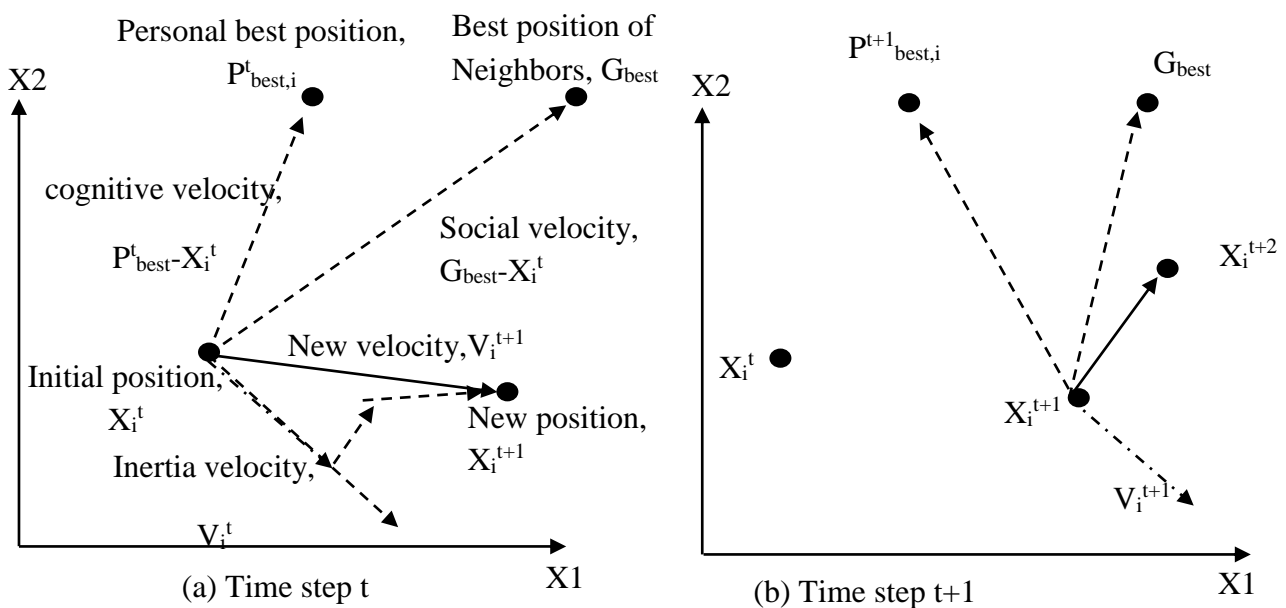


Figure IV.7 principe de fonctionnement Algorithme PSO

#### 4.7. Critère d'optimisation d'un système hybride

Plusieurs critères sont étudiés afin d'optimiser la conception et le dimensionnement des composants des SERH. On peut regrouper ces critères qui ont été adoptés par les chercheurs en trois catégories principales: économiques, techniques et écologiques. Les critères économiques sont employés afin de minimiser les coûts des SERH. La fiabilité, l'efficacité et les objectifs environnementaux sont des critères techniques essentiels pour répondre à la demande de charge des SERH aux niveaux de fiabilité désirés, tout en maximisant l'efficacité et en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. [82-107]

#### 4.7.1. Optimisation du coût:

L'optimisation des coûts des systèmes d'énergie renouvelable hybrides comprend la minimisation des coûts énergétiques, du coût actuel net (NPC) et de tout autre coût associé à ces systèmes.

##### 4.7.1.1. Minimisation des coûts énergétiques (EC )Energy cost

Différentes recherches se sont concentrées sur la réduction du coût actuel de l'énergie (LCE) pour les SERH. Le rapport LCE correspond à la relation entre les frais global du système hybride et l'énergie annuelle produite par celui-ci.

Généralement la durabilité de l'installation hybride est estimée à 20 ans et le pack de batteries est normalement remplacé tous les 5 ans. Le coût de l'énergie dépend également du coût d'investissement, des coûts d'exploitation et de maintenance, de la période d'amortissement et la quantité d'énergie produite en un an, de la tendance potentielle à la baisse du coût de l'équipement en fonction l'augmentation des volumes, etc. l'équation (IV.13) exprime la relation de calcul des coûts. [108]

$$C_E = C_{cap} * \frac{R}{E_{Tot}} + C_{O\&M} \quad (IV.13)$$

où CE est le coût d'énergie, C<sub>Cap</sub> est le coût en capital du générateur HRES et du dispositif de stockage, R est le taux d'actualisation annuel des coûts en capital, E<sub>Tot</sub> est l'énergie totale produite et C<sub>O&M</sub> sont les coûts annuels d'exploitation et de maintenance.

De nombreux chercheurs ont largement utilisé le coût de l'électricité produite pour évaluer la configuration HRES. Le coût par kWh est utile pour l'évaluation des HRES. Le coût de l'électricité par kWh est donné par l'équation (IV.14).

$$Cost/Kwh(\$) = \frac{C_{Total}}{E_{Total(Kwh)}} \quad (IV.14)$$

où C<sub>Total</sub> est le coût total annuel dépensé pour générer la production annuelle totale d'électricité E<sub>Total</sub> en kWh [107][108]

##### 4.7.1.2. Minimisation du coût actuel net (Net present cost minimization (NPC))

Le coût actuel net (NPC) d'un HRES est défini comme la valeur actuelle totale du système qui comprend le coût initial des éléments du système ainsi que le coût de remplacement et de maintenance pendant la durée de vie du projet. Il s'agit de réduire au maximum le NPC des HRES. [54-107]

$$minNPC = \frac{TAC}{CRF(i;N)} \quad (IV.15)$$

TAC: Le coût annuel total (the total annualized cost (\$/year).

CRF: Le facteur de récupération des capitaux the capital recovery factor.

i: Taux d'intérêt réel annuel (annual real interest rate).

N: durée de vie du projet (the project lifetime in years).

$$\min NPC = \frac{(ACC+ARC+AMC)}{\left[ \frac{i(1+i)^j}{(1+i)^j - 1} \right]} \quad (IV.16)$$

ACC: Le coût du capital annualisé (the annualized capital cost).

ARC: le coût de remplacement (the annualized replacement cost).

AMC: le coût de maintenance (the annualized maintenance cost).

j: the project life time.

i: the annual interest rate.

#### 4.7.2. Optimisation technique

En plus de l'amélioration des coûts mentionnée dans le paragraphe précédent, il est également possible d'optimiser les objectifs techniques lors de la conception d'un HRES. Les objectifs techniques incluent, sans s'y limiter, la satisfaction des niveaux de fiabilité désirés en fonction de la probabilité de perte d'alimentation électrique (LPSP) ou de la probabilité de perte de charge (LOL) , la réduction du rapport coût/efficacité , la minimisation des émissions de carbone et la maximisation de la disponibilité de l'énergie.

##### 4.7.2.1. Probabilité de perte d'alimentation électrique *Loss of Power Supply Probability (LPSP)*

Cette méthode d'optimisation est utilisé pour évaluer le nombre optimal de modules photovoltaïques, de batteries, de capacité de l'éolienne et d'autres générateurs renouvelables.

en fonction de la fiabilité de l'approvisionnement électrique. La fiabilité de l'électricité repose sur le concept de la probabilité de perte d'électricité d'un système hybride impuissant de répondre à la demande de charge.

La LPSP est la fraction moyenne à long terme de la perte qui n'est pas fournie par un système électrique. Une LPSP de 1 signifie que la charge n'est jamais satisfaite tandis qu'une LPSP de 0 signifie que la charge est toujours satisfaite.

On peut résumer la méthodologie de la LPSP en deux étapes :

a. Lorsque le HRES produit de l'énergie supplémentaire, l'énergie supplémentaire est utilisée pour recharger la batterie et un nouvel état de charge (SOC) est calculé jusqu'à ce que la capacité de la batterie soit pleine. Après une charge complète de la batterie, l'énergie supplémentaire ne sert pas à un travail productif.

b. Lorsqu'il y a une pénurie d'énergie produite par le HRES, l'énergie stockée dans la batterie est utilisée pour répondre à la demande de charge, et un nouveau SOC est calculé

jusqu'à ce que la capacité de la batterie diminue au niveau minimum, jusqu'à ce que le matériel se déconnecte de la charge.

Concernant le SOC des batteries, on peut déterminer le LPSP en utilisant l'équation (IV.17).

$$LPSP = Pr\{E_B(t) \leq E_{Bmin}; \quad for \quad i \leq T\} \quad (IV.17)$$

la probabilité que l'état de charge à tout instant t, pendant une période de temps T, soit inférieur ou égal au niveau minimal de l'énergie fournie dans la batterie  $E_{Bmin}$ .

$E_B(t)$  est l'énergie stockée dans la batterie à tout instant (t).[107-108]

#### 4.7.2.2. Probabilité de perte de charge: Loss of Load Probability (LOLP)

La défaillance de fourniture (LOL) se réfère à la situation où le système HRES n'arrive pas à satisfaire la demande maximale journalière. Un LOL s'apparaît quand la demande du système excède la production disponible. On désigne par probabilité de perte de charge (LOLP) la possibilité globale d'une pénurie d'électricité (perte d'électricité) qui est exprimée en jours/ an, en heures / jour ou en % de temps. La mesure LOLP a été introduite pour la première fois par Calabrese. La LOLP est donnée par l'ensemble d'équations (IV.18-20) :[108]

$$LOLP = \frac{\sum_{i=1}^n hours(I_{supply} < I_{needed})}{n} \quad (IV.18)$$

avec

$$I_{needed}(t) = \frac{L(t) - P_w(t) - P_{pv}(t)}{V_L} \eta(I_{battery}(t)) \quad (IV.19)$$

$$I_{needed}(t) = \min(I_{max} = \frac{0.2SOC}{\Delta t}, \frac{SOC(t)\sigma - SOC_{min}}{\Delta t}) \quad (IV.20)$$

$I_{needed}(t)$  est le courant requis pour la charge à l'instant t,  $I_{supply}(t)$  est le courant produit par HRES à l'instant t, n est le quantité d'échantillons.  $V_L$  est la tension nominale nécessaire au système,  $L(t)$  est la charge électrique nécessaire à l'instant t,  $P_w(t)$  est la puissance produite par l'éolienne à l'instant t, et  $PPV(t)$  est la puissance produite par les modules PV à l'instant t. Si LOLP est faible, cela entraîne un coût onéreux du système et l'inverse. [107-108]

#### 4.7.2.3. Coût du cycle de vie: Life Cycle Cost (LCC)

Le coût du cycle de vie (LCC) désigne le coût total encouru au cours de la durée de vie productive du système. Le LCC a été utilisé pour évaluer de la faisabilité économique du système. . Le système qui présente le LCC le plus faible est toujours privilégié.

$$LCC_{PV} = \sum_{k=1}^t \frac{C_t}{(1+t)^t} \quad (IV.21)$$

$$LCC_{PVD} = (C + m)_{pv} + (C + m)_{wind} + (C + m)_{battery} + (C + m)_{diesel} - D$$

où  $LCC_{PV}$  et  $LCC_{PVD}$  sont la valeur actuelle du système avec et sans amortissement respectivement,  $t$  est le moment de l'analyse,  $i$  est le taux d'intérêt par an,  $C_t$  est le coût de l'année  $t$ ,  $m$  est le coût de maintenance du système, et  $D$  est la valeur actuelle de l'amortissement. [107-108]

$$\min LUEC \left( \frac{\$}{kWh} \right) = \frac{LCC * CRF}{\sum_{t=1}^{8760} E_{Gen}(t)} \quad (IV.22)$$

LUEC : coût unitaire actualisé de l'électricité (levelized unit electricity cost)

$E_{Gen}(t)$ : électricité totale produite sur une période

CRF: facteur de récupération du capital (capital recovery factor)

LCC: le coût du cycle de vie du système hybride ( the life cycle cost of the hybrid system).

#### 4.7.3. Minimiser les émissions de carbone [107]

$$C_{co2} = CP_{co2}(E_i * R_{i,co2}) \quad (IV.23)$$

$C_{co2}$ : la pénalité du coût gravimétrique pour les émissions de carbone

$CP_{co2}$ : coût monétaire du  $co_2$

$E_i$  : la consommation électrique annuelle des composants du système/utilisation (kWh)

$R_{i, co2}$ : taux d'émission spécifique de  $co_2$

### 4.8. Optimisation par Algorithme PSO de notre système hybride (PV/éolien) autonome

#### 4.8.1. Dimensionnement optimal par PSO

Pour obtenir la meilleure configuration des composants de notre système hybride PV-éolien-batterie, nous avons opté pour la méthode PSO. On prend en compte deux fonctions objectifs (le coût global du système, la probabilité de perte de charge LPSP).

La sélection précise (dimensionnement optimal) des éléments de installation mixte (PV/éolien) autonome est la principale préoccupation lors de la conception de tels systèmes. L'objectif est de réduire au maximum le cout liées à la production d'électricité (\$/kWh) tout en garantissant une continuité de service optimale.

Le processus d'optimisation prend en compte différentes variables de conception et de décision telles que la taille des panneaux solaires photovoltaïques  $Sp_v$ , la taille de l'éolienne  $Sw_t$  et la capacité du parc de batteries.

Chaque particule correspond à une forme distincte du système. La figure (IV.8) présente le diagramme d'optimisation et de simulation de notre approche.

Il est indispensable que les résultats d'optimisation soient assez précis afin d'éviter tout excès de puissance ou déficit. Le processus de production d'électricité à partir d'un système hybride est étroitement lié au site de mise en place du projet.

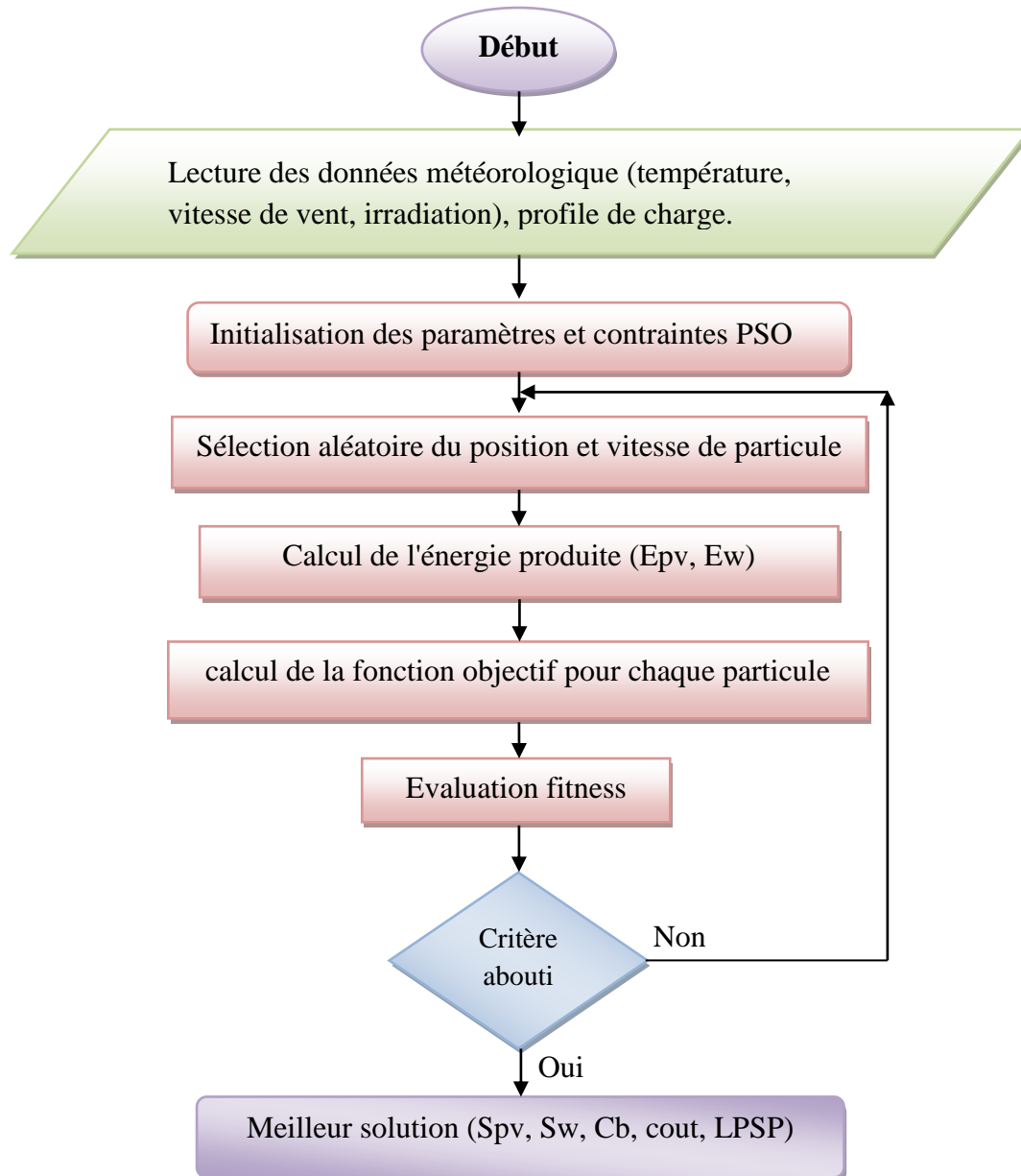


Figure IV.8 Dimensionnement optimale du notre system hybride par algorithme PSO

Le programme de simulation et d'optimisation du système est développé sous l'environnement Matlab/SIMULINK. Les paramètres de l'algorithme PSO utilise 80 particules et 50 itérations, chaque particule contenant 3 vecteurs qui indiquent la taille de générateur photovoltaïques, la taille de l'éolienne et la capacité du banc de stockage (batteries) .

#### 4.8.2. Fonction objectif

Dans notre application, nous allons nous concentrer sur la minimisation des critères économiques et techniques.

Les deux indicateurs de rentabilité économiques à minimiser sont: Le coût actuel net global (TNPC) et le coût du kilowattheure d'énergie (EC), (Les coûts sont exprimées en Dollars américains \$, tandis que la probabilité de perte d'énergie (LPSP) est utilisée comme critère technique

#### 4.8.2.1. Coût actuel net global (TNPC):

Le coût actuel net global (TNPC) en (\$), exprimé comme suit: [109-110]

$$TNPC(\$) = IC + PW_{crec} + PW_{cn-rec} \quad (IV.24)$$

IC: Le coût initial des composants du système ( incluant les frais d'installation et de raccordements).

Le coût initial des composants du système est indiqué par la relation (IV.25).

$$IC = (P_{pv} * C_{u-pv}) + (P_w * C_{u-w}) + (C_b * C_{u-B}) + (P_{inv} * C_{u-inv}) + C_0 \quad (IV.25)$$

$C_{u-pv}$ : coût unitaire (\$/w) du générateur pv,  $P_{pv}$  puissance totale du pv.

$C_{u-w}$ : coût unitaire (\$/w) du générateur éolien.  $P_w$  puissance totale du générateur éolien

$C_{u-B}$ : coût unitaire (\$/wh) du banc de batterie.  $C_b$  capacité totale en (Wh) du batterie.

$C_{u-inv}$ : coût unitaire (\$/w) du convertisseur.

$C_0$ : est le coût total constant, incluant les coûts d'installation et des raccordements.

$PW_{crec}$ ,  $PW_{cn-rec}$  sont les valeurs réelles des coûts récurrents et non-récurrents

$PW_{crec}$  Le cout récurrent est exprimée par la relation suivante:[109-110]

$$PW_{crec} = C_{rec} \frac{\left[ \frac{1+e}{1+d} \right] \left\{ \left[ \frac{1+e}{1+d} \right]^i - 1 \right\}}{\left[ \frac{1+e}{1+d} \right] - 1} \quad (IV.26)$$

avec,  $e$  et  $d$  sont le taux d'escalade et d'intérêt, respectivement.

$C_{rec}$  est le cout récurrent et  $i$  est la durée de vie du système en année

$PW_{cn-rec}$  Le cout non récurrent est donnée par la relation suivante:

$$PW_{cn-rec} = C_{n-rec} \frac{\left[ \frac{1+e}{1+d_{adj}} \right] \left\{ \left[ \frac{1+e}{1+d_{adj}} \right]^i - 1 \right\}}{\left[ \frac{1+e}{1+d_{adj}} \right] - 1} \quad (IV.27)$$

avec

$$d_{adj} = \frac{(1+d)^j}{(1+e)^{j-1}} - 1 \quad (IV.28)$$

$d_{adj}$  est le taux d'intérêt ajusté.

$j$  est le nombre d'années entre deux paiements successifs pour des couts non récurrents.

$C_{n-rec}$  est le cout non récurrent.

#### 4.8.2.2. Coût du kilowattheure d'énergie (EC):

Le prix d'un kilowattheure d'énergie (EC) est calculé en fonction du rapport entre le coût global annuel (Traffic Acquisition Cost\_TAC) et l'énergie annuelle générée par le système (Epr). [109-112].

$$EC \left( \$/kwh \right) = \frac{TAC}{\sum_{t=1}^{8760} E_{pr}(t)} \quad (IV.30)$$

Où Epr , est l'énergie totale produite par les générateurs (Pv+ éolien) en (wh) .

Le cout global annualisé (TAC) est donné par la relation (IV.31).

$$TAC(\$) = TNPC * CRF \quad (IV.31)$$

TNPC (Total Net Present Cost) cout actuel net global.

CRF (Capital Recovery Factor) facteur de recouvrement de capitaux est donnée par(IV.32): [79-109-111].

$$CRF(d, i) = \frac{d(1+d)^i}{(1+d)^i - 1} \quad (IV.32)$$

$d$  taux d'intérêt,  $i$  durée de vie du système.

#### 4.8.2.3. Modèle de fiabilité (technique)

La fiabilité du système d'alimentation est un critère essentiel dans la conception des systèmes hybrides en raison de l'intermittence des sources d'énergie renouvelables. La probabilité d'insatisfaction de la demande est exprimée en termes 'Loss of Power Supply ' LPSP.[113-114]

$$LPSP = P_r \{ E_{bat} \leq E_{bat_{min}} \} = \frac{\sum_{t=1}^T LPSP(t)}{\sum_{t=1}^T P_l(t) * \Delta t} \quad (IV.33)$$

Le LPS ((loss of power supply) désigne le déficit réalisé pendant une durée minimale (1 heure). On tient compte de l'insuffisance de l'énergie produite par les unités de production et stockée dans les batteries à l'heure  $t$  pour répondre à la demande.

$$LPS(t) = (P_l(t) * \Delta t) - [(P_w(t) * \Delta t + P_{pv}(t) * \Delta t + E_{bat}(t-1) - E_{bat_{min}})] * \eta_{inv}$$

Ce critère permet d'identifier toutes les configurations nécessaires pour obtenir la valeur de la LPSP souhaitée..

$LPSP_{max}$  La probabilité maximale d'insatisfaction de la demande autoriser dans notre cas est  $LPSP \leq 5$ .



Les coûts des éléments sur lesquels nous avons fondé nos calculs sont présentés dans le tableau ci-dessous. [110-111]

TABLE1 COST FOR THE SYSTEM COMPONENTS						
Component	Unit Price (US\$/W)	Maintenance cost in the first year %	Life time (year)	Interest rate d (%)	Taux escalade e (%)	
PV array <sup>a</sup>	2.29	1% of price	25	8	6	
Wind turbine <sup>b</sup>	3.00	3% of price	20			
Battery <sup>a</sup>	0.213	1%of price	4			
Inverter <sup>a</sup>	0.711	0%of price	10			

<sup>a</sup> <http://www.solarbuzz.com>.  
<sup>b</sup> Mean value of the literature data.

Tableau IV.2 Coût de chaque générateur du système SEH

#### 4.8.3. Contrainte:

Diverse contrainte doivent être prise en considération dans le processus d'optimisation : La capacité de stockage est limitée (une limite supérieure et inférieure pour les états de charge dans les systèmes de stockage), les surfaces des composants du système sont limitées.

$$Spv_{min} < Spv < Spv_{max}$$

$$Sw_{min} < Sw < Sw_{max}$$

$$Cb_{min} < Cb < Cb_{max}$$

$Spv$ ,  $Sw$ ,  $Cb$  sont les variables de décisions.

Lors de l'utilisation du système PV/Eolien/Batteries, il est essentiel que la charge de la batterie respecte la contrainte suivante Pour garantir la longévité des batteries  $SOC_{max}$  et  $SOC_{min}$  état de charge maximale et minimale permise.

$$SOC_{min} < SOC < SOC_{max}$$

#### 4.9. Résultat de simulation

L'algorithme d'optimisation PSO à été implémenter sous l'environnement MATLAB 2016b et a été exécuté sur un ordinateur portable Toshiba de 8 Go de RAM et équipé d'un processeur Intel Core i3-M350, processeur 2,27 GHz. Le Tableau IV.3 illustre les résultats obtenus après plusieurs simulations .

La taille de chaque élément du système hybride étudié est indiquée dans le tableau ci-dessous afin de répondre à la charge, en se basant sur les données de l'irradiation globale quotidienne, de la température et de la vitesse du vent du site d'Adrar.[113]

Dans le but d'atteindre l'optimum global au maximum, la simulation du programme d'optimisation a été répétée à plusieurs reprises avec différentes conditions initiales. le résultat de dimensionnement et d'optimisation du système obtenu est comme suit:

<b>La surface de générateur photovoltaïques installée:</b>	<b>Spv= 6.06 m<sup>2</sup>.</b>
<b>La surface balayée par le rotor de l'éolienne:</b>	<b>Sw= 6 m<sup>2</sup></b>
<b>La capacité du batterie de stockage</b>	<b>Cb= 150Ah.</b>
<b>LPSP</b>	<b>≅ 5%</b>
<b>Cout du (Kwh) Ec</b>	<b>2.74 \$/Kwh</b>

Tableau IV.3 Résultat de simulation par algorithme PSO du système SEH

La simulation sous l'environnement MALAB/Simulink de la configuration du SEH obtenu par le programme de simulation PSO nous à permet d'analyser le fonctionnement de l'installation et d'évaluer la contribution de chaque générateur à base d'énergie renouvelable pour satisfaire les besoins énergétique de la charge. La figure (IV.9) suivante représente les énergies moyennes produite par chaque générateur et l'énergie totale.

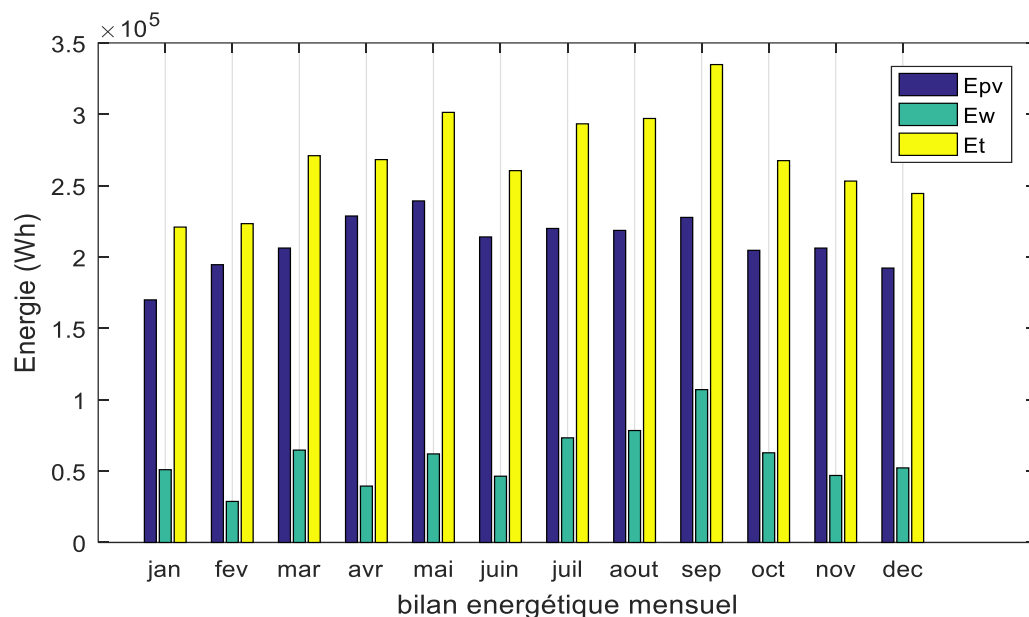


Figure IV.9 Bilan énergétique mensuel par le système hybride choisi

Selon les résultats de la simulation, le générateur photovoltaïque fournit 78 % de l'énergie produite par le système hybride, tandis que l'éolienne en fournit 22 %.

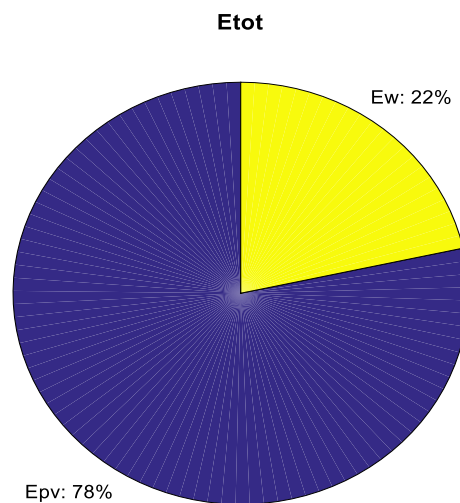


Figure IV.10 Pourcentage d'énergie fournie par le photovoltaïque et l'éolienne par/ an

#### 4.9.1. Bilan énergétique de la configuration choisie

Les résultats de la simulation figure IV.11 , qui illustrent les énergies utilisées dans le système pendant une année de fonctionnement, démontrent que la configuration du système hybride permet de répondre à la charge à un taux d'au moins 95%.

On voit bien que l'énergie d'électricité moyenne générée par le système solaire PV est de 4232.9 kWh/an et de 962 kwh /an produite par l'éolien.

Le taux de manque production est de 4,28 % (moins de 5 % de la valeur requise). Cela démontre que la méthode de dimensionnement proposée est valide.

Ce mode de fonctionnement génère un surplus d'énergie de 15% de la production totale du système.

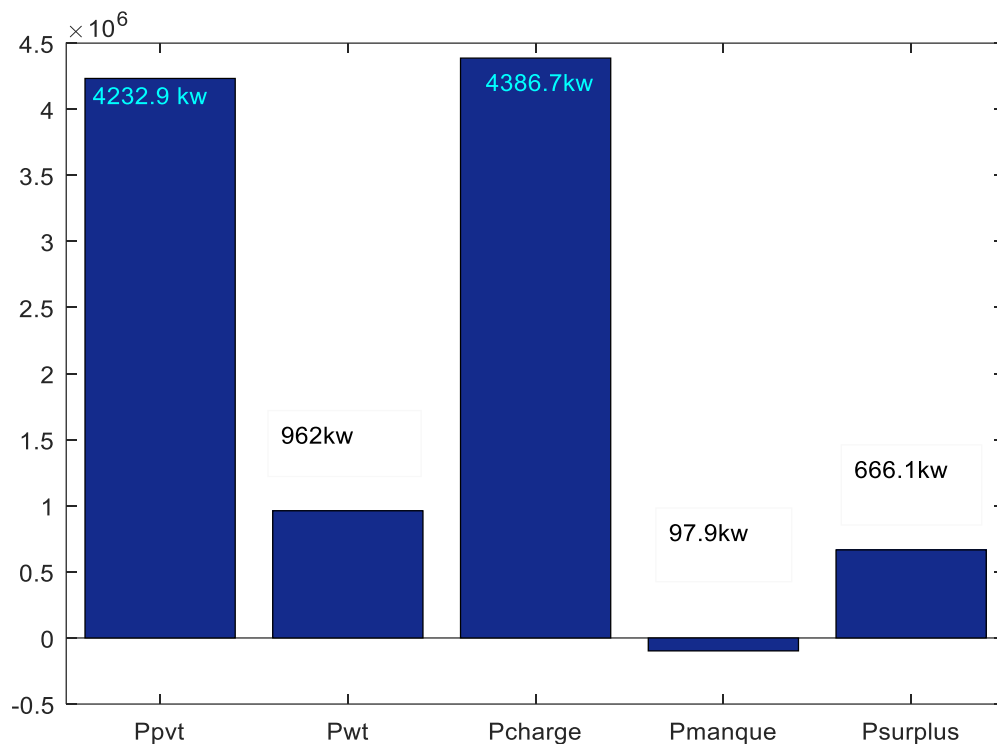


Figure IV.11 bilan énergétique de la configuration choisie

#### 4.9.2. Etat de charge de la batterie SOC

La batterie joue un rôle crucial dans les systèmes hybrides autonomes, L'analyse et l'évolution de son état de charge est essentiel afin de configurer le système étudié. La figure ci-dessous illustre l'état de charge de la batterie.

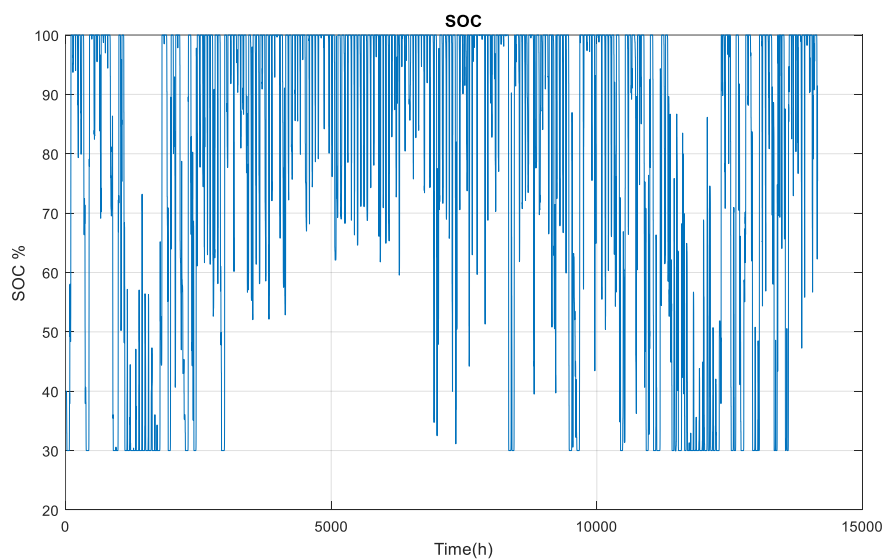


Figure IV.12 Etat de charge de la batterie configuration du SEH choisi

ces résultats représente l'état de charge de la batterie qui varie entre 30% et 100% de la charge nominale (seuil minimal et maximal).

Selon ces résultats, il est observé que l'état de charge atteint son niveau le plus bas pendant les périodes de (février, octobre, novembre). Pendant cette période, la production d'énergie par le système est insuffisante pour couvrir la charge, ce qui nécessite souvent l'intervention des batteries pour compenser ce déficit.

Cependant, les batteries ne sont pas utilisées durant quelques jours des autres mois de l'année, pour alimenter la charge car l'énergie générée par les deux sources d'énergie renouvelables suffit à répondre aux besoins en énergie de la charge et leurs état de charge reste environ à 100%.

#### 4.9.3. Validation des résultat par algorithme génétique

##### *Optimisation par algorithme génétique*

Afin de confirmer notre approche d'optimisation et garantir une convergence optimale de l'algorithme, nous avons développé un autre programme d'optimisation en utilisant l'algorithme génétique GA. Ce programme permet de dimensionner et d'optimiser le système hybride en respectant les coûts minimums et les LPSP souhaités. [113]

Différentes simulations ont été mises en place en utilisant les deux techniques d'optimisation afin de vérifier leur convergence et leur efficacité. La configuration de l'algorithme génétique utilisé : La taille de population est de 80, le nombre d'itérations est de 50, taux de croisement est de 80% taux de mutation est de 20% .

Les résultats de simulation par les deux algorithmes d'optimisation sont donnée dans le Tableau IV.4 pour différente valeur de LPSP désirer. Ils démontrent clairement que les solutions trouver sont similaires.

LPSP	Algorithme génétique					PSO				
	Spv	Swt	Cb	LPSP	Cost \$/kwh *10 <sup>-1</sup>	Spv	Swt	Cb	LPSP	Cost \$/kwh *10 <sup>-1</sup>
<2	8.88	6.11	166	1.96	2.62	7.45	8.91	155.2	1.99	2.70
<3	8.68	5.59	156.74	2.63	2.42	6.50	8.47	154	2.99	2.47
<4	6.9	6.4	154	3.86	2.66	6.04	7.76	150	3.97	2.44
<5	6.7	5.57	153.15	4.98	2.34	6.03	6.63	150	4.95	2.74

Tableau IV.4 Résultat de simulation par algorithme PSO et algorithme génétique GA pour différente valeur de LPSP

#### 4.9.4. Estimation de la durée de vie de la batterie pour les différentes configuration obtenus

La modélisation du coût opérationnel du banc de stockage, qui est principalement causé par la dégradation des cellules de batterie, est l'un des aspects essentiel de l'exploitation du stockage d'énergie.

Pour sélectionner la configuration optimale du système hybride parmi les configurations obtenues, cette thèse vise à évaluer la dégradation et la durée de vie de la batterie pour chaque situation.

La dégradation des batteries est un processus complexe de fatigue des matériaux qui repose sur des cycles de contrainte.

La fatigue désigne la transformation ou la modification des caractéristiques des matériaux suite à l'application de cycles d'efforts.

Il existe plusieurs méthodes pour l'évaluation du dommage, L'algorithme Rainflow est une méthode très répandue pour identifier les cycles dans le processus de fatigue des matériaux et a été largement employé pour évaluer la dégradation des batteries.[115-116-117]

M. Matsuiski et T. Endo ont initialement suggéré la méthode de comptage des cycles Rainflow afin de mesurer les cycles ou les demi-cycles des signaux de déformation-temps. Le calcul est réalisé en se basant sur le mécanisme de contrainte-déformation du matériau.[118]

##### 4.9.4.1. Définition Pratique De Rainflow

On peut expliquer la définition pratique du comptage des cycles de Rainflow pour l'analyse de la fatigue en se basant sur les pratiques standard ASTM E-1049. Les principes de la méthode de calcul de Rainflow sont les suivants [119]:

Soit X la plage en question ; Y la plage antérieure qui se trouve à proximité de X ; et S le point de départ de l'historique.

(1) Lisez le sommet ou la vallée qui suit. Si aucune donnée n'est disponible, passez à l'étape 6.

(2) Si les points sont inférieurs à trois, passez à l'étape 1. Les plages X et Y sont formées en utilisant les trois plus récents pics et vallées qui n'ont pas été supprimés.

(3) Faites une comparaison des valeurs absolues des plages X et Y.

Si  $X < Y$ , passez à la première étape.

Si  $X \geq Y$ , passez à la quatrième étape.

(4) En cas de présence du point de départ S sur la plage Y, passez à l'étape 5 ; sinon, considérez la plage Y comme un cycle; négligez le pic et la vallée de Y; et allez vers l'étape 2.

(5) Calculez la plage Y en utilisant un demi-cycle ; négligez le premier point (pic ou vallée) de la plage Y; déplacez le point de départ vers le deuxième point de la plage Y; allez vers à l'étape 2.

(6) calculez chaque plage qui n'a pas été comptée auparavant en un demi-cycle.

Le processus de comptage est illustré à l'aide de la figure suivante.

**Les explications du calcul des cycles comme suit: [119]**

(a)  $S=A$  ;  $Y=|A-B|$ ;  $X=|B-C|$  ;  $X>Y$ .  $Y \supset S$ , c.-à-d. le point A. Comptez  $|A-B|$  comme un demi-cycle et supprimez le point A ;  $S=B$ . (Figure b)

(b)  $Y=|B-C|$ ;  $X=|C-D|$  ;  $X>Y$ .  $Y \supset S$ , c.-à-d le point B. Comptez  $|B-C|$  comme un demi-cycle et supprimez le point B ;  $S=C$ . (Figure c)

(c)  $Y=|C-D|$ ;  $X=|D-E|$  ;  $X<Y$ .

(d)  $Y=|D-E|$  ;  $X=|E-F|$  ;  $X<Y$ .

(e)  $Y=|E-F|$  ;  $X=|F-G|$  ;  $X>Y$ . Calculez  $|E-F|$  comme un seul cycle et éliminer les points E et F. (Figure d. Un cycle est formé en associant la plage E-F et une partie de la plage F-G)

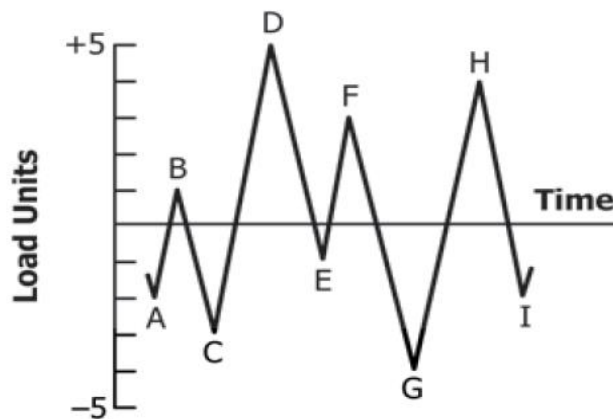
(f)  $Y=|C-D|$ ;  $X=|D-G|$ ;  $X>Y$ .  $Y \supset S$ , c.-à-d le point C. Comptez  $|C-D|$  comme un demi-cycle et supprimez le point C.  $S=D$ . (Figure e)

(g)  $Y=|D-G|$ ;  $X=|G-H|$ ;  $X<Y$ .

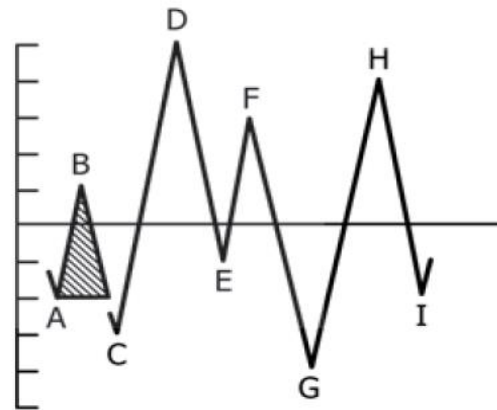
(h)  $Y=|G-H|$ ;  $X=|H-I|$ ;  $X<Y$ . Fin des données.

(i) Comptez  $|D-G|$  comme un demi-cycle,  $|G-H|$  comme un demi-cycle et  $|H-I|$  comme un demi-cycle. (Figure f)

(j)Fin du comptage.



(a)



(b)

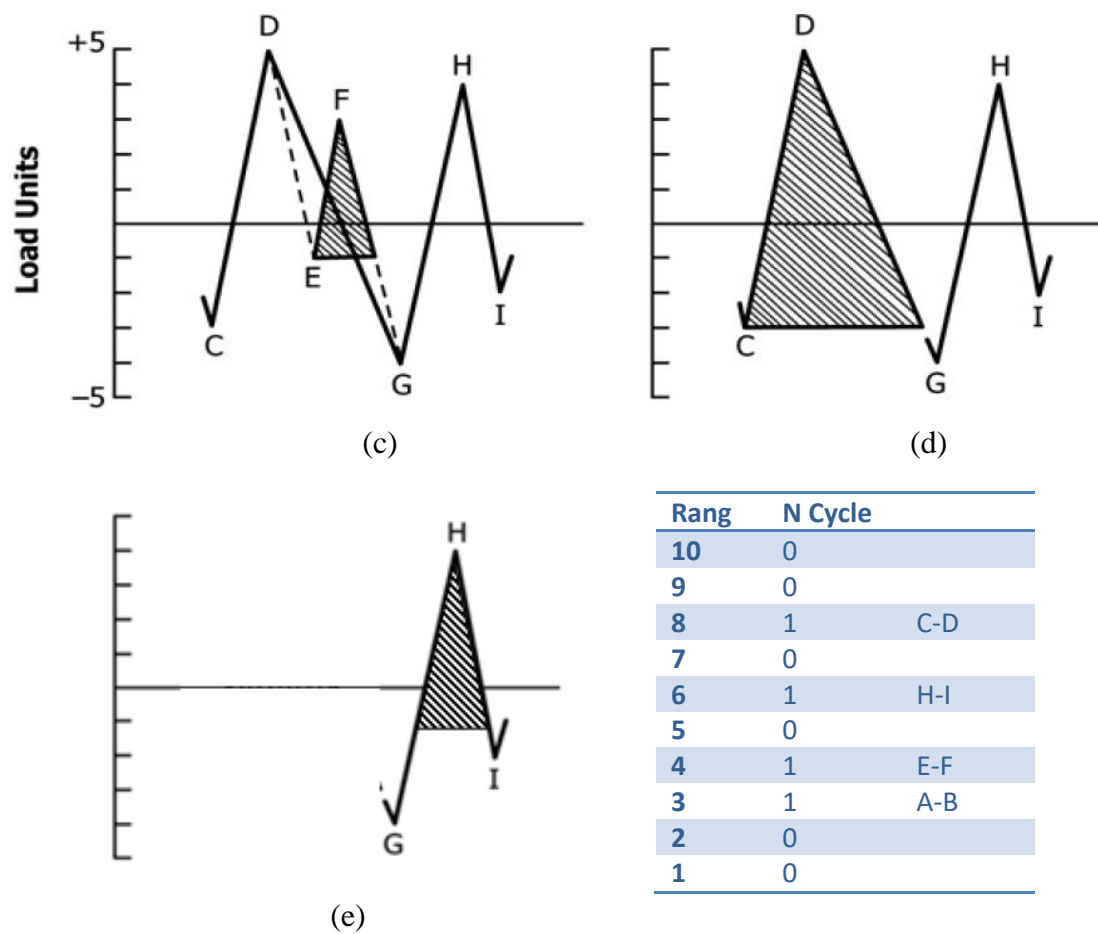


Figure IV.13 Exemple de comptage de paires de rang

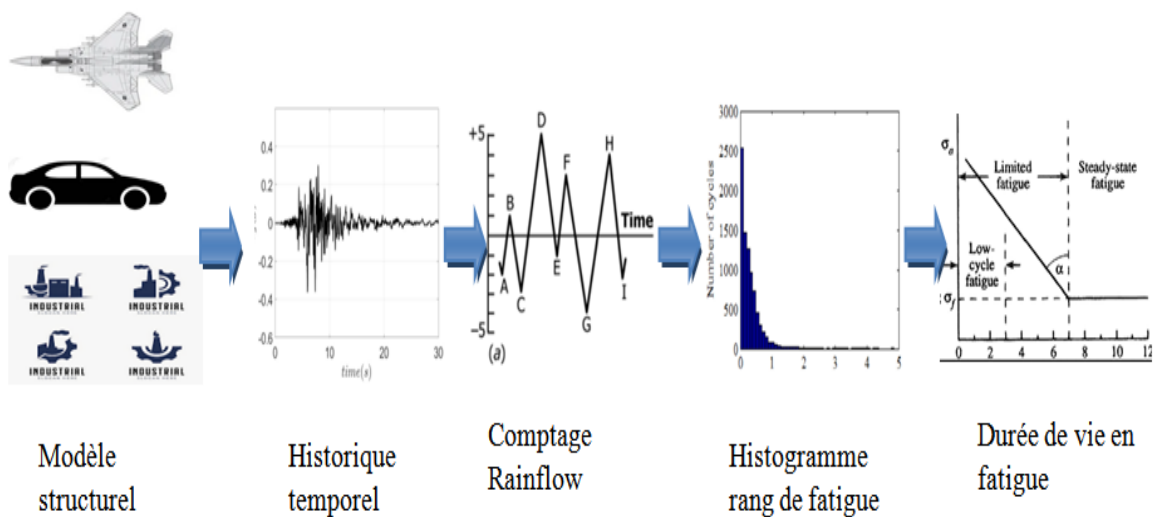


Figure IV.14 Procédure générale de calcul de la durée de vie en fatigue dans le domaine temporel



#### 4.9.5. Résultat de simulation sous MATLAB/ Simulink de l'algorithme Rainflow

Après avoir appliqué sous l'environnement MATLAB l'algorithme de comptage Rainflow sur l'état de charge SOC de la batterie de type GEL VRLA SOLAR employé dans configuration SEH choisi pour obtenir le cycle de fatigue on détermine en suite le taux de vieillissement de chaque cycle en utilisant les équations suivantes développée par [120-121-122]

$$N_c(DOD)T = \{12850e^{-(9,738 \cdot DOD)} + 3210e^{-(1,429 \cdot DOD)}\} \quad \text{if } 0 < T \leq 20^\circ C$$

$$N_c(DOD)T = 12850e^{-(9,738 \cdot DOD)} + 3210e^{-(1,429 \cdot DOD)} * (37.68T^{-1.101} - 0.3879) \quad \text{if } T > 20^\circ C$$

Après le calcul du nombre de cycles à partir de l'équation précédente, son inverse a été pris pour déterminer la fatigue du batterie.

##### 4.9.5.1. Calcul du dommage [123-124]

L'accumulation des dommages élémentaires entraîne la fatigue, et le dommage total est calculé en utilisant la règle de cumul de Miner.

Le taux de vieillissement par cycle ( $A_{r/c(DOD)}$ ) est calculé en fonction du cycle de vie de la batterie et du DOD. La formule s'écrit sous la manière suivante:

$$A_{r/c(DOD)} = \frac{1}{N_{c(DOD)}}$$

##### 4.9.5.2. Résultat de simulation:

La figure ci-dessous présente le graphique de l'état de charge de la batterie SOC en fonction du temps, qui est le résultat de la conception Simulink. Le graphique SOC illustre l'état de charge de la batterie pendant toute la durée de la simulation, qui a duré un an. Comme on peut le constater, la charge de la batterie varie en fonction de la stratégie de gestion proposée.

L'algorithme de comptage du Rainflow utilisera les données SOC pour évaluer le nombre de cycles, ce qui nous permettra ensuite de déterminer la durée de vie prévue de la batterie.

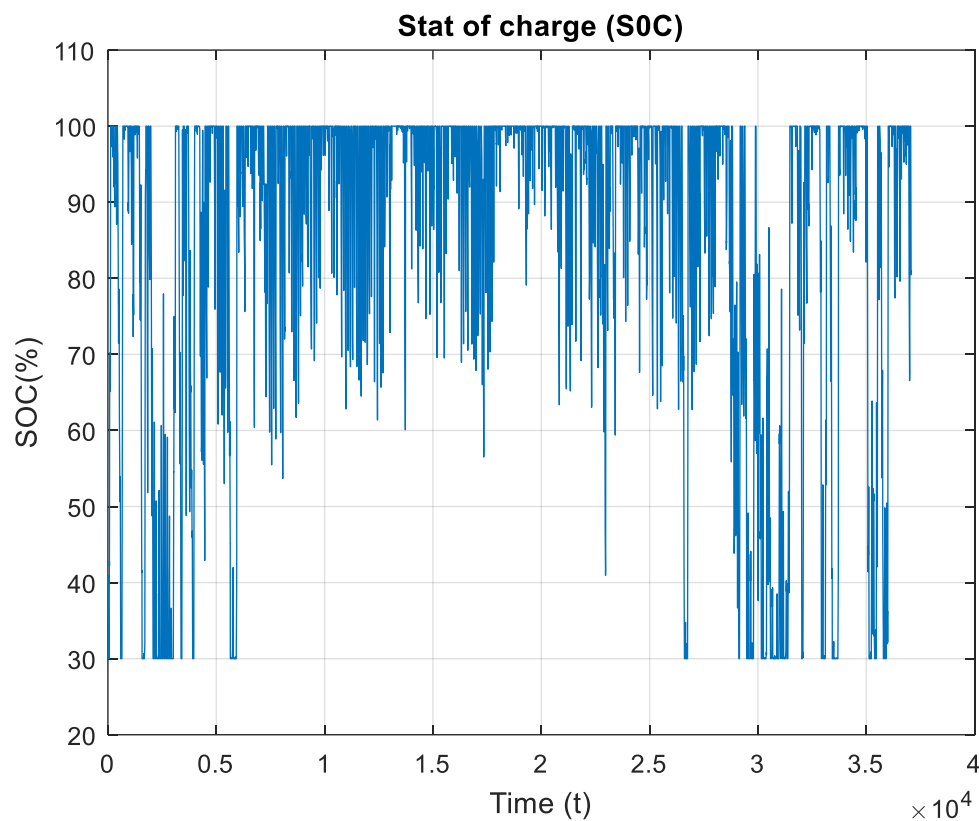


Figure IV.15 Etat de charge de la batterie SOC

L'histogramme des données de Rainflow est illustré dans la figure suivante (IV.16), qui représente le nombre de cycles en fonction des amplitudes des cycles. On a enregistré un total de 1028 cycles, dont 3,5 sont des demi-cycles. On peut constater que les données simulées présentent des amplitudes de l'écoulement de pluie faibles.

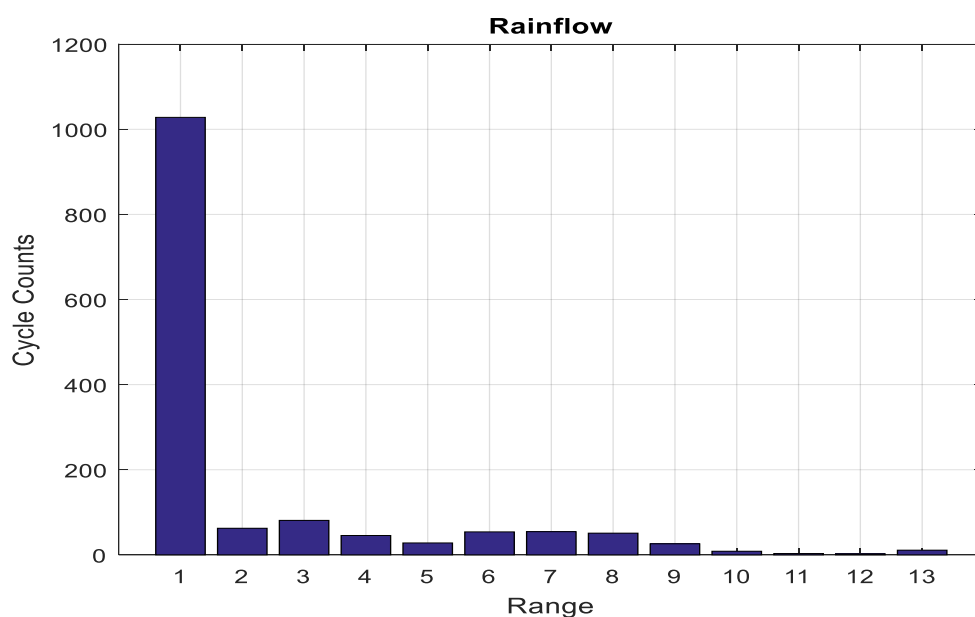


Figure IV.16 Histogramme Rainlow

Les résultats de la durée de vie prévue de la batterie plomb-acide obtenus à partir de l'algorithme Rainflow sont présentés dans le tableau IV.5. pour les diverses configurations du système autonome hybride (PV/éolien)

LPSP	PSO		GA	
	AR %	AR (year)	AR %	AR (year)
<2	6.11	16.36	8.07	12.39
<3	7.47	13.38	8.80	11.36
<4	7.39	13.53	7.73	12.92
<5	8.08	12.38	9.12	10.96

Tableau IV.5 estimation de la durée de vie de la batterie pour différente configuration

#### 4.10. Conclusion

Ce chapitre présente les conclusions de notre recherche sur le dimensionnement optimal d'un système hybride de production d'électricité, combinant photovoltaïque et éolien, destiné à fournir de l'énergie à un habitat situé en zone rurale à Adrar.

Dans la première section de ce chapitre, nous avons détaillé diverses techniques et méthodes de dimensionnement et d'optimisation, sans oublier les logiciels d'optimisation les plus employés.

Dans la deuxième partie, nous avons mené une analyse comparative approfondie entre les deux résultats d'optimisation obtenus par des deux algorithmes utilisés (PSO et GA) dans le but de parvenir à une configuration optimale. Celle-ci vise à assurer la satisfaction des exigences énergétiques de la charge, à minimiser le coût énergétique et à garantir une longue durée de vie de la batterie.

# Chapitre V

## *Efficacités* *énergétiques*

### **5.1. Introduction**

Depuis l'instauration des premières mesures favorisant la conservation d'énergie suite aux crises énergétiques, et en lien avec l'atténuation du changement climatique, la problématique d'efficacité énergétique des habitats a constamment occupé une place prépondérante dans la politique énergétique et au climat, qu'elles soient nationales, européennes ou mondiales.

### **5.2. Objectif du chapitre**

Ce chapitre vise à examiner l'effet de la performance énergétique et thermique sur une habitation rurale, en adoptant une configuration idéale basée sur les stratégies des constructions zéro énergie.

Des suggestions d'amélioration ont été formulées pour chaque segment et composant de l'habitat, notamment :

- L'optimisation de la structure du bâtiment en incorporant un isolant thermique sur les : murs, planchers et toit.
- Amélioration des fenêtres en identifiant le type de vitrage approprié.
- Etude de l'impact de l'isolation sur la demande et la gestion d'énergie fournie par notre système d'alimentation à base d'énergie renouvelable (PV/Eolien) spécialement sur la batterie.

L'isolation thermique des bâtiments joue un rôle crucial dans l'économie énergétique, étant donné que les constructions constituent le quart des rejets de gaz à effet de serre. Une isolation efficace favorise une économie d'énergie considérable.

Le toit et les murs extérieurs d'un bâtiment constituent le lien entre le milieu interne et celui externe. Il est nécessaire d'isoler les bâtiments en fonction des conditions extérieures et internes de l'environnement pour garantir le confort thermique. Généralement, l'isolation thermique est mise en place dans les éléments de la structure du bâtiment pour diminuer le chauffage et la climatisation des espaces, la consommation d'énergie et les dépenses.

Pour simuler le comportement thermique de notre habitat nous avons employé plusieurs logiciels tels que METEONORM pour les données climatiques, TRNBuild pour décrire les matériaux de construction et l'outil TRNSYS pour simuler le comportement thermique dans les deux contextes chauffage /climatisation

### 5.3. L'efficacité énergétique

Physiquement L'efficacité énergétique, fait référence au rapport entre l'énergie utile générée par un dispositif et l'énergie globale utilisée durant son fonctionnement. On interprète généralement cette notion de manière plus large pour désigner les méthodes et techniques visant à réduire la demande d'énergie et à préservant une qualité de performance final similaire.

L'une des problématiques majeures de la société contemporaine est la réduction de la demande d'énergie, touchant plusieurs secteurs, y compris celui du bâtiment. En pratique, l'efficacité énergétique se rapporte à la diminution de la demande d'énergie en optimisant son emploi. Dans ce contexte, Elle se base non uniquement sur l'attitude des usagers, mais aussi sur certains normes de construction dans le domaine des bâtiments.

Source : CME/ENERDATA

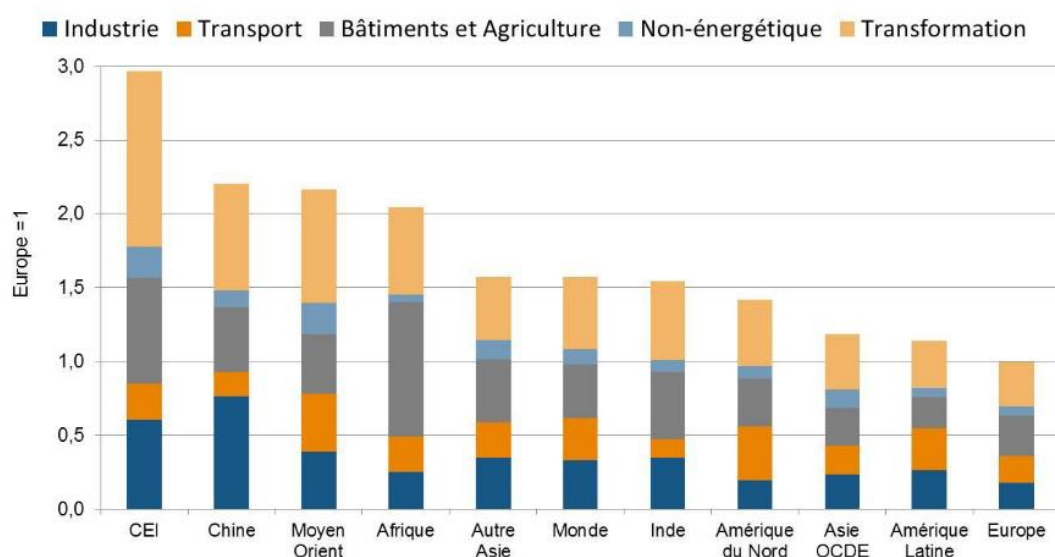


Figure V.1 Décomposition de l'intensité énergétique primaire par secteur 2011[125]

Les constructions résidentiels et non résidentiels constituent le principal domaine d'utilisation finale d'énergie et la principale préoccupation relativement à l'efficacité énergétique. Depuis 2005, l'absorption finale d'énergie des bâtiments a augmenté globalement de environ 1% chaque année et pour l'électricité de 3% par an.

Cependant, on observe une perspective à la baisse usage d'énergie par foyer (- 0,8% annuellement sur le plan mondial). L'application de codes de construction plus rigoureux et de la norme MEPS (Minimum Energy Performance Standard) a joué un rôle majeur au sein les nations adhérentes à l'OCDE en vue d'optimiser l'efficacité énergétique pour les appareils et le chauffage.

De plus, les nations de l'OCDE utilisent diverses mesures financières pour optimiser la performance énergétique des constructions. La majorité d'entre elles offrent des emprunts à bas taux d'intérêt, souvent associés à des aides financières destinées à la rénovation des constructions en place. [125]

#### 5.4. Consommation d'énergie en Algérie par secteur du bâtiment

En 2023, l'usage global d'énergie par filière d'exercice est divisée comme suit:

Le secteur des « Ménages & autres » occupe une place prépondérante dans la composition finale de la consommation (46%), le domaine du transport (30%) et finalement le domaine de « l'industrie et BTP » qui compte 25 %, comme montre le schéma ci-dessous :[126]

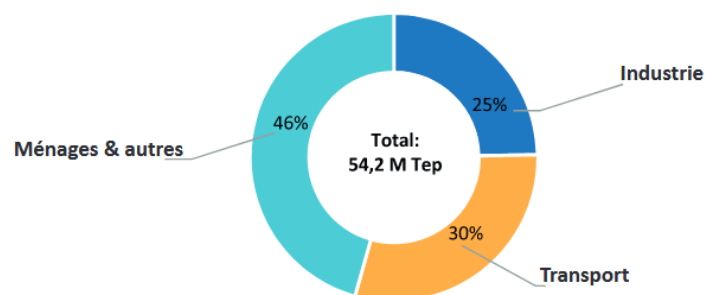


Figure V.2 Bilan Énergétique national par secteur année 2023 [126]

#### 5.5. Efficacité énergétique des bâtiments

On peut définir l'efficacité énergétique des bâtiments comme la diminution de la consommation d'énergie en supprimant les usages superflus de l'énergie, tout en préservant le bon fonctionnement du bâtiment. Elle est essentielle pour réduire l'empreinte écologique du secteur des constructions. Elle peut être mise en pratique et perfectionnée en suivant les quatre (4) méthodes suivantes :

- l'emploi d'équipements économiques d'énergie ;
- la perfection des performances fonctionnelles par des surveillances, une supervision et une identification efficace ;
- la création ou la réhabilitation d'enveloppes efficaces sur le plan thermique ;
- la sensibilisation du personnel pour une utilisation optimale de l'énergie. [127]

Dans cette recherche, nous ne nous concentrerons que sur la structure du bâtiment afin d'optimiser son efficacité énergétique. Dans la littérature, de nombreuses études ont été repérées sur ce thème.

La réponse thermique des bâtiments en mouvement libre est influencée par divers facteurs extérieurs, comme le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent ainsi que l'humidité de l'air. Il est possible de réguler ce comportement grâce à une sélection judicieuse de matériaux appropriés pour préserver le confort thermique des occupants. [128] analyse comment l'isolation et la masse thermique influencent l'enveloppe d'une cellule de test de blocs de terre stabilisée comprimée, ainsi que les performances thermiques des constructions dans un climat tropical chaud et sec. et examine l'impact de l'isolation et de l'inertie thermique basant sur divers isolants, qu'ils soient en laine de verre ou en paille mélangée à de la chaux, prenant en compte l'épaisseur des parois.

Une analyse thermique et énergétique de la structure d'une maison située à Marrakech (Maroc) est proposé théoriquement par [129]. utilisons quatre sortes d'isolants externes couramment présents sur les marchés marocains pour diverses épaisseurs. Ceci vise à déterminer le type d'isolant le plus approprié au climat marocain et son épaisseur idéale. la laine de verre, la fibre de bois, la laine de roche et Le polystyrène expansé font partie des isolants examinés. Le logiciel TRNSYS de simulation thermique dynamique servi pour effectuer les simulations numériques.

L'isolation des murs extérieurs est considérée comme une technologie extrêmement performante pour défendre les constructions face aux fluctuations ambiantes continues. Une planification et une exécution exactes de l'isolation des murs permettraient d'améliorer les performances, d'économiser l'énergie perfectionner le confort thermique. l'étude vise à analyser les qualités, les atouts et les désavantages de plusieurs technologies d'isolation des parois extérieurs et à fournir des recommandations sur la manière d'utiliser diverses formes d'isolation des murs extérieurs dans différents climats[130]. Le recours à des matériaux d'isolation thermique supérieure pour un bâtiment historique grâce à une analyse basée sur des calculs, dans le but de maximiser la conservation énergétique des constructions tout en minimisant les pertes d'énergie. Il aborde particulièrement l'utilisation potentielle de matériaux d'isolation thermique super, comme les panneaux sous vide et les aérogels. Les résultats de mesure de conductivité thermique et leur application par le biais de calculs d'énergie du bâtiment ont été exposés en tant qu'étude de cas. Et propose aussi des calculs relatifs aux coûts. Il met en évidence que l'utilisation de panneaux sandwich à isolation sous vide permet d'économiser environ 30 % de coûts énergétiques.[131]

Un bâtiment à énergie zéro nécessite d'abord une enveloppe performante, Deux caractéristiques thermophysiques: la conductivité thermique et la capacité volumétrique d'un



paroi, ont un effet significatif sur son rendement en matière d'énergie. Dans [132], une analyse transversale est présentée sur l'efficacité énergétique d'une structure standard en utilisant tous les matériaux de paroi possibles. il découvre que les matériaux de stockage thermique et d'isolation sont adaptés aux murs externes. Toutefois, la valeur de ces matériaux varie en fonction des circonstances : le stockage thermique est crucial lorsque la conductivité thermique du matériau est plutôt importante, tandis que l'isolation thermique prend le relais lorsque la conductivité est plutôt basse.

Dans le domaine d'application de l'isolation sur un bâtiment modèle en Turquie utilisant XPS (mousse de polystyrène extrudé) comme matériau isolant [133], une estimation de la diminution des émissions de combustibles issues du système de combustion a été réalisée [133]. à travers une évaluation des déperditions thermiques du parc immobilier actuel, les rejets de gaz d'échappement, le calcul de l'épaisseur idéale de l'isolation et l'impact de la modification de cette épaisseur sur les émissions polluantes, ainsi que la contribution à l'économie nationale grâce au modèle de construction méthodologique. L'étude indique que les épaisseurs idéales d'isolation oscillent entre 3,21 et 7,12 cm, les économies en énergie s'établissent entre 9,23 \$/m<sup>2</sup> et 43,95 \$/m<sup>2</sup>. Suite à la recherche, il a été estimé que l'application de l'épaisseur d'isolation idéale dans le bâtiment modèle pourrait engendrer des économies d'énergie totales de 41,7 milliards de dollars américains pour le pays. En outre, après l'isolation, les émissions globales de CO<sub>2</sub> sont évaluées à 57,2 milliards de kg par an.

L'analyse et évaluation de l'efficacité de l'isolation thermique en recouvrant les façades avec du ciment renforcé de fibres de verre (GRC) et du polystyrène expansé (EPS) afin d'améliorer l'isolation. sous logiciel ENVI-met V4 est réalisé par [134]. Les données ont démontré que l'utilisation de GRC et EPS sur les murs a conduit à des résultats plus performants pour réduire la température de surface des murs en briques.

Afin de baissé la demande d'énergie dans la ville de Denizli, en Turquie, un calcul est effectué par [135] pour déterminer la couche idéale de l'isolation des parois externe en utilisant du polystyrène expansé et de la laine de roche. Ce calcul prend en compte cinq sources d'énergie différentes : le charbon, le gaz naturel, le GPL, le fioul et l'électricité. L'optimisation s'appuie sur une étude du coût Tout au long du parcours de vie complet.. D'après les résultats, l'optimal a été atteint en employant le charbon comme source d'énergie et le polystyrène expansé comme matériau d'isolation.

### 5.6. Performance énergétique du bâtiment & étiquette

La performance énergétique se réfère à la capacité d'énergie utilisée chaque année par un bâtiment, en fonction de la qualité de son construction, de ses installations électriques et de son mode d'opération.

L'objectif de la performance énergétique est d'assurer un confort thermique en optimisant l'utilisation annuelle des ressources énergétiques.

L'étiquette énergétique d'un logement indique sa catégorie énergétique, déterminée au cours du processus de diagnostic de performance énergétique (DPE). Elle offre la possibilité de déterminer la consommation d'énergie primaire d'un bien, c'est-à-dire, la quantité d'énergie qu'il utilise annuellement en kWh pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et la climatisation. Place le logement ou l'édifice dans une échelle d'énergie variant de A à G.

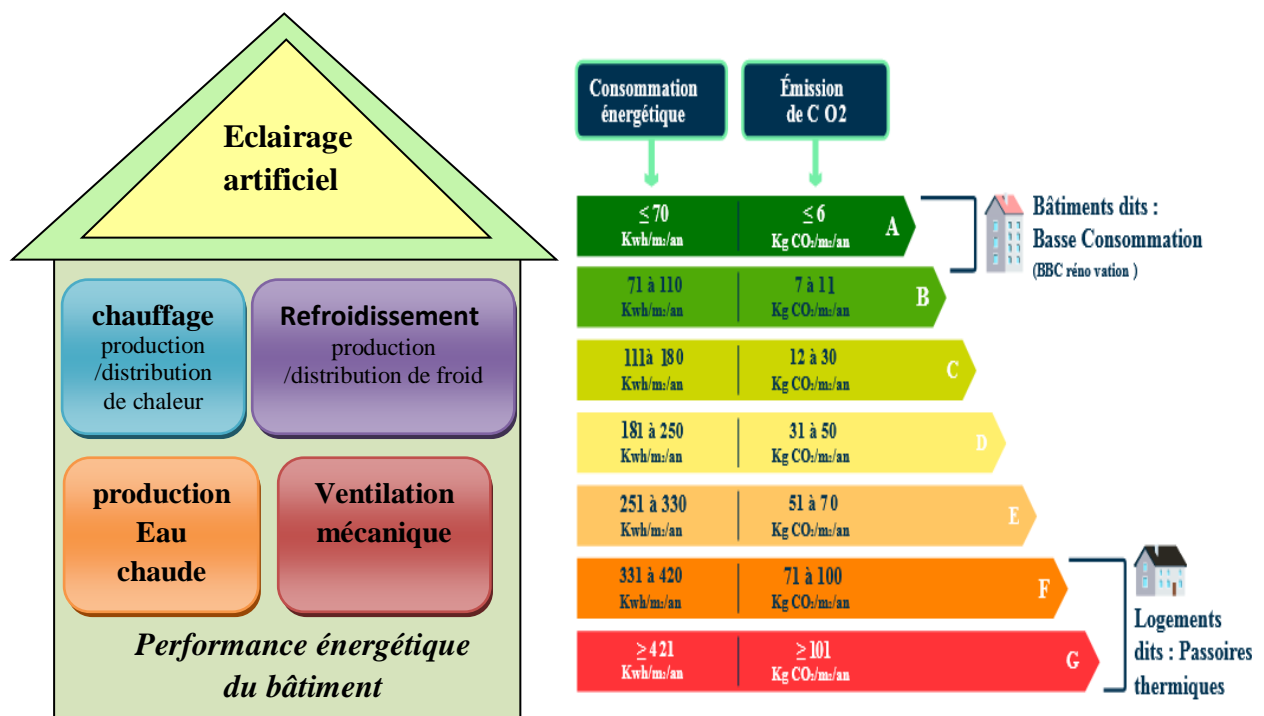


Figure V.3 Concept et normes du bâtiment durable

#### 5.6.1. la certification et la labellisation internationales [136-137]

Pour optimiser l'utilisation de l'énergie tout en minimisant les effets sur la planète, le domaine de la construction et du habitation est en train d'intensifier ses efforts pour considérer le développement durable. Les intervenants dans le secteur de la construction privilégient des méthodes d'évaluation des bâtiments afin d'évaluer leurs performances énergétiques et environnementales. Depuis les années quatre-vingt-dix, divers dispositifs ont émergé partout dans les pays en vue de soutenir chacun dans la mise en place et la construction de structures

qui respectent la nature. et de l'énergie, utilisant des indicateurs basés sur des **labels**, des **certifications** ou des **normes**.

- **La certification** est une procédure de contrôle du respect d'un standard (référentiel) qui établit officiellement les attributs environnementaux d'une construction. Un organisme indépendant de la structure qui a élaboré le référentiel est chargé de la certification.
- **Le label** La qualité du bâtiment est assurée par le label en respectant un cahier des charges ou un référentiel déterminant les buts de performance qualitatifs et/ou quantitatifs à réaliser. Il offre la possibilité de présenter des valeurs standard pour la performance énergétique du bâtiment.
- **la norme**, est un ensemble de normes et de contraintes imposées par un organisme de normalisation afin de harmoniser les comportements d'une catégorie de biens (l'habitat). L'Afnor en France est l'organisme de normalisation. En Algérie, IANOR est l'organisme officiel responsable d'élaboration, la création, publication et diffusion des normes nationales

Divers systèmes de catégorisation ont été conçus pour diverses sortes de batiments, qu'ils soient récents ou déjà en places. Elle peut se révéler optionnel ou requis pour l'intégralité ou une tranche du domaine des constructions et des bâtiments. En mentionnant les systèmes mondiaux ci-après [138]

Tableau V.1 résume les labels de performance énergétique des bâtiments[138]

Label	payé	objectif
<b>Passiv-Haus</b>	label allemand	L'élaboration de bâtiments passifs consommant peu d'énergie repose sur l'exploitation des chaleurs solaires, électroménagères et humaines, grâce à une excellente isolation thermique dans les murs, le sol, le toit et les fenêtres.
<b>BBC-Effinergie (Bâtiment Basse Consommation)</b>	label français	Un confort optimal dans les habitats, été/hiver, est assuré par : <ul style="list-style-type: none"> <li>• isolation efficace,</li> <li>• excellente étanchéité a l'air</li> <li>• contrôle de la ventilation.</li> <li>• un angle favorisant la lumière naturelle,</li> <li>• l'emploi d'énergies renouvelables pour le chauffage, le rafraîchissement et l'eau chaude sanitaire.</li> </ul>
<b>MINERGIE</b>	label Suisse	s'appuie sur les fondements suivants : une excellente isolation de la structure du bâtiment, un approvisionnement en énergie extrêmement efficace basé sur des ressources renouvelables et un renouvellement régulé de l'air.
<b>LEED</b>	Label	Encourager les constructions respectueuses de

<b>(Leadership in Energy and Environmental Design)</b>	American	l'environnement (bâtiments écologique) et minimiser leurs effets sur l'environnement pendant la réalisation et l'exploitation des bâtiments.
<b>BREEAM Building Research Establishment Environmental Assessment Method</b>	Britannique	<p>Chaque catégorie de construction possède son propre système d'évaluation (BREEAM Habitations, Etablissement scolaires, Hôpitaux, International, Tribunaux, Industriel, Bureaux, centres commerciaux)</p> <p>Critère de labellisation</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ 10 types de problèmes liés à l'environnement comprennent la gestion, bien-être et santé, énergie, transport, matériaux, eau, déchets, paysage et écologie, pollution, innovation.</li> <li>✓ Un mécanisme de notation pour ces catégories.</li> <li>✓ Des instruments pour juger les méthodes, produits et matériaux de construction.</li> </ul>
<b>HQE Haute Qualité Environnementale,</b>	Label français	<p>Contrôler les effets de la construction sur l'environnement.</p> <p>être en adéquation avec son paysage.</p> <p>Incorporer les services urbains (assainissement et écoulement des eaux pluviales) et minimiser la consommation de ressources naturelles (le matériau, l'énergie, l'eau) ainsi que les rejet (gaz à effet de serre.).</p> <p>Critères de labellisation</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ L'écoconstruction</li> <li>➤ L'eco-gestion</li> <li>➤ Le confort</li> <li>➤ La santé</li> </ul>
<b>BCA Green Mark</b>	singapour	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ efficacité énergétique</li> <li>✓ Efficacité de l'eau</li> <li>✓ Protection écologique.</li> <li>✓ Qualité de l'environnement intérieur</li> </ul>

Tableau V.1 label de performance énergétique des bâtiments[138]

L'échelle chronologique de création de plusieurs labels est illustrée dans la figure V.4.[136-137]

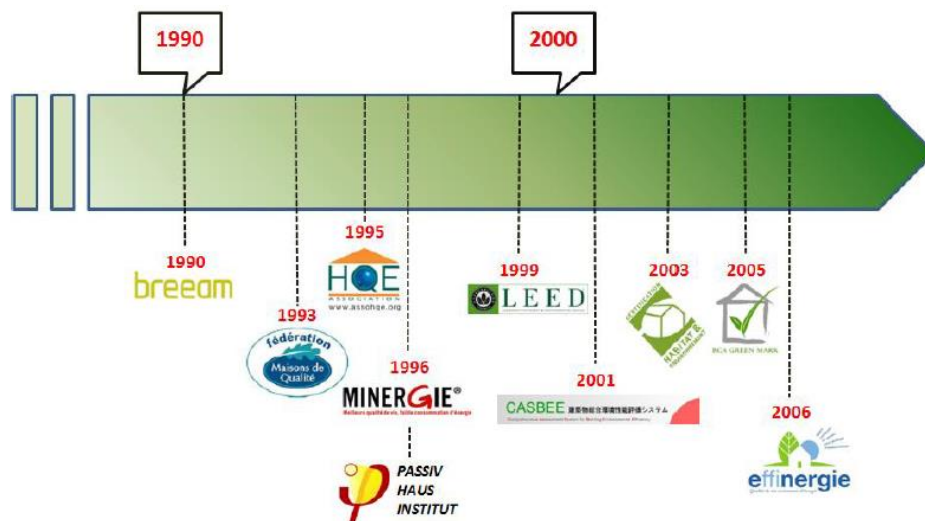


Figure V.4 Historique de création de labels

## 5.7. Catégorie des constructions à efficacité énergétique

### 5.7.1. Conception bioclimatique

La conception architecturale d'une maison bioclimatique cherche à optimiser les ressources du milieu afin de les exploiter passivement. Ceci limite la consommation d'énergie des équipements techniques « actifs ».

Le but principal consiste à garantir le confort thermique en exploitant les ressources architecturales, les énergies vertes disponibles et en minimisant au minimum l'usage des techniques mécanisées et des énergies externes au site.

Dans les régions continentales, particulièrement dans l'hémisphère nord, elles se manifestent habituellement par une inclinaison des vitrages vers le sud afin de bénéficier des rayons solaires directs pour un chauffage passif en hiver, accompagnée d'une protection solaire en été. Il sera donc nécessaire de considérer la direction du bâtiment, l'épaisseur des murs, le type des matériaux utilisés pour construire et la gestion des rayonnements solaires, la ventilation [138-139].

### 5.7.2. L'éco construction, eco-Home

Les termes « éco construction » est l'association des deux termes "écologie" et "construction", désigne les bâtiments qui réduisent au minimum leurs exigences et leur empreinte écologique.

Ils utilisent des ressources abondantes et facilement accessibles, renouvelables et non polluantes : la pierre, la terre, le bois, la paille, le chanvre, etc. En ce qui concerne l'éco construction, elle se base sur l'architecture vernaculaire et ses valeurs de bon sens, de durabilité et d'économie de ressources, améliorées par des innovations techniques visant à

exploiter les énergies renouvelables : Passif solaire, électricité provenant du soleil, éolienne, géothermie, puits canadien. Cette version vise surtout la construire des habitations « Zéro carbone ».[137-138]

### 5.7.3. Les maisons Basse consommation

Les bâtiments ayant une faible consommation d'énergie en eau chaude sanitaire (ECS), l'éclairage, chauffage, la climatisation, et la ventilation bénéficient du label BBC. Le concept de bâtiment à faible consommation (BBC) se concentre sur les économies d'énergie et le coût thermique. D'après certains, la première étape consiste à optimiser la structure et l'enveloppe du bâtiment en vue de baissé les pertes thermiques.

Quand la dépense standard d'énergie fondamentale du domicile destinée au le chauffage, le refroidissement, la ventilation, la génération d'eau chaude domestique et la lumière ne dépasse pas 50% de la utilisation habituelle initiale. est considérée comme BBC.[138]

### 5.7.4. bâtiment passif

L'idée du « Passiv-Haus ». Créé en Allemagne, tout comme le label BBC français, il se réfère aux habitats qui ont une petite consommation d'énergie pour le chauffage, une consommation réduite d'énergie primaire et une excellente isolation thermique.

On qualifie immeuble « passif » une construction qui vise à exploiter les bénéfices de son milieu externe (température, ven , ensoleillement) sur le cadre énergétique. Grâce à son inertie thermique, grâce à l'emploi de matériaux présentant une forte chaleur massique, il génère des conditions climatiques constantes en interne face aux fortes fluctuations climatiques extérieures.

Le besoin en énergie sera légèrement perçu. Il ne faut envisager l'utilisation d'appareils de climatisation (chauffage/climatisation) que dans un second temps si les circonstances de confort le nécessitent.[138-140]

### 5.7.5. Les habitations à énergie positive ou économe en énergie

A cause des dispositifs de génération d'électricité (tels que les éoliennes, les panneaux solaires, etc.), elles génèrent davantage d'énergie qu'elles ne la consomment. L'idée courante est de commercialiser l'électricité générée à la compagnie de fabrication à un coût bénéfique, ce qui évite les difficultés liées au stockage et permet d'acquérir l'énergie du réseau si nécessaire. Avec une excellente isolation thermique, elle est également dotée d'un mode de chauffage passif et écologique. Les habitations à énergie positive ou économe en énergie Certifiée par le label BEPOS.[141]

### 5.7.6. Les habitations autonomes ou zéro-énergie

Le concept des habitats autonomes repose sur la production directe de l'énergie indispensable pour le chauffage et la lumière, en évitant de recourir à un prestataire externe, tout en assurant son approvisionnement en eau et son traitement. Cette approche est associée à une abaissement de ses exigences et l'emploi des dispositifs à consommation d'énergie. [141]

### 5.8. Les réglementations thermiques Algérienne

Le contrôle thermique est une série de réglementations destinées à réguler l'énergie au sein du bâtiment, garantir le bien-être des usagers, diminuer les polluants locaux et mondiaux et diminuer les dépenses d'exploitation des installations (chauffage et climatisation),

L'amélioration de l'efficacité énergétique dans les constructions résidentiels et tertiaires en instaurant des réglementations thermiques adéquates permettra de diminuer la charge énergétique au sein des pays, soulignant ainsi l'effet bénéfique des lois sur les dépenses liées au secteur de la construction.[142]

Afin d'optimiser l'emploi de l'énergie et d'améliorer l'efficacité énergétique dans les constructions récentes destinées aux logements, ainsi que dans les segments de construction effectués, l'Algérie a instauré un plan législatif et réglementaire comprenant les composantes suivantes :

La loi n° 99-09 du 28 juillet 1999 concernant la maîtrise de l'énergie, en complément du décret exécutif n° 2000-90 adopté en avril 2000, relatif à la réglementation thermique des constructions récentes. Ce décret impose l'application de critères d'efficacité minimums lors de la planification et du développement des constructions récentes, en particulier pour les caractéristiques d'isolation thermique et les valeurs standards concernant les pertes et l'apport calorifique pour les bâtiments construits récemment. Ces dernières sont spécifiées dans des documents techniques (DTR). Document Technique Réglementaire.

Les directives réglementaires (DTR) validées par arrêté du ministre de l'Habitation :

DTR C3.2 du 10 décembre 1997, DTR C3.4 du 18 août 1998 et DTR C3.3.1 du 14 novembre 2005, conçues par le Centre National d'Études et Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) et promulguées par arrêtés ministériels.[143]

- **DTR.C 3-2**, définissant les directives pour le calcul des pertes de chaleur d'hiver dans les constructions domestiques..

L'objectif de ce Document Technique Réglementaire (DTR) est d'établir les procédures suivantes :

- détermination des pertes calorifiques des bâtiments ;



- contrôle du respect des normes thermiques par les bâtiments ;
- dimensionnement des installations de climatisation des bâtiments, en introduisant le concept de pertes calorifiques « base » ;
- planification thermique des bâtiments.

Ce DTR est uniquement applicable aux bâtiments destinés à la résidence.[144]

- **DTR.C 3-4** Concernant les normes de calcul de l'apport calorifique estival pour les constructions domestiques.

L'objectif de ce Document Technique Réglementaire (DTR) est d'établir :

- les procédures pour déterminer les apports calorifiques des constructions,
- la méthode pour contrôler le respect de la réglementation thermique estivale des constructions.[145]

Les techniques de calcul des apports énergétiques présentées dans ce DTR sont applicables à des fins résidentielles, d'hébergement, de bureaux, d'enseignement (salles de classe, salles d'étude), ainsi qu'à des espaces de réception (bibliothèques, locaux officiels, banques...).... etc.

### 5.9. Classification thermique des communes d'algerie

Le DTR examine les différentes zones climatiques :

**La zone A** englobe le littoral de la mer et en générale le versant nord des chaînes côtières.

**La zone B** englobe la plaine qui suit le littoral de la mer, ainsi que les vallées situées entre les chaînes côtières et l'atlas tellien. On identifie une sous-zone B' comprenant la vallée du Chelef

**La zone C** englobe les Hauts-Plateaux situés entre l'Atlas tellien et l'Atlas Saharien. Finalement,

**La zone D** englobe le Sahara, où on identifie une sous-zone D'.[144]

Wilaya	Communes	Zone
<b>01-Adrar</b>	<b>Groupe de communes1:</b> Ksar Kddour- Timiaouine- Tinerkoug.	D
	<b>Groupe de communes2:</b> Toutes les autres communes.	D'
<b>02-Chlef</b>	<b>Groupe de communes1:</b> BeniHaoua-Dahra- El Marsa- Moussadek-Sidi Abderrahmane-Talassa-Taougrite-Tnes-Oued Guoussine.	A
	<b>Groupe de communes2:</b> Abou Elhassan-Benaira-Breira-Boughaia-Sidi Akkakcha- Tadjena-Zeboudja.	B
	<b>Groupe de communes3:</b> Toutes les autres communes	B'
<b>03-Laghouat</b>	<b>Groupe de communes1:</b> Ain Medhi- Ellassafia- Elhaouita-Hassidela- Hassi R'mel-Kheneg-Ksar Elhirane-Laghouat-Mekharg-Tadjrouna.	D
	<b>Groupe de communes2:</b> Toutes les autres communes	C



04-Oum Elbouaghi	Toutes les communes	C
---------------------	---------------------	---

Tableau V.2 Exemple de zonnage climatique de quelque Wilaya d'Algerie

### 5.10. Modes de transfert de chaleurs dans le mur

Le transfert thermique est une forme d'échange d'énergie fondée à base des concepts de la thermodynamique. Ce concept d'échange favorise le transfert d'un flux thermique ou sa transformation en une nouvelle état d'énergie depuis un corps (ou un environnement) à température plus élevée vers un autre à température plus basse, jusqu'à ce que les deux entités atteignent une température équivalente.

Dans le bâtiment, le transfert thermique se réalise par trois modes d'échanges thermiques qui ont lieu sur l'enveloppe. Le rayonnement, la conduction et la convection. [146-147]

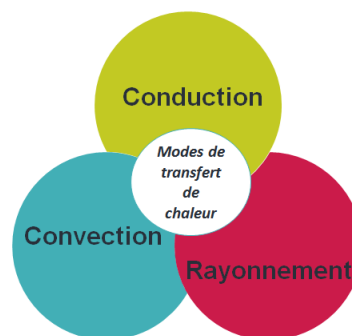


Figure V.5 Mode de transfert de chaleur

#### 5.10.1. Le transfert par conduction

Cela est réalisé par la propagation de chaleur et le transfert d'énergie d'un endroit à l'autre au sein du matériau opaque. Concernant l'enveloppe externe, les molécules des matériaux de couverture transmettent le flux thermique vers les couches internes du revêtement ou vers l'environnement extérieur. [146-147]

#### 5.10.2. Le transfert par convection

Ce processus de conversion s'exprime par la diffusion de chaleur dans un fluide liquide ou gazeux en déplacement. Pour ce qui est de la transmission thermique via les surfaces externes, l'énergie peut se disperser par dioxydation entre la surface externe du revêtement et l'air extérieur en interaction avec celle-ci. La rapidité du flux d'air a un impact significatif sur l'accroissement ou la réduction du niveau de conversion convectif entre l'air extérieur et surface externe. Plus l'air est statique, moins il y a de convection. [146]

### 5.10.3. Le transfert par rayonnement

Il s'agit de la transmission de chaleur d'un objet à un autre via une (EM) onde électromagnétique sans interaction physique directe. Dans le contexte des bâtiments, Le transfert de chaleur par rayonnement a lieu entre la surface extérieure de l'enveloppe et le soleil qui est capable d'absorber de l'énergie solaire indépendamment de la température moyenne de l'atmosphère.

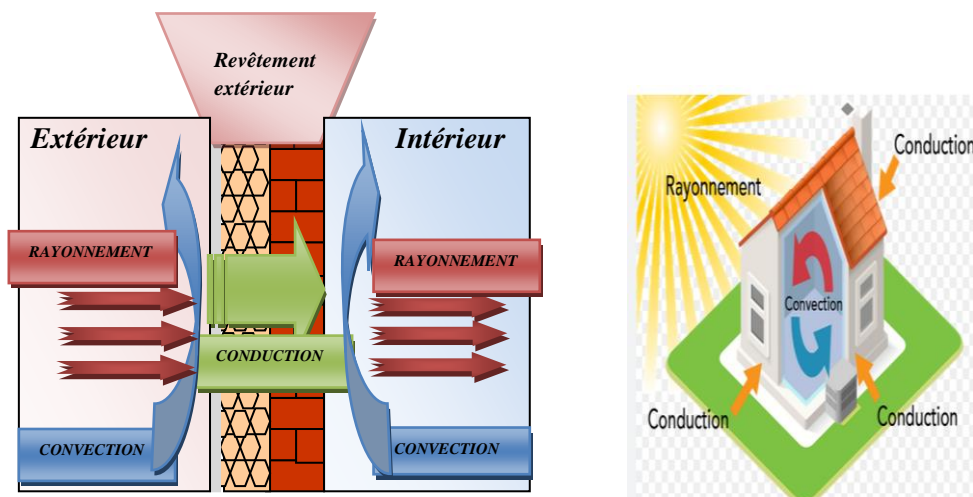


Figure V.6 Mode de transfert de chaleur au sein des parois bâtiment

Généralement, la conversion de chaleur à travers le revêtement extérieure se fait souvent par l'association des 3 formes de transfert mentionnés précédemment. L'énergie solaire obtenue par la couche extérieure du revêtement, que ce soit par radiation ou par convection avec l'air extérieur, sera dispersée en diverses sections : Une portion de cette énergie sera renvoyée vers l'extérieur, tandis qu'une autre sera captée par le surface sous état de chaleur, et la majorité sera transmise par conduction vers les couches internes du mur externe via les molécules du revêtement. Ce débit thermique poursuivra à se diffuser jusqu'à atteindre l'air intérieur de l'habitat par le biais de rayonnement ou par convection. [146]

### 5.11. Grandeurs caractéristiques :

#### 5.11.1. le flux thermique : $\varphi$

Le flux thermique  $\varphi$  (phi) représente la quantité d'énergie ou de chaleur traversant une surface de 1 m<sup>2</sup> pendant une seconde, lorsque qu'il y a une différence de température entre ses deux côtés. Il s'exprime en watts par mètre carré. (W/m<sup>2</sup>).[148]

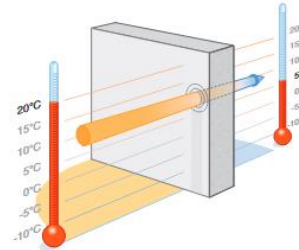
$$\varphi = \lambda \frac{\Delta T}{e}$$

Avec:

$\lambda$ : la conductivité thermique ;

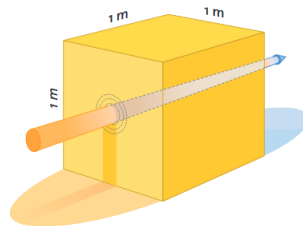
$\Delta T$ : l'écart de température et

e: l'épaisseur de la paroi.



#### 5.11.2. La conductivité thermique : $\lambda$

La conductivité thermique correspond à la quantité d'énergie qui traverse 1 m<sup>2</sup> de matière d'une couche de 1m, et ce pour une différence de température d'un degré. Elle est mesurée en (W/m.k); Il s'agit de la capacité du composant à laisser passer la chaleur au fil de sa structure. conductivité est faible  $\Rightarrow$  Un matériau plus isolant.



#### 5.11.3. La résistance thermique d'un matériau : R

La capacité d'un matériau à diminuer le transfert de chaleur par conduction est décrite par sa résistance thermique. mesurée en m<sup>2</sup>.K/W; à une fonction cruciale dans l'isolation et l'amélioration des performances thermiques du revêtement de l'habitat, liée à la capacité thermique du matériau ainsi qu'à son épaisseur. [146-148]

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Avec

R : résistance thermique en m<sup>2</sup>.K/W

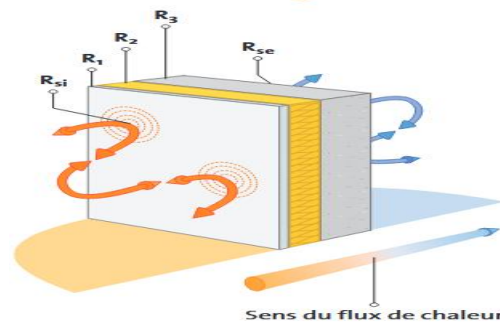
e : épaisseur du matériau en mètre

$\lambda$  : conductivité thermique du matériau en W/(m.K).

#### 5.11.4. La déperdition d'une paroi (coefficient de transmission thermique): U

Le coefficient de transmission thermique U d'un mur indique la quantité de chaleur qui se perd à travers un mur homogène d'1m<sup>2</sup> pour une différence de température d'un degré. C'est obtenu par calcul, ce qui représente l'inverse de la résistance thermique totale d'une paroi et est exprimé en W/(m<sup>2</sup>.K). Il est utilisé pour décrire les pertes thermiques d'une paroi constituée d'un matériau unique ou de plusieurs matériaux. [146-148]

$$U = \frac{1}{\sum R} = \frac{1}{R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{se}}$$

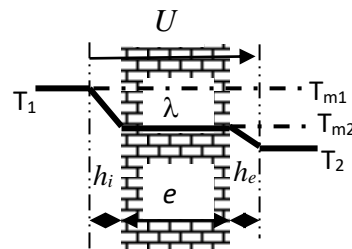


$$\frac{1}{U} = \sum \frac{e}{\lambda} + \left( \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} \right)$$

e: Epaisseur du chaque matériau(m).

λ: Conductivité thermiques (W/m<sup>2</sup>°C).

1/h<sub>i</sub>, 1/h<sub>e</sub>: résistances thermiques d'échanges superficiels intérieurs (m<sup>2</sup>°C/w).



Il est essentiel dans la phase de conception de prendre en compte l'étude de la déperdition de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment se produisant à tous les niveaux.

L'interaction de l'enveloppe du bâtiment avec son environnement à travers différents phénomènes tels que la conduction, la convection et le rayonnement entraîne des pertes considérables.

Une habitation mal isolée, 30 % de la chaleur se perd par le toit, 10 % voire 15 % par les fenêtres et vitres, 25 % par les parois, et 7 % ou 10 % par les planchers.

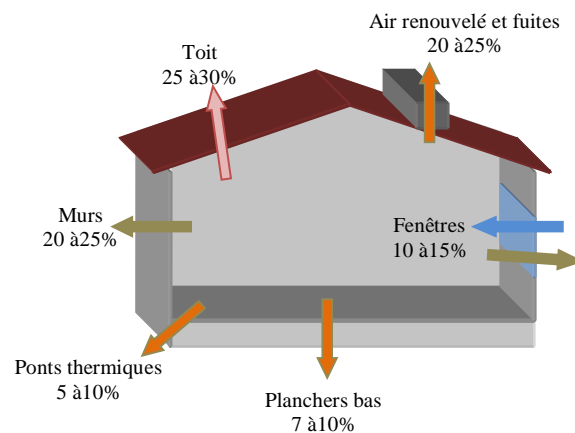


Figure V.7 Pertes de chaleur d'une maison individuelle non isolée

### 5.12. Amélioration de l'efficacité énergétique bâtiments

La mise en place de stratégies d'efficacité énergétique dans les constructions est une des approches extrêmement performantes pour minimiser les dépenses sur toute la durée de vie. Avec une sensibilisation grandissante de l'impact des constructions sur l'environnement, les solutions clé pour améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment illustré dans la figure :

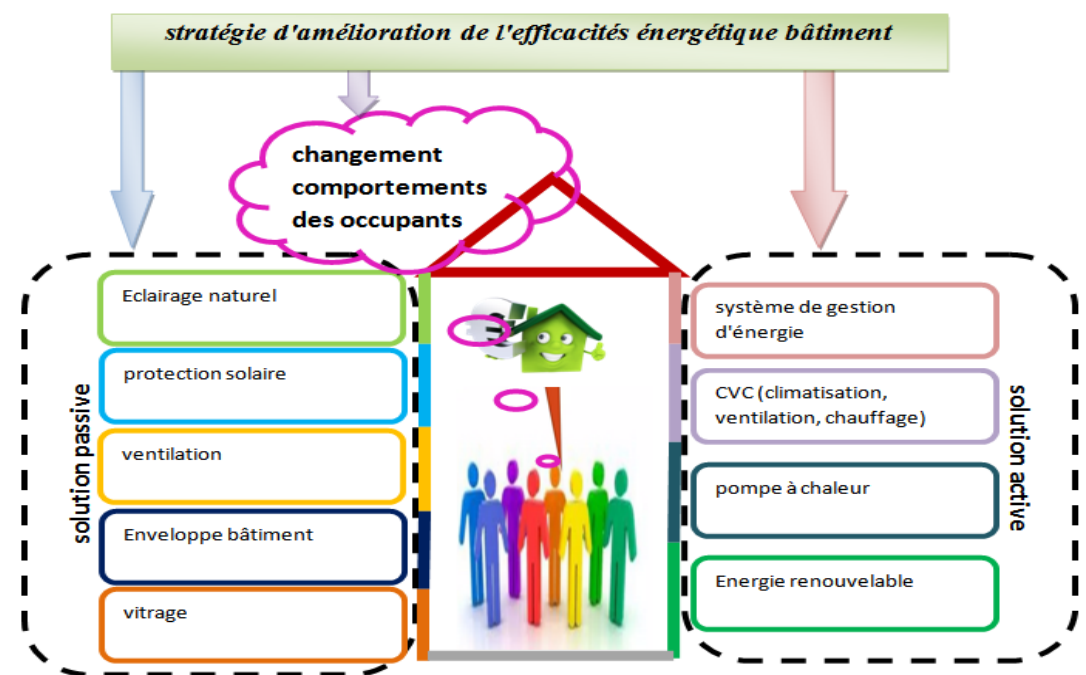


Figure V.8 Stratégie d'amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment.

#### 5.12.1. solution passive

- **Opter pour l'éclairage naturel** : Il est gratuit et abondant. Cela est réalisé par la création de bâtiments disposant de fenêtres orientées vers le sud afin d'optimiser la lumière et la chaleur du sol. Optez pour des lucarnes et d'autres fenêtres afin de

permettre l'entrée de la lumière naturelle dans le bâtiment. Ceci diminue la nécessité d'éclairage artificiel durant la journée.

- vitrage : Les fenêtres et les composants du vitrage jouent un rôle crucial dans la durabilité de l'enveloppe du bâtiment, car ils peuvent générer et dissiper de la chaleur par le biais de : transmission Directe via le verre ou le vitrage, le support et/ou la porte; L'émission de chaleur dans un bâtiment (habituellement provenant du soleil). La sélection du type de vitrage est cruciale pour optimiser la pénétration lumineuse et influence la qualité thermique des pièces intérieures[149]. (**Vitrage à haute performance**)

- L'enveloppe du bâtiment englobe toutes les parois (verticales et horizontales) qui interagissent directement avec l'environnement externe. La qualité thermique des espaces internes est influencée par la configuration des parois et les matériaux de construction, ce qui peut entraîner une augmentation ou une réduction du besoin d'emploi des systèmes Climatisation/chauffage. C'est à ce moment-là que le rôle crucial des isolations de parois se manifeste. L'application optimale d'isolations de murs renforcera la structure et diminuera les échanges de chaleur au sein du bâtiment. Cela renforce la résistance thermique du mur, améliorant ainsi la qualité de la chaleur dans les espaces internes.[149]

Lors de la construction d'un nouveau bâtiment, il est primordial de choisir les matériaux appropriés. Actuellement, on privilégie la construction de constructions dotées d'une énergie positive.

#### 5.12.2. solution active

- Améliorer les systèmes de climatisation, chauffage (CVC): La consommation énergétique d'un bâtiment est grandement influencée par les systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation (CVC). Il est possible de diminuer significativement la consommation d'énergie et les coûts en optimisant les systèmes de chauffage central.

- Installation de sources d'énergie renouvelables. le solaire, l'éolien et la géothermie peuvent assurer une proportion significative des besoins en électricité d'un bâtiment. La mise en place de panneaux solaires ou d'éoliennes peut générer de l'électricité et diminuer la dépendance au réseau. Par ailleurs, les dispositifs géothermiques ont la capacité de produire du chauffage et du refroidissement en exploitant la chaleur solaire naturelle.

- Les dispositifs de gestion énergétique peuvent faciliter la surveillance et le contrôle de la consommation d'énergie des entreprises, ce qui conduit à une efficacité accrue et à une réduction des dépenses. Les systèmes de contrôle énergétique figurent parmi les plus performants pour superviser et gérer la consommation d'énergie. Généralement, ces systèmes se manifestent par un dispositif placé dans le panneau principal d'un bâtiment ou d'une maison qui évalue la consommation d'électricité de différents appareils. Par la suite, les informations sont envoyées vers un hub central ou une plateforme en cloud, où elles peuvent être examinées et exploitées pour déterminer les zones qui nécessitent une grande quantité d'énergie.

- Mise en place de capteurs de présence : Lorsqu'une pièce est vide, les capteurs de présence arrêtent automatiquement les lumières. Ceci diminue le gaspillage d'énergie en assurant que les lumières ne sont activées qu'en cas de nécessité.

- Optez pour des thermostats programmables : Ces derniers facilitent le contrôle de la température du bâtiment. Ceci diminue le gaspillage d'énergie en assurant que le système de climatisation ne opère qu'en cas de nécessité.

### 5.12.3. Amélioration du comportement des occupants:

De petites modifications de comportement peuvent aussi favoriser une meilleure efficacité énergétique. Il est possible de diminuer la consommation d'énergie et les dépenses en mettant hors service les lumières et les dispositifs électroniques, en préférant la lumière naturelle à l'éclairage artificiel.

## 5.13. Enveloppe d'un bâtiment et isolation thermique

Pour garantir un environnement agréable. Il est essentiel de satisfaire des besoins en matière de confort thermique, acoustique optique tout en garantissant une qualité optimale de l'air.

### 5.13.1. position de isolation thermique

L'enveloppe thermique d'un bâtiment est la structure qui distingue la zone chauffée de son environnement externe. Et garantit aux résidents un environnement interne plaisant, peu influencé par les conditions météorologiques. En particulier en termes météorologiques et acoustique.

La structure de L'enveloppe d'un bâtiment regroupe:

- Les façades (murs et fenêtres).
- Les fenêtres.
- Les toitures

- Les dalles et les murs du sol

Afin de garantir une qualité optimale du climat interne et du confort thermique des bâtiments, il est possible d'adopter des mesures passives (comme l'isolation thermique de la structure, les protections solaires, le chauffage solaire passif et le refroidissement passif), tout comme des mesures actives (telles que les dispositifs de chauffage/climatisation).

L'isolation thermique fait référence à toutes les méthodes utilisées pour réduire le transfert de chaleur entre un environnement chaud et un environnement froid. L'isolation thermique est employée dans divers secteurs, y compris : le bâtiment

On peut procéder à l'isolation de toiture, des combles et des murs de manière interne, moyenne (position médiane) ou externe.

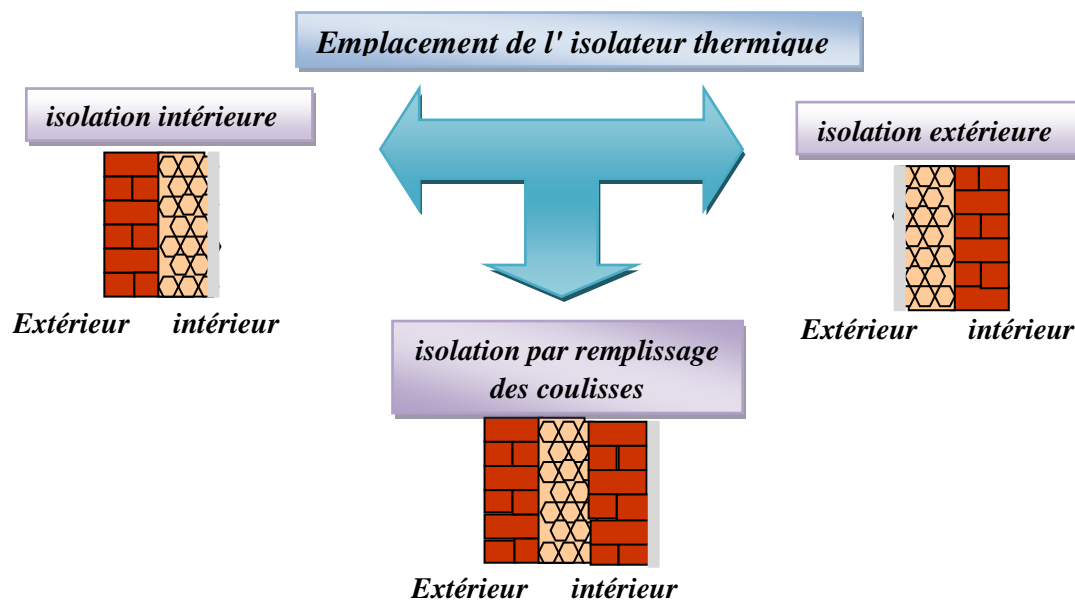


Figure V.9 Emplacement de l'isolateur thermique.

**a) L'isolation thermique par l'intérieur:** est évidemment la méthode la plus fréquemment opté. Elle nécessite moins d'efforts, est plus abordable et est simple à mettre en œuvre.

**b) L'isolation thermique par l'extérieur :** son installation est nettement plus compliquée et nécessite la supervision d'un expert. L'avantage réside dans la possibilité, par exemple, de rénover la façade pour en bénéficier pour l'isolation des murs ou de planifier des travaux de toiture afin d'exploiter cette opportunité pour isoler les combles. Cependant, son principal atout réside dans l'annulation de tous les ponts thermiques.

L'objectif de cette recherche est d'analyser et d'évaluer l'effet des parois isolées par l'intérieur d'un habitat sur son efficacité énergétique dans les conditions climatiques chaudes et sèches du sud algérien.



### 5.13.2. Catégories d'isolants thermiques :

Une étude de la littérature sur les matériaux d'isolation thermique a été réalisée. On peut répartir les isolants en diverses catégories. [150-151-152]

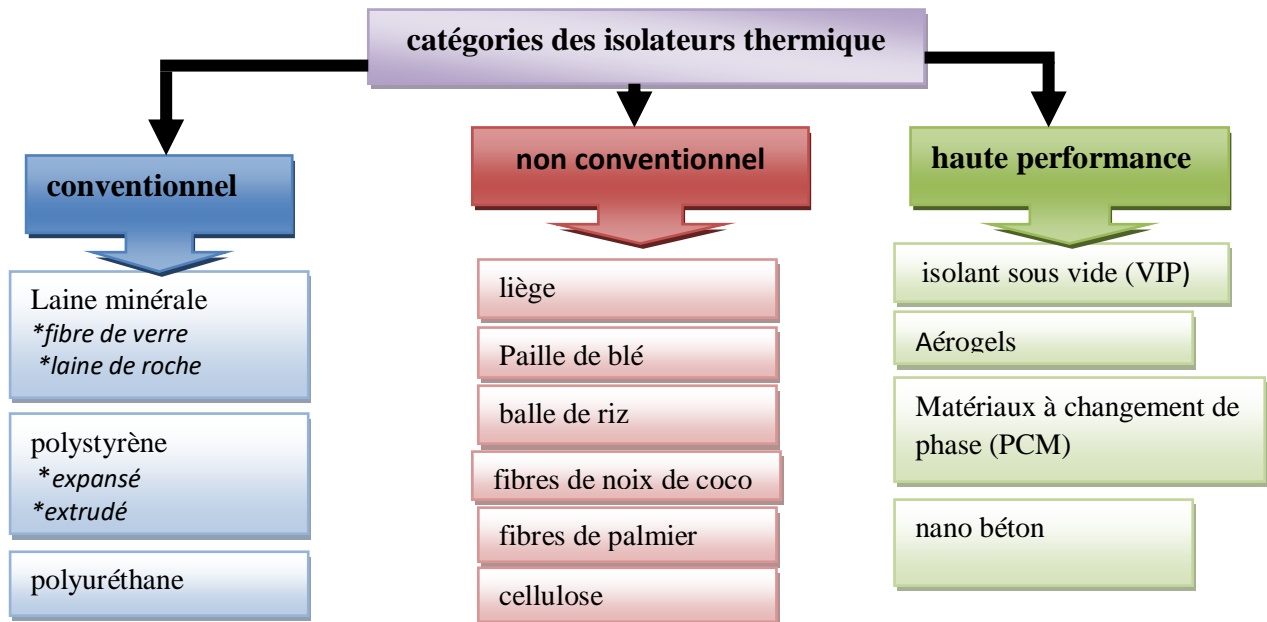


Figure V.10 Catégorie des isolateurs thermique.

## 5.14. Les isolants couramment employés

### 5.14.1. Isolants minéraux :

Actuellement, les isolants les plus fréquemment employés sont la laine de verre (LDV) et la laine de roche (LDR), qui font partie de la catégorie des silicates et constituent des fibres artificielles.

Malgré leurs excellentes performances en matière d'isolation, leur longévité reste médiocre. En matière de santé, ils renferment des liants résineux à base d'urée-formol ou phénol-formol et des inhibiteurs de poussières dont les conséquences chroniques sont complexes à quantifier. D'un point de vue environnemental, leur impact énergétique est considérable.

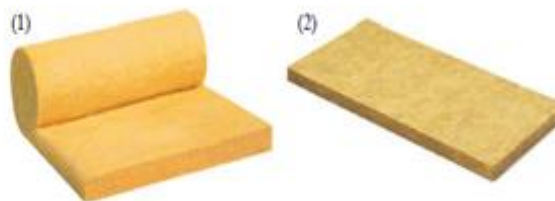


Figure V.11 Types d'isolants minéraux: (1) Laine de verre, (2) Laine de roche.

### 5.14.2. Isolants synthétiques :

Les polystyrènes expansés (PSE) ou extrudés (PSX), qui sont des mousses de polyuréthane issues du pétrole, requièrent une quantité considérable d'énergie pour leur fabrication. Malgré leur efficacité en tant qu'isolants thermiques, ils comportent plusieurs désavantages. Ils ont une grande capacité de combustion et, en cas d'incendie, ils produisent des fumées compactes renfermant des gaz nocifs et asphyxiants.

On utilise le polystyrène expansé pour l'isolation des murs, qu'ils soient internes ou externes, des toitures et du sol. Les panneaux ont des dimensions de 2, 2.5 ou 3\*1m et peuvent varier en termes d'épaisseur sur demande.

#### Polyuréthane

Le polyuréthane (PUR), disponible sous forme de panneaux ou en mousse projetée, est composé d'un polyol, d'un iso cyanate (toluène diisocyanate) et d'un agent d'expansion (HCFC ou CO<sub>2</sub>), accompagné de catalyseurs (amines aliphatiques ou aromatiques).

Au moment de son application, le polyuréthane libère d'importantes quantités d'iso cyanates. Ces émissions, qui peuvent irriter la peau, les yeux et les voies respiratoires, diminuent lorsque le produit se durcit. Lors d'un incendie, le polyuréthane produit du monoxyde de carbone, de l'iso cyanate et principalement de l'acide cyanhydrique qui provoque des céphalées, des vertiges, des oppressions thoraciques. [152]

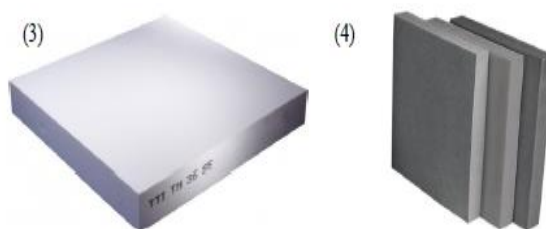


Figure V.12 Types d'isolants synthétique: (3) Polystyrène, (4) Polyuréthane.

### 5.14.3. Isolants végétaux :

Cette classe d'isolant qui satisfait aux critères clés d'éco-construction est entièrement conforme à la version HQE (Haute Qualité Écologique).

Ces matériaux, peu énergivores lors de leur production et biodégradables, se présentent sous différentes configurations : en vrac, en laine, en conglomérat, en rouleaux ou en panneaux

Sous la demande constante des prescripteurs, leur coût devrait tendre à diminuer considérablement sur le moyen terme comme:

Les panneaux en fibres de bois

Le liège expansé.

Les panneaux composites.

cellulose et fibres végétales. [136]

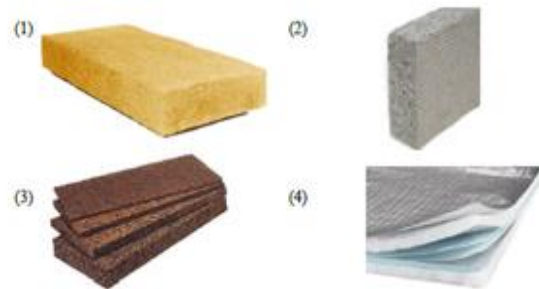
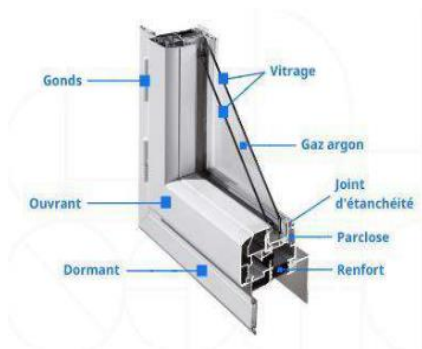


Figure V.13 Types d'isolants végétaux:(1) Laine de bois,(2)Ouate de cellulose, (3) Liège, (4) isolant mince

#### 5.14.4. les surfaces vitrées :

Au fil des trente dernières années, les méthodes de production de fenêtres et de surfaces vitrées se sont considérablement améliorées. Les fenêtres dotées d'un double vitrage isolant sont de plus en plus courantes. Parallèlement, il existe des unités avec un triple vitrage qui ne sont pas aussi fréquentes que les fenêtres doubles. Il existe aussi des unités à double panneau dotées d'une ou plusieurs strates de polyester. Les matériaux de revêtement en verre faiblement rayonnant ont également gagné en popularité. Il est nécessaire de sélectionner une qualité adéquate adaptée tant au climat qu'à la conception architecturale afin d'obtenir les performances thermiques optimales dans le bâtiment.

L'emploi d'une marque destinée à des conditions climatiques chaudes dans des conditions climatiques froides, ou inversement , peut provoquer des performances thermiques moindres que ce qu'on pourrait espérer sans celle-ci.



(1)



(2)

Figure V.14 Rubrique et interface dans une fenêtre Aluminium(1), fenêtre bois PVC (2).

### 5.15. Contribution à l'amélioration énergétique du système étudié

Dans cette partie du chapitre nous allons étudier l'impact de l'isolation thermique des bâtiments sur la performance fonctionnelle du système d'alimentation en énergie électrique à base d'énergie renouvelable (PV/Eolien) de l'habitat situé dans une zone isolée à Adrar.

#### 5.15.1. Outil de simulation énergétique utilisé

L'analyse énergétique est effectuée grâce à des outils numériques qui facilitent une analyse approfondie des modèles. Ces derniers reposent sur diverses caractéristiques de l'infrastructure examinée. Grâce à ces instruments, les ingénieurs peuvent effectuer une simulation adéquate de toutes les informations de l'infrastructure en se basant sur les paramètres associés à chaque composante afin d'obtenir finalement la solution optimale. Le programme réalise des calculs afin de nous permettre d'adopter un modèle lucratif qui répond à notre problème. L'utilisation anticipée des outils de simulation permet d'adopter des solutions efficaces en matière d'énergie.[149]

Des logiciels de simulation d'énergie ont été conçus et employés par des scientifiques, des architectes et des professionnels afin d'aborder les problématiques liées à l'efficacité énergétique des constructions domestiques et tertiaires (TRNSYS, EnergyPlus, COMSOL [140]).

Dans cette thèse, une analyse numérique utilisant TRNSYS est menée.

#### a) *TRNSYS*

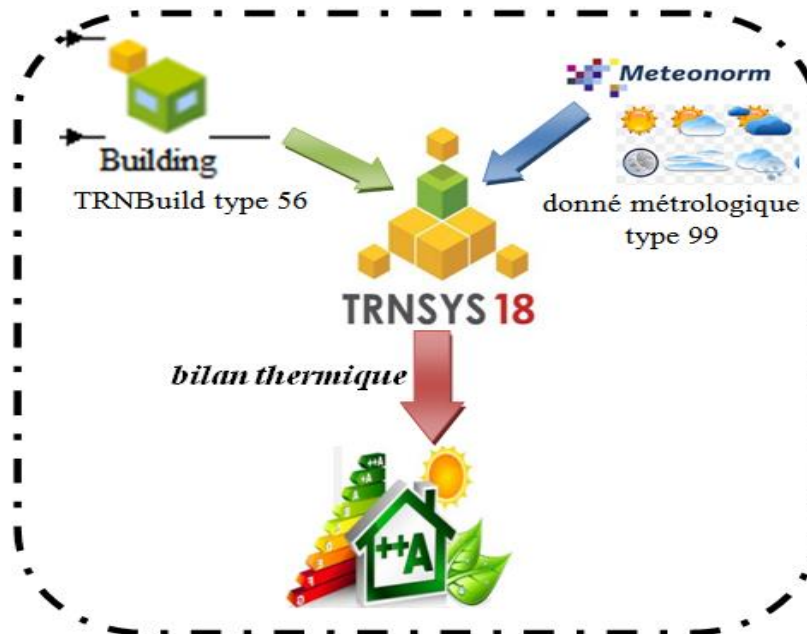
Le logiciel commercial TRNSYS (TRaNsient System Simulation) a été conçu par le laboratoire d'énergie solaire de l'Université de Madison, située au Wisconsin (États-Unis).

TRNSYS, disponible depuis 1975, se spécialise dans la simulation thermique dynamique des constructions et des systèmes solaires. Il est également utilisé pour concevoir et simuler pour les bâtiments mono ou multizones en fonction de leur localisation, de leurs matériaux de construction, de leur architecture, etc.[153-154]

TRNSYS, le logiciel de simulation, continue de se développer grâce à la collaboration internationale des États-Unis, de la France et de l'Allemagne. TRNSYS reste l'un des logiciels de simulation énergétique les plus flexibles en facilitant l'ajout de modèles mathématiques, les composants complémentaires disponibles, les capacités du modèle de bâtiment multizone et la possibilité d'interface avec d'autres programmes de simulation.[154]

TRNSYS dispose d'un éventail de composants, également appelés (Types), riche et varié (bâtiment mono ou multizones, dispositifs de chauffage/refroidissement, informations météorologiques, etc.). La phase cruciale d'un projet de simulation, la création du fichier TPF

(TRNSYS Project File), implique la mise en relation des divers composants requis pour la simulation désirée : le bâtiment multizone (Type 56) de TRNBuild, les informations météorologiques (Type 99) de Meteonorm, etc



#### b) Meteonorm

Meteonorm est une plateforme des informations météorologiques exhaustive destinée aux applications de simulation d'ingénierie dans le cadre de l'application passive, active et photovoltaïque de l'énergie solaire, offrant des interfaces de données intégrales.

Les informations sont des cycles annuels typiques produites de façon aléatoire provenant d'interpolations de moyennes mensuelles sur le long terme. Ils symbolisent une année typique de la période climatique choisie selon des critères fixés par le client à l'endroit sélectionné.

Meteonorm est une application de normalisation qui facilite l'accès à une collection de données météorologiques exhaustive et homogène pour les développeurs et les usagers de logiciels techniques.

Meteonorm est une source de référence en matière météorologique pour des domaines tels que l'agriculture, la foresterie, la recherche écologique, ainsi que pour toute personne intéressée par la météorologie et l'énergie solaire.[155]

## 5.16. Donnée climatique par Meteonorm d'Adrar

### 5.16.1. Situation géographique et climat wilaya d'Adrar

Adrar est une wilaya d'Algérie, située à 27°52'50,16" Nord et 0°17'50,00" Ouest, avec une altitude de 279 m.

En 2019, la wilaya d'Adrar se divise en six daïras (unités administratives) et 28 communes, avec une structure administrative qui n'a pas connu de modifications majeures. Les six daïras comprennent Adrar, Aouinet, Bordj Badji Mokhtar, Djanet, Oued Tadjit et Reggane.

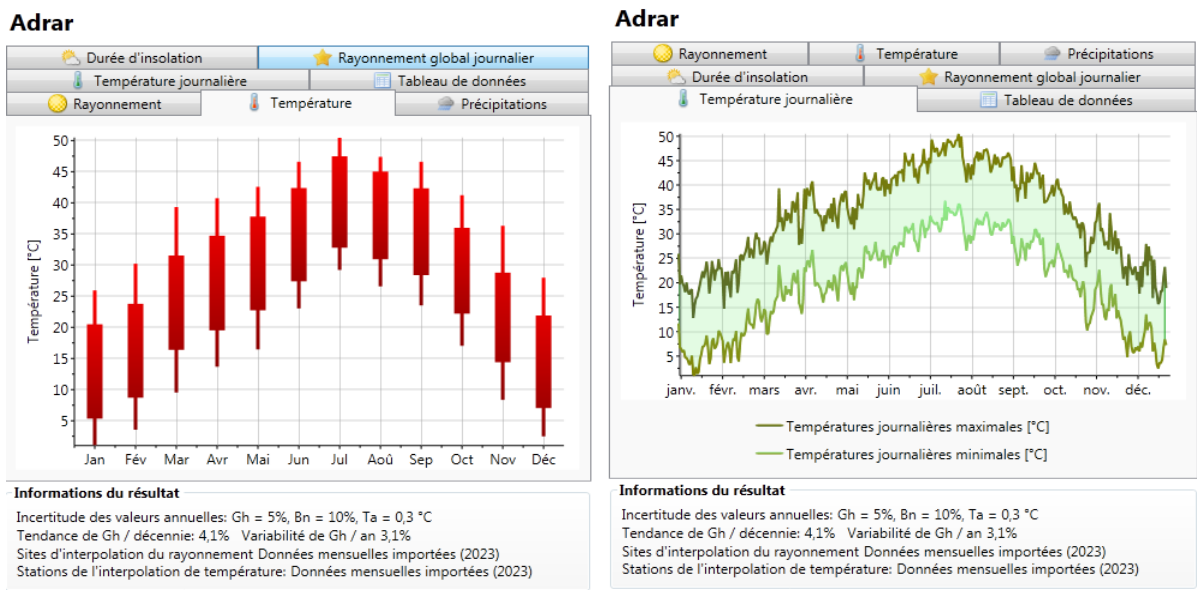
La wilaya d'Adrar se consacre principalement à l'agriculture grâce aux ressources en eau souterraine considérables, au commerce en raison de sa position géostratégique face à l'Afrique et au tourisme par le biais de ses sites et oasis de grande valeur internationale, de son artisanat traditionnel et de sa diversité culturelle. [156]



Figure V.15 Situation géographique de la wilaya d'Adrar.

### 5.16.2. Température journalière par Meteonorm

La wilaya d'Adrar connaît des variations significatives de températures. Durant l'été, les températures grimpent jusqu'à 45°C à 50°C (juin, juillet et août). Il arrive parfois que les températures en hiver atteignent les 0°C (en décembre et janvier).





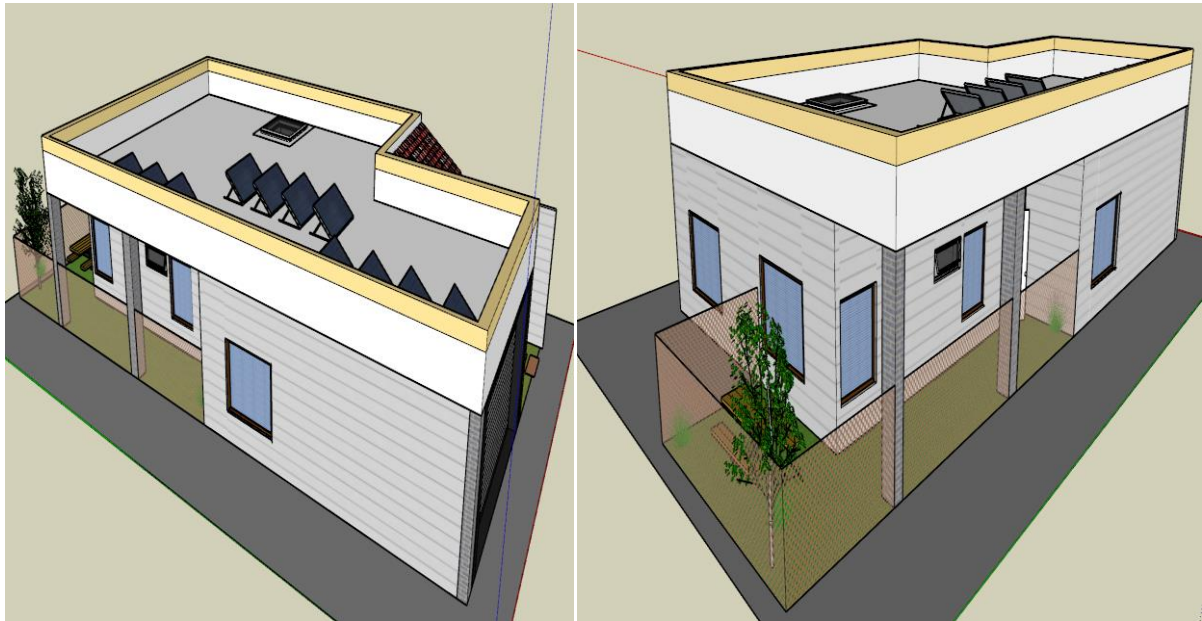


Figure V.18 Plan de la maison étudié

### 5.18. Simulation sous TRNSYS

La modélisation de la maison étudié sous TRNSYS est monter sur la figure suivante:

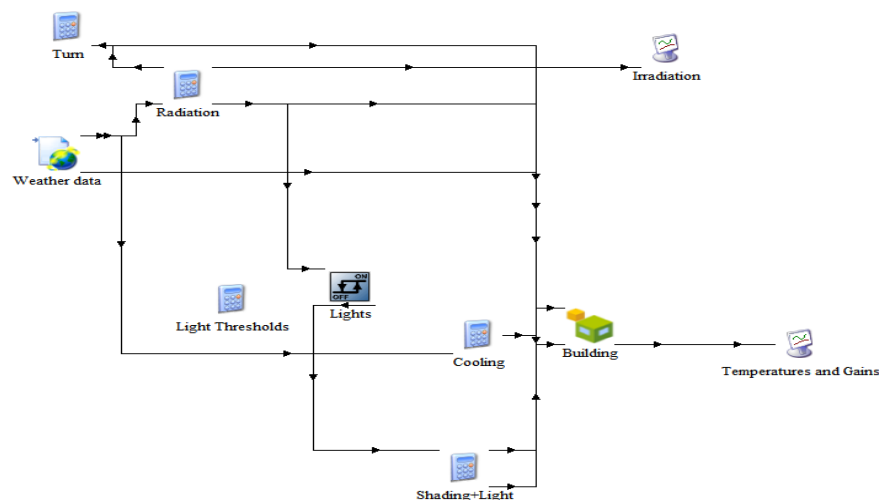


Figure V.19 Modélisation sous TRNSYS de la maison étudié

### 5.19. Construction de la maison sous TRNBuild

Le programme TRNSYS divise la maison en plusieurs zones interconnectées, chaque zone possédant ses propres attributs de l'enveloppe (parois, fenêtre, appareil de chauffage et climatisation, etc.). Il offre également une base de données sur les matériaux employés, leurs paramètres correspondants, conductivités et capacités thermiques.



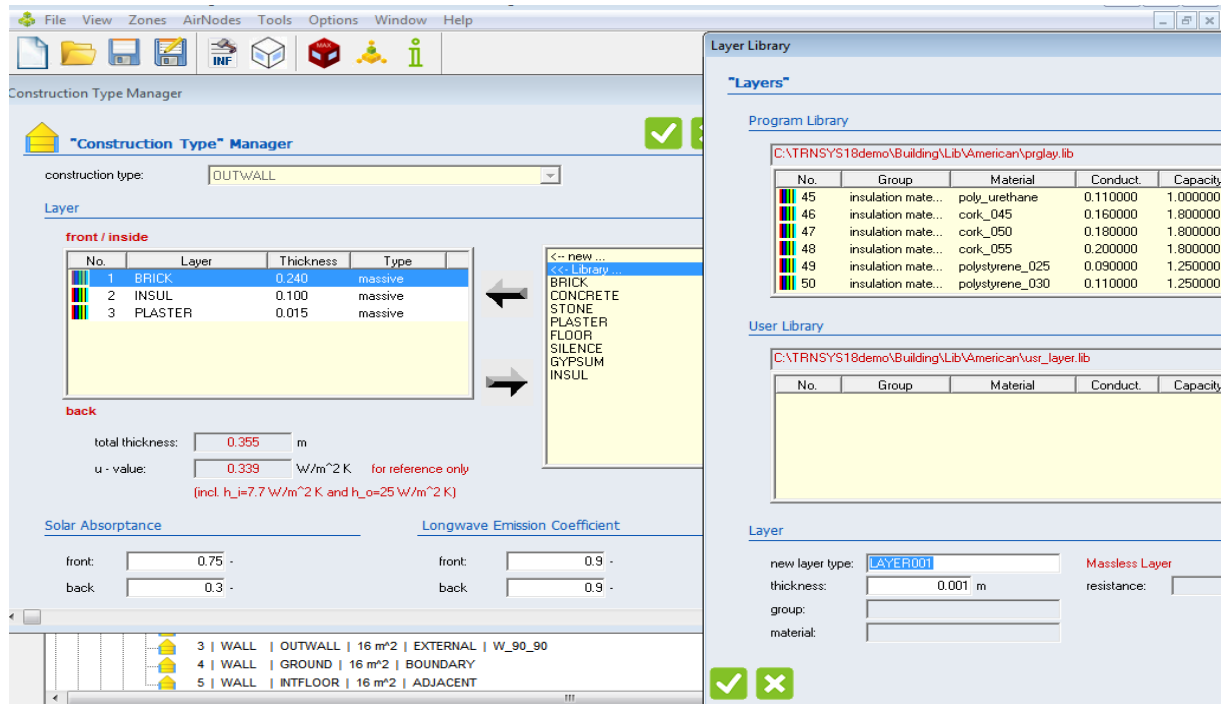


Figure V.20 Modélisation sous TRNbuild de la maison étudié

### 5.20. Enveloppe de l'habitat (détail de construction)

Le tableau ci-dessous présente la composition des parois qui forment l'enveloppe de l'habitat, tandis que les résistances thermiques sont déterminées.

On déduit ensuite les coefficients de transfert thermique U pour chaque paroi.

Matériau	Epaisseur cm	Conductivité thermique $\lambda$ (W/mk)	Résistance thermique $R$ (m²k/W)	U (W/m²°K)
Mur extérieur				
$1/h_i$			0.11	$U_{\text{mur-Ex}} = 0.19 \text{ W/m}^2\text{°K}$
Mortier de ciment	2	1.4		
Brique 10cm	10	0.48		
Lame d'Air	10	0.024		
Brique 10cm	10	0.48		
Enduit en Plâtre	1	0.35		
$1/h_e$			0.06	
Mur intérieur				
$1/h_i$			0.11	$U_{\text{mur-In}} = 1.87 \text{ W/m}^2\text{°K}$
Enduit en plâtre	2	0.35		
Brique creuse	10	0.48		
Enduit en plâtre	2	0.35		
$1/h_i$			0.11	
Plancher bas en contact avec sol				
$1/h_i$			0.17	$U_{\text{Plch-bs}} = 0.49 \text{ W/m}^2\text{°K}$
Carrelage	2	1		
mortier	2	1.15		
Sable gravier	5	0.03		
Dalle en béton lourd	15	1.75		

Mortier	1	1.15	
1/he		0.05	
toiture			
1/hi		0.09	$U_{\text{toit}} = 0.60 \text{ W/m}^2\text{°K}$
Mortier	3	0.23	
Sable du gravier	5	0.03	
Dalle en béton armé	4	1.75	
Hourdis	16	1.14	
Plâtre	2	0.35	
1/he		0.05	

Tableau V.3 : Coefficient transfert thermique U des parois de l'habitat.

### 5.21. les fenêtres

Les lacunes des bâtiments à haut rendement énergétique sont les fenêtres et les cadres. Par ses caractéristiques physiques, le verre affecte la performance thermique et lumineuse des lieux d'intérieur

Le choix de fenêtres adéquates peut améliorer l'éclairage naturel, air conditionné, la limitation du bruit et de plaisir visuel qui connecte les espaces internes aux extérieurs.

On a opté pour deux sortes de vitrage (simple et double). La simulation effectuée avec ces deux catégories de verres illustre les conséquences du changement du type de vitrage sur les performances thermiques et énergétiques de l'habitat.

Le type de vitrage se distingue par le nombre de vitres et l'application du revêtement (à faible émission/réfléchissant) sur les surfaces du vitrage. L'efficacité de la fenêtre est déterminée par deux facteurs : la valeur U et le coefficient de gain de chaleur solaire (SHGC).[138]

Les coefficient des vitrages nu en ( $\text{W/m}^2\text{°C}$ ) sont données dans le tableau suivant d'après (DTR C362)[144] :

type	type de menuiserie	Paroi verticale
Simple vitrage	bois	5
	métal	5.8
Double vitrage	bois	3.3
	métal	4

Tableau V.4 : Coefficient des vitrages nu (simple et double)[DTR CS3-2]

### 5.22. 1<sup>er</sup> scénario impact de l'isolation thermique intérieure des murs sur l'énergie consommée (chauffage/climatisation)

L'isolation intérieure se distingue par son coût d'investissement inférieur à celui de l'isolation extérieure.

La laine de verre, le polystyrène et les mousses de polyuréthane font partie des isolants couramment utilisés, avec une épaisseur d'isolation variant entre 4 et 8 cm. La sélection de l'isolant repose sur sa capacité à résister aux températures fonctionnelles.

Dans notre recherche, nous avons employé le polystyrène en tant qu'isolant thermique grâce à sa faible conductivité thermique. Tableau V.5. [142]

Désignation	Conductivité thermique (W/m°C)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Température max d'utilisation (°C)
Laine de roche	0.05	80-156	150
Laine de verre	0.05	70	150
Polystyrène	0.035	35	85
Polyuréthane	0.027	35-45	110

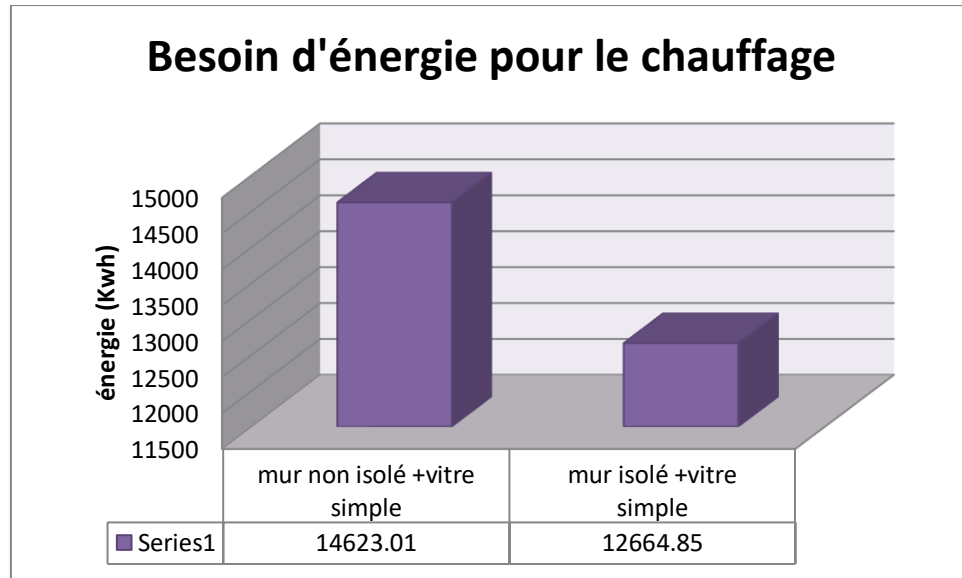
Tableau V.5 : Conductivité thermique des isolants

Pour étudier l'effet de la méthode d'isolation thermique interne des parois, les besoins en énergie de la maison, qu'elle soit isolée ou non, ont été évalués en utilisant le logiciel TRNSYS.

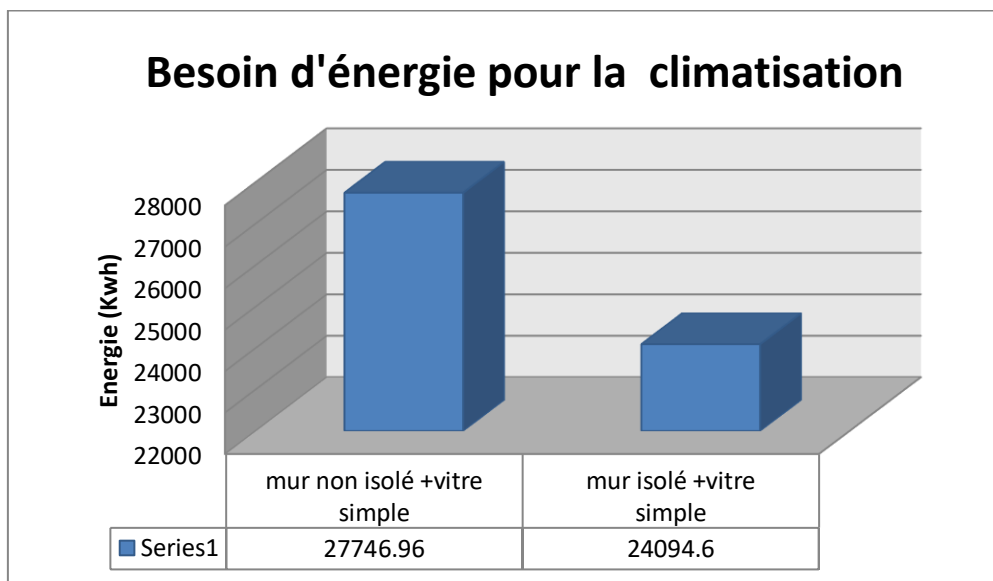
Durant l'hiver, l'utilisation des dispositif de chauffage est indispensable pour chauffer certaines pièces, en particulier les chambres.

La figure V.21 (a,b) illustre les besoins annuels de chauffage et de climatisation pour l'habitat étudié, exprimés en kWh par an dans les deux cas avec et sans isolation thermique intérieur des murs, ces résultats sont obtenus par le logiciel de simulation énergétique TRNSYS.

Ces résultats démontrent que les systèmes d'isolation thermique intérieure des murs sont économes en matière de dépenses en énergie dans les deux situations consommation de climatisation&chauffage.

Figure V.21 (a) besoin énergétique en chauffage 1<sup>er</sup> scénario

Afin d'améliorer le confort thermique en période estivale, les gens mettent en marche la climatisation ou font appel au ventilateur.

Figure V.21 (b) besoin énergétique en climatisation 1<sup>er</sup> scénario

Ces résultats confirment les décisions concernant l'utilisation des systèmes d'isolation thermique intérieur des murs pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments par rapport à la consommation d'énergie.

### 5.23. 2<sup>ème</sup> scénario impact de l'utilisation de double vitrage (chauffage /climatisation)

Pour analyser le impact de l'isolation thermique de l'habitat par le biais d'un double vitrage sur la consommation et le comportement thermique de l'habitat, une comparaison est réalisée entre deux options : la première option consiste à l'emploi du simple vitrage (comme c'est le cas actuellement) tandis que la seconde se base sur l'usage du double vitrage.

La Figure V.22 (a,b) montre les besoins d'énergie de chauffage et de refroidissement de l'habitat dans les deux configurations.

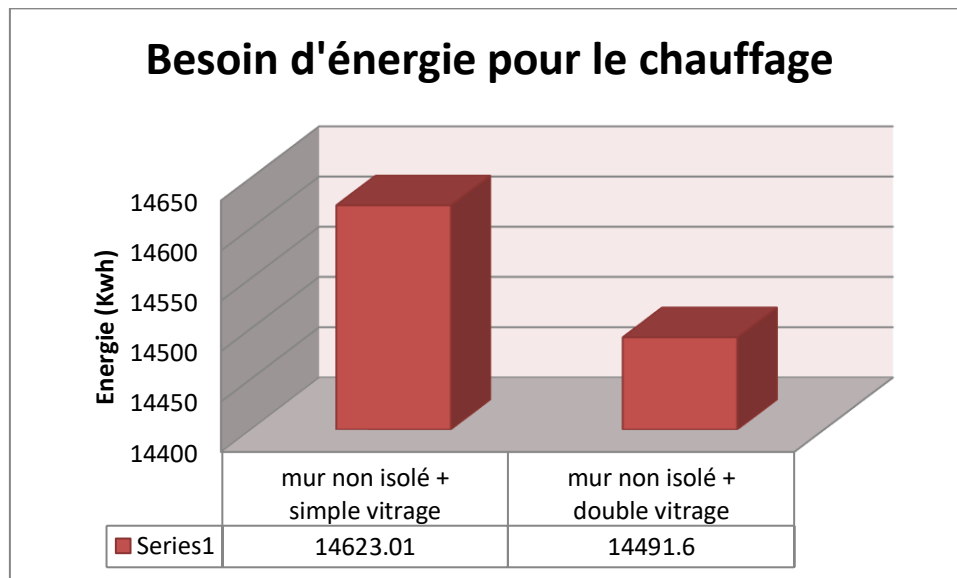


Figure V.22 (a) besoin énergétique en chauffage 2<sup>ème</sup> scénario

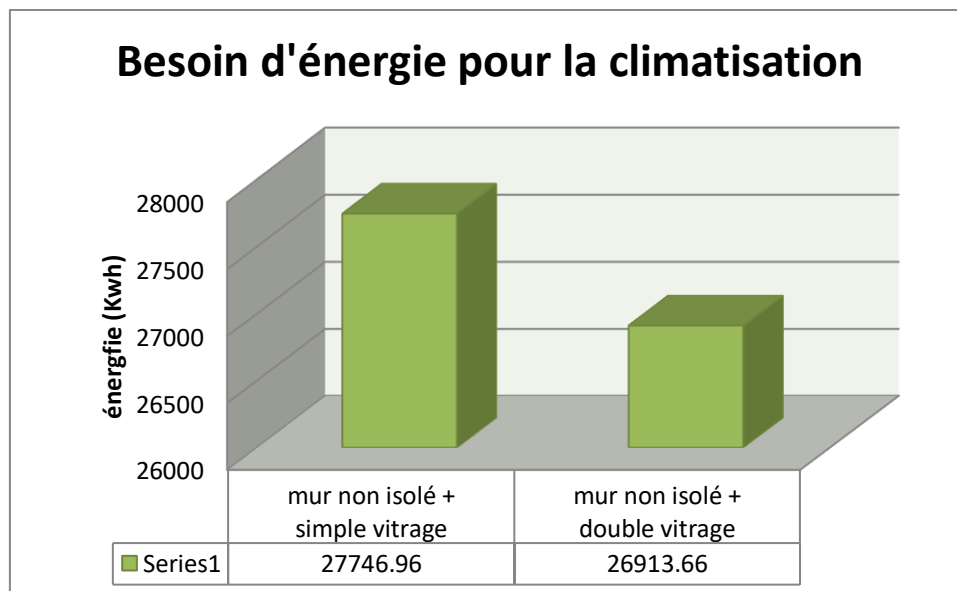


Figure V.22 (b) besoin énergétique en climatisation 2<sup>ème</sup> scénario

D'après cette figure, on constate que pour les deux situations liées au chauffage et à la climatisation, la mise en place du double vitrage contribue à une diminution d'environ 4% de

la demande en énergie pour la climatisation en été, tandis qu'elle réduit environ 2% celle du chauffage en hiver.

#### 5.24. 3<sup>ème</sup> scénario impact de l'isolation des parois + le double vitrage

Une étude détaillée de l'isolation thermique du domicile, incluant la mise en place d'une isolation thermique interne des parois et la mise en place d'un double vitrage, illustre l'impact bénéfique de l'isolation thermique sur l'économie d'énergie.

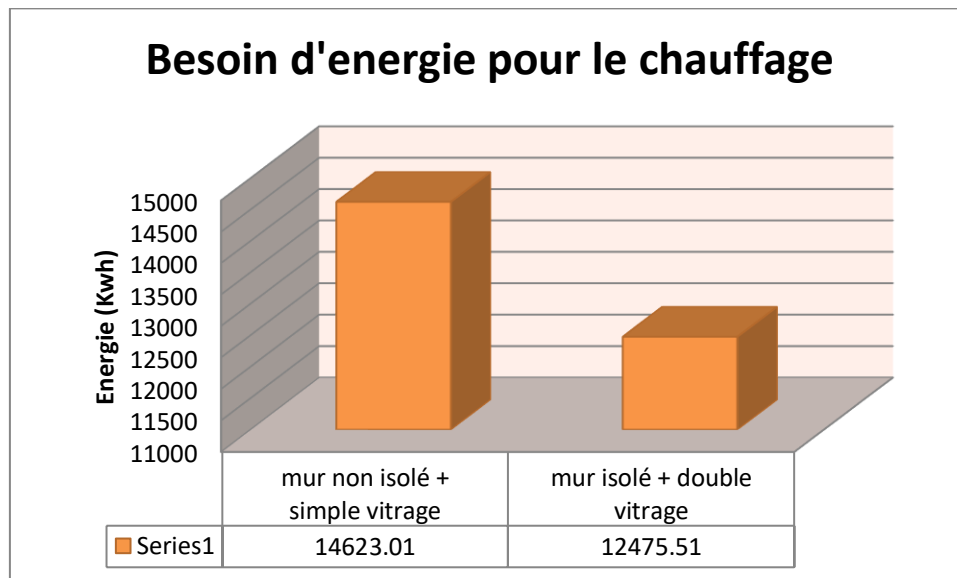


Figure V.23 (a) besoin énergétique en chauffage 3<sup>ème</sup> scénario

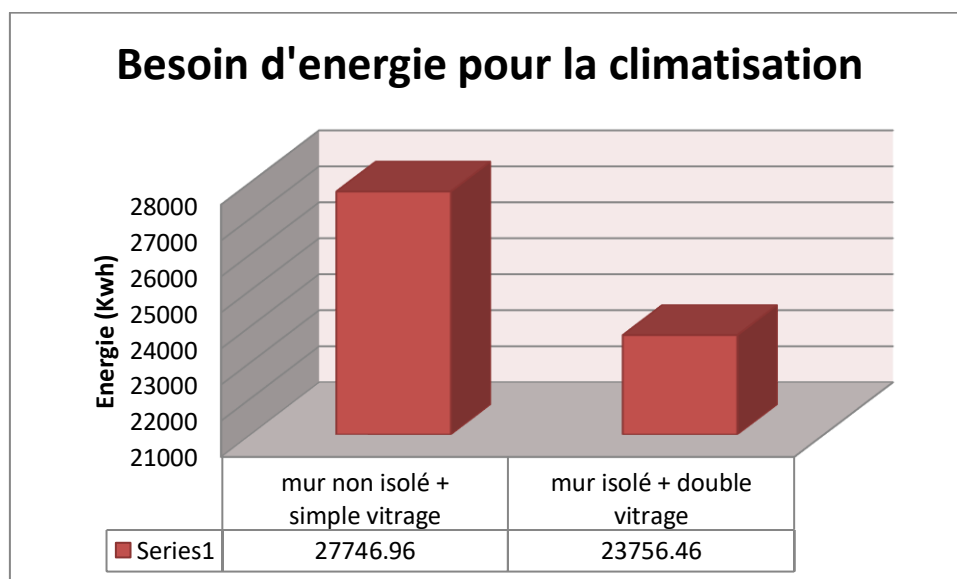


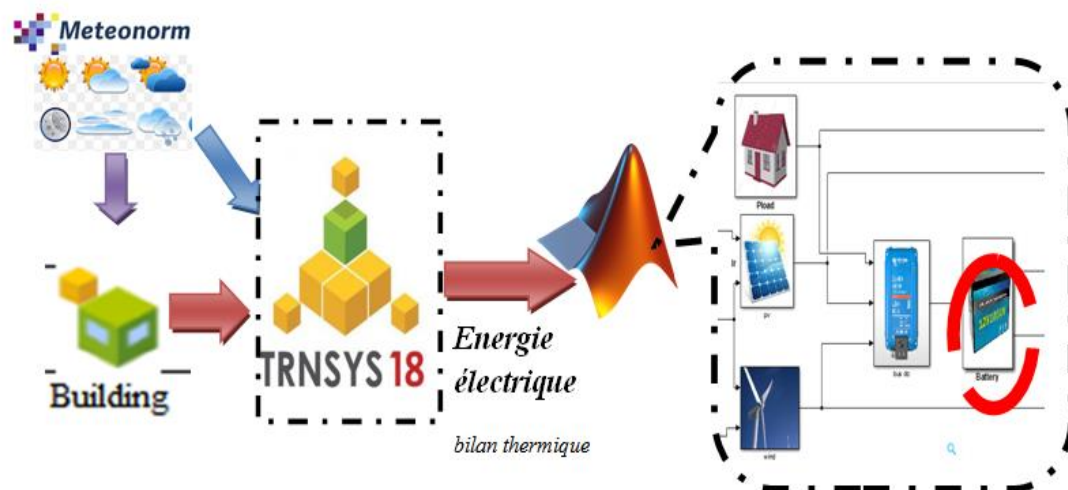
Figure V.23 (b) besoin énergétique en climatisation 3<sup>ème</sup> scénario

La Figure V.23 (a,b) illustre la consommation d'énergie par le dispositif de chauffage/refroidissement dans les deux configurations. L'effet bénéfique de l'isolation thermique des parois par le biais du polystyrène et du double vitrage est souligné par cette figure.

Effectivement, le manque d'isolation provoque une hausse des dépenses de chauffage de 15 % et de 16 % pour la climatisation.

### 5.25. Impact de l'isolation thermique du bâtiment sur la durée de vie de la batterie

Étant donné que la batterie est un élément cher et délicat. Des stratégies de gestion de l'énergie visant à réduire la consommation d'énergie tout en préservant l'intégrité de la batterie pourraient être élaborées.



Les solutions discutées dans ce chapitre visent à prolonger la longévité et à optimiser les performances des batteries en perfectionnant l'enveloppe du bâtiment.

Le travail que nous avons développé dans cette partie repose sur une modélisation thermique de l'habitat étudié en utilisant le logiciel TRNSYS et Nous extrayons la consommation électrique utiliser pour le chauffage et la climatisation, ces données sont ensuite utilisés dans MATLAB/Simulink afin d'étudier l'impact de l'isolation thermique des murs et de vitrage sur le comportement du système de stockage (batterie) d'un système hybride (PV/éolien) utiliser dans notre cas d'étude.

Les résultats de simulation sous MATLAB/Simulink de l'état de charge de la batterie dans les deux cas d'études avec et sans isolation thermique des fenêtres et des murs sont illustré dans figure V.24 (a,b)

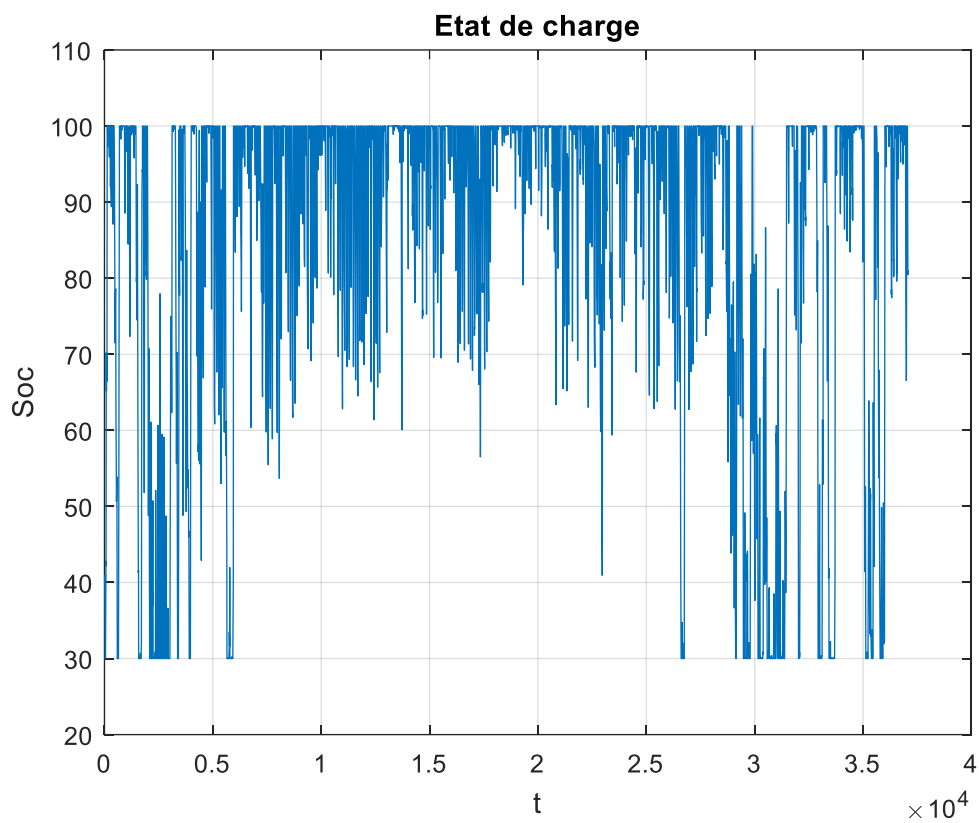


Figure V.24 (a) Etat de charge cas sans isolation

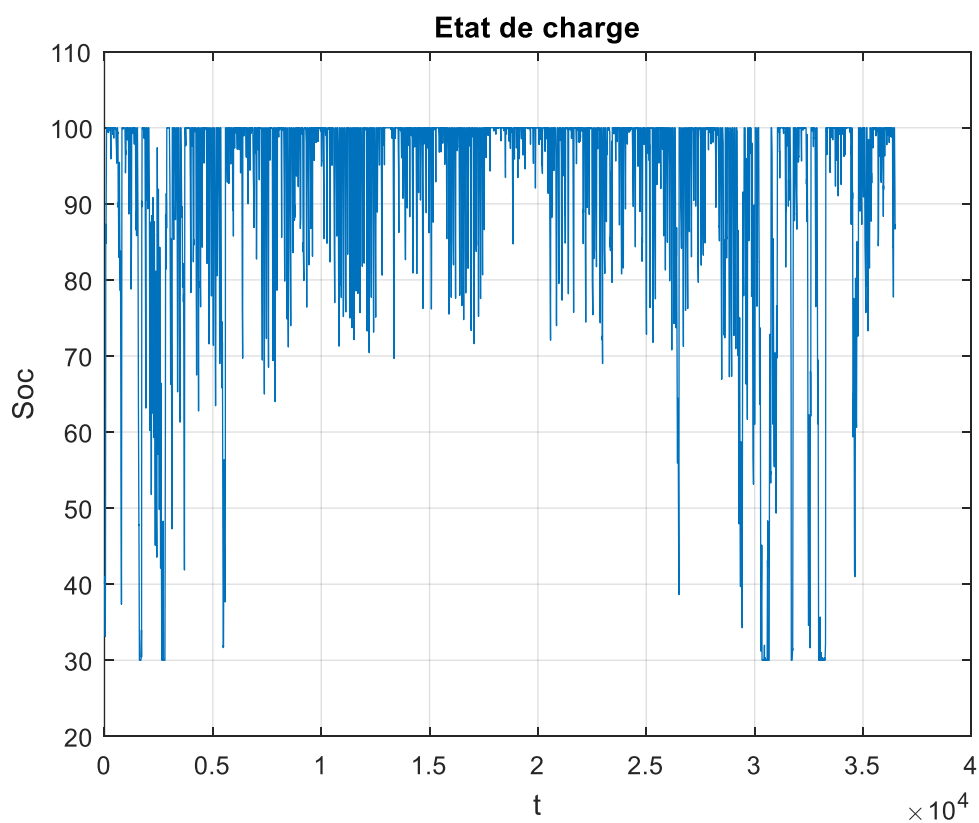


Figure V.24 (b) Etat de charge cas après isolation



Si on envisage une baisse de 10% des besoins énergétiques liés au chauffage et à la climatisation grâce à l'isolation thermique des murs de cette maison typique de la région d'Adrar, on note son impact positif sur l'allongement de la durée de vie de la batterie qui est traduit par réduction du taux de vieillissement de 12.11% à 11.13% est une augmentation de taux de satisfaction qui passera de 4.15% à 0.8%

#### 5.26. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé le comportement thermique d'un habitat localisé dans la région d'Adrar, en utilisant TRNSys/TRNbuild pour modéliser les murs internes/externes, le plafond, le plancher et les fenêtres de chaque section de l'habitat examinée, avec ou sans isolation thermique.

Les simulations effectuées sur divers scénarios, avec et sans prise en compte de l'isolation thermique de l'habitat, sous les variations quotidiennes de température extérieure pendant les saisons estivale et hivernale montrent l'importance cruciale de l'isolation du bâtiment et son impact bénéfique sur la diminution de la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation. Ces résultats sont particulièrement pertinents dans le cadre d'une gestion énergétique d'un système hybride autonome basée sur des énergies renouvelables (solaire/éolien) ainsi que sur la satisfaction de la charge et la prolongation de la durée de vie de la batterie.

# Conclusion Générale

## *Conclusion générale & perspectives*

Au regard de la situation énergétique et écologique mondiale, parvenir à réussir la transition vers l'exploitation des ressources renouvelables est un enjeu commun à tous.

De ce fait, les systèmes de génération d'électricité à base d'énergie renouvelables sont actuellement au cœur de nombreuses études scientifiques concernant la conception, le dimensionnement, la modélisation, l'optimisation, le contrôle, et plus encore.

L'usage de dispositifs de transformation d'énergies renouvelables est une option clairement avantageuse et évident par rapport à l'usage des énergies fossiles, vue les bénéfices qu'ils offrent, notamment leur disponibilité (durabilité et caractère inépuisable) et leur aspect écologique.

Cependant, l'intermittence des énergies solaire et éolienne rend cruciale l'option d'hybridation de ces 2 sources d'énergie avec un système de stockage.

L'intégration de diverses sources d'énergie renouvelable (solaires et les éoliennes) dans un système énergétique à multiples sources peut influencer de manière positive la génération d'électricité en termes de frais et de disponibilité.

Par conséquent, le but de la recherche présentée dans cette thèse est de définir, optimiser et gérer les flux d'énergie entre les différents composants d'une installation mixte d'énergies renouvelables (PV-Eolien), qui est conçu pour fournir de l'électricité à un habitat isolé et à en assurer son autonomie.

Initialement, Nous avons donné un aperçu global le cadre énergétique l'échelle mondiale et nationale par la suite. Une analyse concernant l'analyse énergétique des deux sources hybrides, à savoir le solaire et l'éolien, a été effectuée dans le but de caractériser et de modéliser la chaîne de production hybride.

Le troisième chapitre contient une modélisation détaillée le processus de conversion hybride (éolienne - photovoltaïque). Dans ce cadre, nous avons exposé les diverses typologies et classifications des systèmes hybrides. Puis, nous avons réalisé la modélisation de chaque élément du processus de conversion d'énergie de notre système SEH. Dans cette étude, une multitude de modèles ont été élaborés dans la documentation. La modélisation des générateurs photovoltaïques et éoliens se fonde sur le modèle de puissance propre à chaque générateur.

Dans le chapitre quatre, nous avons décrit les diverses approches de dimensionnement et d'optimisation mises en œuvre sur le système hybride pour établir la taille optimale du système.

Un programme de simulation et de gestion énergétique du système SEH (photovoltaïque / éolien / batterie) a été créé sous l'environnement de MATLAB/Simulink. L'algorithme d'optimisation par essaim particulaire « PSO », une technique méta-heuristique, a ensuite été mis en place en vue de diminuer les coûts énergétiques tout en répondant aux besoins en énergie d'une habitation isolée située dans la zone d'Adrar. Et à fin d'évaluer le pourcentage de dommage du banc de stockage. Le comptage et l'établissement de la profondeur de charge pour chaque cycle (charge-décharge) d'une batterie au plomb-acide ont été réalisés au moyen de l'algorithme Rainflow.

La configuration idéale est celle qui fixe la dimension du générateur photovoltaïque, la dimension du générateur éolien et la capacité du banc de stockage tout en minimisant le coût énergétique, garantissant une satisfaction maximale de la charge et un taux de dégradation de batterie aussi bas que possible. Cette configuration a été validée et les résultats ont été comparés en employant l'algorithme génétique GA comme méthode d'optimisation.

Il est envisageable de diminuer considérablement la consommation d'énergie en appliquant des stratégies d'efficacité énergétique dans l'habitat. Le dernier chapitre dédié à l'étude du comportement thermique et la performance énergétique de notre habitation isolée située dans un lieu reculé à Adrar, afin d'optimiser la gestion et le contrôle de l'utilisation de l'énergie par le biais du chauffage et de la climatisation. Dans cette partie, nous avons mis en évidence l'isolation thermique intérieure de l'enveloppe de l'habitat, compte tenu de l'importance cruciale que revêt le mur du bâtiment en tant qu'élément régulateur des échanges intérieurs/extérieurs.

Une simulation thermique et énergétique de l'habitat étudié a été effectuée en employant le logiciel TRNSYS. Les données obtenues démontrent les avantages considérables de l'isolation thermique des murs et de l'utilisation du double vitrage sur le perfectionnement de la performance énergétique et l'abaissement du gaspillage d'énergie.

Les résultats obtenus dans cette thèse correspondent à l'objectif visé par ce travail.

Pour continuer nos travaux, nous recommandons les recherches suivantes :

- Des recherches supplémentaires sur l'inclusion des paramètres de la structure de l'habitat dans l'optimisation et l'élaboration des installations hybrides autonomes.

- Un traitement efficace de l'aspect isolation thermique pour les sociétés projetant de lancer une start-up dédiée à la fabrication d'isolants thermiques performants pour les bâtiments éco énergétiques dans un futur proche.
- Opter pour des équipements de chauffage/ climatisation solaire.
- Également, envisagez d'explorer de nouvelles directions de recherche dans l'utilisation des isolateur thermique et de la peinture.
- Incorporer le concept de réhabilitation énergétique dans les politiques gouvernementales.
- Travailler sur la vulgarisation des concepts de Smart Home "Domotique,...".

## ***Bibliographie***

- [1] Hristiyan Kanchev, "Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable: Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain", thèse de doctorat. Ecole centrale de Lille France 2014.
- [2] Hellel El Kadi," Fiabilité des systèmes énergétiques multi-sources", thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou 2019
- [3] Youssef H Saad," Gestion optimale des systèmes hybrides pour la production de l'énergie dans les sites isolés", thèse de doctorat, 'université de technologie Belfort - Montbéliard,2018.
- [4] Fahad Maoulida " Modélisation et optimisation d'un système hybride de génération d'énergie pour l'habitat rural en Afrique " thèse de doctorat, Université De Lorraine, 2024.
- [5] Razika Kharchi "Etude Energétique De Chauffage, Rafraichissement Et Eau Chaude Sanitaire D'une Maison Type En Algérie", thèse doctorat, Université Abou berk belkaid Tlemcen,2013.
- [6] Alibi Abdelaali, "Modélisation, commande et optimisation énergétique d'un système à base de sources renouvelables : application aux bâtiments à basse consommation", thèse de doctorat, université batna2, 2023.
- [7] World energy outlook 2024, International Energy Agency.
- [8] Bilan énergétique national année 2023, édition 2024, ministère de l'énergie et des mines et des énergies renouvelables
- [9] Naim Houcine, "Etude de gestion d'une mini centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesure, contrôle et régulation de l'énergie électrique", thèse de doctorat, université Oran, 2016.
- [10] Mohamed Lakhdar LOUAZENE, "Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes" – Application zone de Ouargla; thèse de doctorat, université Batna, 2015.
- [11] Ammar Hachemi," Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système hybride dédié au pompage ", thèse de doctorat, université de Biskra2017.
- [12] Daoud Amine," Contrôle de la Puissance d'un Générateur Photovoltaïque pour le Pompage Solaire ", thèse de doctorat, Université Oran, 2013.
- [13] M. Mehimmedetsi Boudjemaa," performances des réseaux hybrides solaires appliqués à l'électrification rurale ",thèse de doctorat, université Constantine, 2018
- [14] [www.energieplus-lesite.be](http://www.energieplus-lesite.be)

- [15] Biao Wang, "Les impacts de la morphologie urbaine sur le vent : performance d'énergie éolienne à l'échelle de quartier", thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2015.
- [16] Dris Mida, "Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Energie Electrique Hybride « Eolien – Photovoltaïque »", thèse de doctorat, Université de Biskra, 2019.
- [17] Hayder Gallas, "Contribution à la Commande d'un Générateur de type Synchrone à Double Excitation dans le cas d'une Application Éolienne et Comparaison avec d'autres Architectures", thèse de doctorat, Université de Paris, 2021.
- [18] Ibrahim Guenoune, "Commandes non linéaires robustes de systèmes éoliens", thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2018.
- [19] Kahla Sami, "Modélisation et commande d'un système éolien", thèse de doctorat, université Guelma, 2018.
- [20] Toual Belgacem, "Contribution à la Commande et la Gestion des Sources Hybrides d'Energie Electrique", thèse de doctorat, université de Batna, 2018.
- [21] Gary L. Johnson, "Wind Energy Systems", Livre, édition, October 10, 2006.
- [22] Hussein Ibrahim, "Etude et conception d'un générateur hybride d'électricité de type éolien-diesel avec élément de stockage d'air comprimé", thèse de doctorat, université Québec à Chicoutimi, 2010.
- [23] Ksentini Abdelhamid, "Gestion et Optimisation du site idéal des éoliennes en Algérie pour une zone autonome", thèse de doctorat, université de Batna, 2018.
- [24] Boukebbous Seif eddine, "Contribution à l'étude d'une installation photovoltaïque avec stockage connectée au réseau électrique", thèse de doctorat, Université Constantine, 2018.
- [25] Necaibia Salah, "Stockage de l'énergie par batterie d'une installation photovoltaïque appliquée à un pompage solaire", thèse de doctorat, université Annaba, 2019.
- [26] Killian Dénoue, "Synthèse de nouveaux électrolytes solides à base de soufre pour le stockage de l'énergie", thèse de doctorat, Université de Rennes, 2021.
- [27] Quentin Lemarié, "Développement et caractérisation in situ d'électrodes positives pour batteries Lithium/Soufre", thèse de doctorat, Université de Lyon, 2020.
- [28] Margot Gaetani-Liseo, "Prise en compte des systèmes de stockage de l'énergie et de leurs dégradations dans la gestion et le dimensionnement des micro-réseaux: influence de la précision des modèles", thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2021.
- [29] Bloomberg NEF's annual battery price December 2022.
- [30] Rabah Rouas, "Etude d'un système hybride éolien-photovoltaïque", thèse de doctorat, Université de Tizi-Ouzou, 2018.

- [31] Saïd Khoudiri, " Commande et Optimisation d'un Système Energétique Hybride (SEH): Application à l'Énergie Renouvelable ", Université de Biskra, 2018.
- [32] Maamir Madiha, "Techniques de supervision d'énergie d'un système d'entraînement Electrique hybride", thèse de doctorat, université de Biskra, 2020.
- [33] Ludmil Stoyanov, " Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables ", thèse de doctorat, université technique de Sofia, 2011.
- [34] Nadjwa Chettibi, " Contribution à la Commande Intelligente d'un Système Photovoltaïque Hybride ", thèse de doctorat, université de Jijel, 2017.
- [35] Yacine Triki, "Contribution à l'optimisation des systèmes hybrides de production d'énergies renouvelables", thèse doctorat, Université de Haute Alsace - Mulhouse; Université Mouloud Mammeri (Tizi-Ouzou, Algérie), 2020.
- [36] Douak Mohamed, "Conception d'un Système Hybride de Production d'Energie pour les Besoins du Bâtiment", thèse de doctorat, université de Ouargla, 2021.
- [37] Boutabba Tarek, "Contribution à la modélisation et à la commande d'un système de génération hybride Solaire-Eolien", thèse de doctorat, université de Batna, 2018.
- [38] Guezgouz Mohammed, " Perfectionnement et expertise des systèmes énergétiques complexes incorporant des sources renouvelables : Application au système hybride éolien-PV avec batteries sur un site national", thèse de doctorat, Université de Mostaganem, 2020.
- [39] Borni Abdelhalim, " Etude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie électrique ", thèse de doctorat, université de Constantine, 2015.
- [40] Hugues Renaudineau " Hybrid renewable energy sourced system energy management & self diagnosis", thèse de doctorat, université de lorraine 2013
- [41] Akassewa Tchapo SINGO, "Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome", thèse doctorat, université, Nancy 2010.
- [42] M.E. Glavin , W.G. Hurley, " Optimisation of a photovoltaic battery ultracapacitor hybrid energy storage system", Solar Energy 86 (2012) 3009–3020. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.005>
- [43] Mariem Smaoui, Achraf Abdelkafi, Lotfi Krichen, "Optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind/hydrogen hybrid system supplying a desalination unit", Solar Energy 120 (2015) 263–276, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.07.032>.
- [44] Sahand Rahimi , Mousa Meratizaman , Sina Monadizadeh , Majid Amidpour, " Techno-economic analysis of wind turbine PEM (polymer electrolyte membrane) fuel cell hybrid system in standalone area", Energy 67 (2014) 381e396, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.072>.



- [45] Hanane Dagdougui, Riccardo Minciardi, *Member, IEEE*, Ahmed Ouammi, Michela Robba, and Roberto Sacile, "A Dynamic Decision Model for the Real-Time Control of Hybrid Renewable Energy Production Systems", *IEEE Systems Journal*, vol. 4, no. 3, 2010, doi:10.1109/JSYST.2010.2059150.
- [46] Tao Ma, Hongxing Yang, Lin Lu, Jinqing Peng, "Pumped storage-based standalone photovoltaic power generation system: Modeling and techno-economic optimization", *Applied Energy* 137 (2015) 649–659, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.005>
- [47] Abdelhamid Kaabeche, Rachid Ibtouen, "Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a stand-alone power system", *Solar Energy* 103 (2014) 171–182, <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2014.02.017>
- [48] Godfred Tay, Amevi Acakpovi, Patrick Adjei, George K. Aggrey, Robert Sowah, Daniel Kofi, Maxwell Afonope, Mustapha Sulley, "Optimal sizing and techno-economic analysis of a hybrid solar PV/wind/diesel generator system", *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 1042 (2022) 012014, doi:10.1088/1755-1315/1042/1/012014
- [49] Tao Ma, Hongxing Yang, Lin Lu, Jinqing Peng, "Optimal design of an autonomous solar–wind-pumped storage power supply system", *Applied Energy* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.026>
- [50] Yang Hongxing, Zhou Wei, Lou Chengzhi, "Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar–wind power generation system", *Applied Energy* 86 (2009).
- [51] Tao Ma, Hongxing Yang, Lin Lu, "A feasibility study of a stand-alone hybrid solar–wind–battery system for a remote island", *Applied Energy* 121 (2014) 149–158, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.090>
- [52] Ayong Hiendro, Rudi Kurnianto, Managam Rajagukguk, Yohannes M. Simanjuntak, Junaidi, "Techno-economic analysis of photovoltaic/wind hybrid system for onshore/remote area in Indonesia", *Energy* 59 (2013) 652e657, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.005>.
- [53] Mustafa Engin, "Sizing and Simulation of PV-Wind Hybrid Power System", *International Journal of Photoenergy*(2013) ,217526, 10, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/217526>
- [54] Chong Li Xinfeng Ge, Yuan Zheng, Chang Xu, Yan Ren, Chenguang Song, Chunxia Yang, "Techno-economic feasibility study of autonomous hybrid wind/PV/ battery power system for a household in Urumqi, China", *Energy* 55 (2013) 263e272, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.084>.

- [55] D. Abbes, A. Martinez, G. Champenois, "Eco-design optimisation of an autonomous hybrid wind–photovoltaic system with battery storage", *IET Renewable Power Generation* (2012), doi: 10.1049/iet-rpg.2011.0204.
- [56] Lila croci, "Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/super condensateurs", thèse de doctorat, université de Poitiers , Décembre 2013
- [57] Frédéric Gailly, "Alimentation électrique d'un site isolé à partir d'un générateur photovoltaïque associé à un tandem électrolyseur/pile à combustible (batterie H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>)", thèse de doctorat, université de Toulouse , Juillet 2011.
- [58] M.S. Ismail , M. Moghavvemi, T.M.I. 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* 69 (2013) 163–173, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.02.005>
- [59] Wei Wu, Veni Indah Christiana, Shin-An Chen, Jenn-Jiang Hwang, "Design and techno-economic optimization of a stand-alone PV (photovoltaic)/FC (fuel cell)/battery hybrid power system connected to a wastewater-to-hydrogen processor", *Energy* 84 (2015) 462e472, <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.03.012>
- [60] Jong Hwan Lim, " Optimal Combination and Sizing of a New and Renewable Hybrid Generation System", *International Journal of Future Generation Communication and Networking* Vol. 5, No. 2, June, 2012.
- [61] Lei Zhang and Yaoyu Li, *Member, IEEE*, "Optimal Energy Management of Hybrid Power System with Two-Scale Dynamic Programming" 978-1-61284-788-7/11/2011 IEEE.
- [62] Nabil Karami, Nazih Moubayed, Rachid Outbib, "Energy management for a PEMFC–PV hybrid system", *Energy Conversion and Management* 82 (2014) 154–168, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.02.070>.
- [63] M. F. Almi, M. Arrouf, H.Belmili, S. Boulouma, B. Bendib, "Energy management of wind/PV and battery hybrid system, *International Journal of New Computer Architectures and their Applications (IJNCAA)* 4(1): 30-38, 2014 (ISSN: 2220-9085).
- [64] T.Nacer, A.Hamidat, O.Nadjemi, "Techno-economic impacts analysis of a hybrid grid connected energy system applied for a cattle farm", *Energy Procedia* 75 (2015 ) 963-968.
- [65] Fayza S. Mahmoud, Ashraf M. Abdelhamid, Ameena Al Sumaiti, Abou-Hashema M. El-Sayed, and Ahmed A. Zaki Diab, "Sizing and Design of a PV-Wind-Fuel Cell Storage System Integrated into a Grid Considering the Uncertainty of Load Demand Using the Marine Predators Algorithm", *Mathematics* 2022, 10, 3708. <https://doi.org/10.3390/math10193708>

- [66] Anthony Roy, "Gestion optimale d'un système multi-sources pour un site isolé en mer ", thèse de doctorat, université de Nante , 2020.
- [67] Dhaker Abbes, "Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome ", thèse de doctorat, université de Poitiers,2012.
- [68] Viktor Stepaniuk, "energy management systems for smart active residential buildings", université Aalborg, Denmark, 2021.
- [69] Brian Davison, " The evaluation of data filtering criteria in wind turbine power performance assessment ", université de Edinburgh Napier UK 2019.
- [70]Toufik Madani Layadi, Gérard Champenois, Mohammed Mostefai," Modeling and Design Optimization of an Autonomous Multisource System Under a Permanent Power-Supply Constraint", IEEE Transactions On Sustainable Energy, VOL. 6, NO. 3, 2015
- [71] Margot Gaetani-Liseo," Prise en compte des systèmes de stockage de l'énergie et de leurs dégradations dans la gestion et le dimensionnement des micro-réseaux : influence de la précision des modèles", thèse de doctorat, université de Toulouse, 2021.
- [72] Bouchra Benabdelkrim," Etude et simulation de l'effet de paramètre climatique sur les modules solaires en couche mince en région saharien", thèse de doctorat, université Adrar, 2021
- [73] Gourbi Abdelkader," Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque hybride de production d'énergie électrique", thèse de doctorat, université Sidi Bel Abbes,2017.
- [74] Ammari Chouaib," Modélisation, simulation et optimisation d'un system hybride autonome en trois sources ", thèse de doctorat, université Adrar ,2018.
- [75] Mohamed Mladjao Mouhammad Al anfaf," Contribution a la modélisation et a l'optimisation de Systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges.", de doctorat de doctorat, université de lorraine ,2016
- [76] Maroua Haddad," Sizing and management of hybrid renewable energy system for data center supply", Université Bourgogne Franche-Comté, 2019.
- [77] A. El Khadimi, L. Bchi et A. Zeroual," Dimensionnement et Optimisation Technico-économique d'un Système d'Energie Hybride Photovoltaïque - Eolien avec Système de Stockage",*Rev. Energ. Ren. Vol. 7 (2004) 73-83.*
- [78] K. Kusakana H.J. Vermaak and B.P. Numbi,"Optimal sizing of a hybrid renewable energy plant using linear programming". IEEE PES PowerAffica 2012 Conference and Exposition Johannesburg, South Africa, 09-13 July 2012

- [79] Muhammad Shahzad Javed , Aotian Song , Tao Ma,"Techno-economic assessment of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for a remote island using genetic algorithm", Energy 176 (2019) 704e717 Elsevier,<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.131>
- [80] Olga Roudenko, "Application des algorithmes évolutionnaires aux problèmes d'optimisation multi-objectif avec contraintes", thèse doctorat, Ecole Polytechnique France 2004.
- [81] Hanaâ Hachimi,"Hybridations D'algorithmes Métaheuristiques En Optimisation Globale Et Leurs Applications,thèse de doctotat, université Mohammed V Agdal,2013.
- [82] Boutelli Halima," Etude d'un système hybride à sources d'énergie renouvelables dans la région de Ouargla: Application au pompage de l'eau", thèse de doctorat, université de Ouargla,2023.
- [83] S. Diaf, M. Haddadi et M. Belhamel," Analyse technico économique d'un système hybride (photovoltaïque/éolien) autonome pour le site d'Adrar", *Revue des Energies Renouvelables Vol. 9, N°3 (2006) 127 - 134*.
- [84] Francisco Gonçalves Goiana Mesquita," Design Optimization of Stand-Alone Hybrid Energy Systems", Université de Porto,Portugal, 2010.
- [85] Tarek NACER,"Etude de d'impact des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau électrique BT sur le bilan électrique des fermes agricoles", thèse de doctorat, université de Blida 2017.
- [86] A. Prashant Kumar, "Analysis of Hybrid Systems: Software Tools"International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB16).
- [87] HOMER Pro Version 3.7,user Manual,August 2016.
- [88] Joséanne Bélanger-Gravel, Analyse technico-économique d'un système hybride éolien-photovoltaïque en comparaison avec les systèmes photovoltaïque et éolien seuls ,Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal] (2011). <https://publications.polymtl.ca/757/>
- [89] Gregory J. Leng, Kevin Bourque, ,"Analyse de projets d'énergies propres et RETScreen International" ,Support technique.
- [90] Analyse de projets d'énergies propres : Manuel d'ingénierie et d'études de cas RETScreen, 3<sup>ème</sup> édition
- [91] Fareh sheriff, RETScreen Expert, Logiciel de gestion d'énergies propres.2020
- [92] Bediar Samira," Contribution à l'étude de l'impact de l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques intelligents ", thèse de doctorat, université Adrar,2022.

- [93] André Mermoud, "Logiciel PVsyst pour l'étude de systèmes photovoltaïques".
- [94] PVSysT7" Procédure d'exportation scène 3D", Tutoriel PVsyst SA.
- [95] Rodolfo Dufo López, " iHOGA Version 3.4 User's manual" , université Zaragoza, Spain, June, 2024.
- [96] Nathanael Dougier, " Modélisation systémique pour l'optimisation multi-objectifs de systèmes énergétiques – Application aux micro-réseaux électriques isolés", Université HESAM, 2022.
- [97] Hichem Azli, "Contribution A L'intégration Des Algorithmes D'ordonnancement Dans Les Systèmes De Production ; Application Aux Systèmes De Production D'Energie Electrique", thèse de doctorat, université de Sétif.
- [98] Belloufi Abderrahim, " Contribution à l'analyse de l'efficacité des techniques d'optimisation appliquées en production industrielle", thèse de doctorat, université de Biskra, 2015.
- [99] Maude Josée Blondin, "méthode d'optimisation hybride pour la Commande de systèmes non linéaires Avec contraintes multiples et Mécanismes d'anti-saturation", thèse de doctorat, université du Québec à Trois-Rivières, 2018.
- [100] Ali Tarraq, Faissal Elmariami, Aziz Belfqih, and Touria Haidi, "Meta-heuristic optimization methods applied to renewable distributed generation planning": A review, E3S Web of Conferences 234, 00086 (2021), <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123400086>.
- [101] Mohammadreza Bonyadi, "Particle swarm optimization: theoretical analysis, modification, and application to constrained optimization problems", these de doctorat, université de adelaide, 2014.
- [102] Hanieh Borhanazad, Saad Mekhilef, Velappa Gounder Ganapathy, Mostafa Modiri-Delshad, Ali Mirtaheri, "Optimization of micro-grid system using MOPSO, Renewable Energy 71 (2014) 295e306, <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.006>.
- [103] Kyle Robert Harrison, "An Analysis of Parameter Control Mechanisms for the Particle Swarm Optimization Algorithm", thèse de doctorat, Université de Pretoria, Afrique du Sud, 2018.
- [104] Satyobroto Talukder, "Mathematical Modelling and Applications of Particle Swarm Optimization", these Master of Science, School of Engineering, Blekinge, 2011.
- [105] Jérôme Emeka Onwunalu, " Optimization of field development using particle swarm optimization and new well pattern descriptions", thèse de doctorat, Stanford university, 2010.

- [106] Maria Zemzami, Norelislam Elhami, Abderahman Makhloufi, Mhamed Itmi, Nabil Hmina," Electrical power transmission optimization based on a new version of PSO algorithm", ISTE Science Publishing, London, UK ,2016
- [107] Mahmoud Ghofrani and Negar Niromand Hosseini,"Optimizing Hybrid Renewable Energy Systems:A Review", Sustainable Energy - Technological Issues, Applications and Case Studies,2016 <http://dx.doi.org/10.5772/65971>.
- [108] Binayak Bhandari, Kyung-Tae Lee, Gil-Yong Lee, Young-Man Cho#, and Sung-Hoon Ahn, "Optimization of Hybrid Renewable Energy Power Systems: A Review", International journal of precision engineering and manufacturing-green technology Vol. 2, No. 1, pp. 99-112, January 2015.
- [109] Kaabeche Abdelhamid," Etude comparative entre le stockage à hydrogène et les batteries au plomb dans un système hybride (Photovoltaïque / Eolien) autonome ",thèse de doctorat, Ecole nationale polytechnique.2012.
- [110] Samer Boumechta 1 et Abdelhamid Kaabeche,"Optimisation du dimensionnement d'un système hybride Eolien/Diesel", Revue des Energies Renouvelables Vol. 18 N°3 (2015) 439 – 456. DOI: <https://doi.org/10.54966/jreen.v18i3.519>
- [111] S.A. Derai 1 et A. Kaabeche," Modélisation et dimensionnement d'un système hybride Eolien/ Photovoltaïque autonome", Revue des Energies Renouvelables Vol. 19 N°2 (2016) 265 - 276.
- [112] S. khenfous, A. Kaabeche et S. Diaf," Optimisation du dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/éolien par des méthodes méta heuristiques "; Revue des Energies Renouvelables Vol. 20 N°2 (2017) 267 - 284
- [113] N.Rahmani, M. Mostefai « Multi-objective MPSO/ GA optimization of an autonomous pv/wind hybrid energy system» Engineering, Technology & Applied Science Research Volume: 12 | Issue: 4, Pages: 8817-8824(August 2022). <https://doi.org/10.48084/etasr.4877>
- [114] Hocine Belmili, Mourad Haddadi, Seddik Bacha , Mohamed Fayçal Almi, Boualem Bendib , "Sizing stand-alonephotovoltaic–wind hybridsystem: Techno-economic analysis and optimization", Renewable and Sustainable Energy Reviews30(2014) 821–832, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.011>.
- [115] Edson Haruo MIYAURA,"Modélisation de fatigue et de mécanique de la rupture d'une structure éolienne soumise au chargement dynamique et aléatoire du vent", thèse de doctorat, l'INSA Rouen Normandie, 2016
- [116] marc poirier," modélisation et simulation du comportement dynamique des aubes de turbines hydroélectriques", thèse maîtrise en génie mécanique, université du Québec,2013

- [117] Yuanyuan Shi, Bolun Xu, Yushi Tan, and Baosen Zhang, "A Convex Cycle-based Degradation Model for Battery Energy Storage Planning and Operation", arXiv:1703.07968 (math.OC), <https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.07968>.
- [118] Seçil ariduru, "Fatigue life calculation By Rainflow cycle counting method", thèse master en science, Université Technique Du Moyen-Orient, 2004.
- [119] Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis1, ASTM Committee E1049 – 85 on Fatigue and Fracture, 2017.
- [120] Toufik Madani Layadi , Gerard Champenois, Mohammed Mostefai, Dhaker Abbas, "Lifetime estimation tool of lead–acid batteries for hybrid power sources design", *Simulation Modelling Practice and Theory* 54 (2015) 36 – 48, <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2015.03.001>.
- [121] Norsuzila Ya'acob, Abang Syahizam Gobil Abang Apandi, Azita Laily Yuso, Murizah Kassim, Nani Fadzlina Naim, "Prediction of Battery Lifetime using Hybrid Solar Power System", *Mathematical Statistician and Engineering Applications*, 2326-9865 Vol 71 No. 2 (2022).
- [122] Layadi Toufik Madani, Gérard Champenois, Mohammed Mostefai, Ilhami Colak, Korhan Kayisli, "Design of Sustainable Multi-Source Power Systems using lithium batteries", *Journal of Energy Storage Elsevier*, V60, April 2023, DOI: 10.1016/j.est.2023.106648
- [123] Van Xuan TRAN, "Estimation de la durée de vie en fatigue à grand nombre de cycles et en fatigue oligocyclique", *Manuel de référence Fascicule r7.04 : Evaluation du dommage*, 2012, (<http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html>).
- [124] Layadi Toufik Madani, "Intégration des Méthodes d'Optimisation dans une Approche Productive", thèse de doctorat, université Ferhat Abbas Sétif, 2016
- [125] Les politiques d'efficacité énergétique dans le monde, Conseil Mondial de l'Énergie, 2013.
- [126] Bilan énergétique national année 2023, édition 2024.
- [127] Gratien Jesugo Dieudonné KIKI, "Amélioration De L'efficacité Energetique Des Batiments Publics Du Sud Du Benin Par Utilisation Des Matériaux Biosources Locaux", thèse de doctorat en cotutelle, Université de Liège (Belgique) et Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 2023.
- [128] Ibrahim Neya, Daniel Yamegueu, Yézouma Coulibaly, Adamah Messan, Arnaud Louis Sountong-Noma Ouedraogo, "Impact of insulation and wall thickness in compressed earth buildings in hot and dry tropical regions". *Journal of Building Engineering*, 2021.

- [129] Farah Eddib, Moulay Abdellah Lamrani, "Effect of the thermal insulators on the thermal and energetic performance of the envelope of a house located in Marrakesh", *Alexandria Engineering Journal* (2019) 58, 937–944, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.08.008>
- [130] Yitong Dong, Jiashu Kong, Seyed mostafa Mousavi , Behzad Rismanchi and Pow-Seng Yap," Wall Insulation Materials in Different Climate Zones: A Review on Challenges and Opportunities of Available Alternatives", *Thermo* 2023, 3, 38–65. <https://doi.org/10.3390/thermo3010003>.
- [131] Brigitta Vajó, Ákos Lakatos," Super Insulation Materials—An Application to Historical Buildings", *Buildings* 2021, 11, 525. <https://doi.org/10.3390/buildings11110525>
- [132] Linshuang Long & Hong Ye," The roles of thermal insulation and heat storage in the energy performance of the wall materials: a simulation study",2016 *Scientific Reports* | 6:24181 | DOI: 10.1038/srep24181.
- [133] Cenk Onan," Determination of the Thermal Insulation for the Model Building Approach and the Global Effects in Turkey", *Hindawi Publishing Corporation, Advances in Mechanical Engineering*, 2014, ID 960278, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/960278>.
- [134] Kurniati Ornam, Surjamanto Wonorahardjo, Sugeng Triyadi, Masykur Kimsan, "Thermal Behaviour and Micro Climate Studies of Several Wall Insulation on Houses in a Tropical Climate (Aw) Area", 2022, *IOP Conf. Ser,Earth Environ. Sci.* 1058 012019, doi:10.1088/1755-1315/1058/1/012019
- [135] Naouel Daouas," A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings in Tunisian buildings based on analytical calculation of cooling and heating transmission loads", *Applied Energy* 88 (2011) 156–164, doi:10.1016/j.apenergy.2010.07.030
- [136] Ibtiassame Benoudjafer," Vers une amélioration de la performance énergétique des habitations : la certification énergétique comme une stratégie durable. Cas de la ville de Bechar", thèse de doctorat, université de Biskra,2018.
- [137] Mothanna Salama, " Développement d'un label énergétique destiné aux bâtiments résidentiels de la région Est-Méditerranée (Syrie et Liban) ", *Ecole Doctorale Abbe Gregoire, France*,2014.
- [138] Sofiane Rahmouni," Evaluation et Amélioration Energétiques de Bâtiments dans le cadre du Programme National d'Efficacité Energétique", thèse de doctorat, université Batna2, 2020.



- [139] Bernard Morino Ganou Koungang," Construction en brique de terre comprimée et granulats biosourcés: une solution pour un habitat durable à Douala ", thèse de doctorat, en cotutelle Université de Liège et Université de Douala,2021.
- [140] Laafer Abdelkader," Contribution a La Simulation Des Charges Thermiques Dans Un Habitat à Plancher Chauffant", thèse de doctorat université de Blida, 2022.
- [141] Thomas Recht," Étude de l'écoconception de maisons à énergie positive" , thèse de doctorat, Université Paris, 2016.
- [142] Nadia SAIFI," contribution a la conception des bâtiments a faible Consommation d'énergie dans les zones arides", thèse de doctorat, université Ouargla,2016.
- [143] Kadi Yasmina," Evaluation de la performance énergétique du logement Collectif dans les zones humides «cas de la ville Bejaia Algérie", thèse de doctorat, université de Constantine, 2024.
- [144] Document technique règlementaire, Réglementation thermique des bâtiments, DTRC3-2
- [145] Document technique règlementaire, climatisation, DTR C3-4.
- [146] Islam Boukhelkhal," texture de l'enveloppe et son influence sur la performance énergétique du bâtiment dans le climat chaud et aride ",thèse de doctorat, université de Constantine, 2022.
- [147] Rachid Malek," Cours de Thermique du Bâtiment ", Université Mohammed Premier, Oujda,2014.
- [148] Introduction à la thermique du bâtiment, édition 2012, Saint Gobain
- [149] Younes El Jaouhari,"Audit Énergétique D'un Bâtiment Institutionnel: Stratégies D'efficacité Énergétique", thèse de maîtrise en ingénierie, Université Du Québec A Rimouski,2020
- [150] Ounis Safieddine, " Impact des choix formels et constructifs de la façade sur l'adaptabilité climatique et l'efficacité énergétique d'un bâtiment. Cas d'un climat chaud et aride", thèse de doctorat, université de Biskra,2022.
- [151] Hocine Belili," Contribution des enveloppes nano technologiques dans l'amélioration de la performance énergétique", thèse de doctorat, université de Constantine,2021.
- [152] Laure Ducoulombier," Conception d'un nouveau système d'isolation par l'extérieur pour le bâtiment ", thèse de Doctorat, Ecole Centrale De Lille,2014
- [153] My El Hadi Drissi Lamrhari," Comportement thermique et économie d'énergie dans un appartement avec différentes mesures d'efficacité énergétique dans les six zones climatiques du Maroc", thèse de doctorat, université Cadi Ayyad Marrakech(Maroc),2018.

- [154] TRNSys 18, a TRaNsient SYstem Simulation program 18, manuel d'utilisation du logiciel.
- [155] Meteonorm 8, irradiation data for every place on Earth, Handbook part II, 2023.
- [156] <https://interieur.gov.dz/>